



universität
wien

Diplomarbeit

Titel der Arbeit

**Neuronale Korrelate der
Zeitdiskontierung:
Eine EEG-Studie zur Entwertung verzögerter
monetärer Belohnungen**

Verfasser

Felix Oswald

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, im Juni 2010

Studienkennzahl: 298

Studienrichtung: Psychologie

Betreuer: PD Dr. Uta Sailer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der vorliegenden Diplomarbeit fachlich und persönlich unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt PD Dr. Uta Sailer, die mich in allen Stadien der Arbeit unterstützt hat. Des Weiteren danke ich Florian Güldenpfennig für eine gute Zusammenarbeit in technischen und mathematischen Fragen, sowie Jakob Leyrer und Christian Bäuchl für diverse technische und andere Hilfestellungen.

Mein Dank gilt auch meinen Kollegen, Christian, Claudia und Stefan die mir bei den Ableitungen assistierten, sowie jenen 30 Personen (größtenteils Kollegen, mein Bruder Florian und Freunde), die die Geduld und den Mut aufgebracht haben, die Rolle der Versuchsperson einzunehmen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern Christl und Peter bedanken, die mich über die ganze Zeit meines Studiums in vielerlei Hinsicht unterstützt haben, immer hinter mir standen und nie an meinem Weg gezweifelt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Intertemporale Entscheidungsfindung.....	7
2.1 Historische Ursprünge intertemporaler Entscheidungsfindung.....	8
2.2 Ökonomische Modelle der Zeitdiskontierung.....	10
2.2.1 Situationale Diskontierungsfaktoren.....	16
3. Psychologie der Zeitdiskontierung (Impulsivität vs. Zukunftsplanung).....	19
4. Neuronale Grundlagen der Belohnungsverarbeitung und Zeitdiskontierung.....	23
4.1 Experimentelle Messung der Zeitdiskontierung.....	24
4.2 Orbitofrontalcortex (OFC).....	25
4.3 MPFC, VS/NAcc, PCC.....	27
4.4 DLPFC, VLPFC, LOFC.....	31
4.5 DLPFC und VMPFC – funktionelle Verbindungen.....	34
4.6 Individuelle Unterschiede in der Zeitdiskontierung - Impulsivität.....	36
5. Langsame Hirn-Potentiale.....	39
6. Studie: Fragestellung und Hypothesen.....	42
6.1 Hypothesen.....	43
7. Methode.....	46
7.1 Versuchspersonen.....	46
7.2 Versuchsablauf.....	46
7.2.1 Zeitdiskontierungsaufgabe.....	46
7.2.2 Elektroenzephalographie (DC-EEG).....	48
7.2.3 Applikation und Registrierung.....	50
7.3 Elektrophysiologische Analyse.....	51
7.3.1 Vorbearbeitung (Preprocessing).....	51
7.3.2 Zwischengruppenvergleich: Impulsivität.....	54
7.4 Statistische Analyse.....	54
7.4.1 Verhaltensdaten.....	54
7.4.2 SCP-Amplituden.....	55
7.5 Quellenlokalisierung (sLORETA).....	56
8. Ergebnisse.....	58
8.1 Verhaltensdaten.....	58

8.1.1 Wahlverhalten.....	58
8.1.2 Reaktionszeiten (RT).....	59
8.2 Elektrophysiologische Daten.....	62
8.2.1 Analyse 1: Belohnungsattribute.....	63
8.2.2 Analyse 2: Entscheidungsverhalten.....	69
8.2.3 Quellenlokalisierung.....	69
9. Diskussion.....	74
10. Conclusio.....	83
11. Zusammenfassung/ Abstract.....	84
11.1 Zusammenfassung.....	84
11.2 Abstract.....	85
 Anhang.....	 87
A. Versuchspersonen-Instruktion	
 Literatur.....	 89

1. Einleitung

Zeitdiskontierung beschreibt das Phänomen, dass Menschen und Tiere Belohnungen, die erst mit zeitlicher Verzögerung verfügbar sind, entwerten (diskontieren) gegenüber unmittelbar verfügbaren Belohnungen. Die Entwertung verzögerter Belohnungen kommt in der intertemporalen Entscheidungsfindung zur Geltung, bei der man Entscheidungen im Zeitbereich treffen muss, Handlungen auswählen muss in Hinblick auf deren Konsequenzen für Gegenwart und Zukunft, abwägen muss, ob man lieber seinen aktuellen oder zukünftigen Nutzen optimieren möchte, ein Aspekt, der menschliche Entscheidungsfindung und Verhalten in allen Lebensbereichen betrifft.

Aktuell aktivierte Bedürfnisse aufschieben zu können, ist zentral für Zukunftsplanung. Beeinträchtigungen diesbezüglich finden sich in zahlreichen klinischen Störungsbildern, die mit Impulsivität assoziiert werden. Beim Aufschub von Bedürfnissen sind verschiedene Prozesse involviert, wie z.B. die Bewertung verzögerter Belohnungen (Antizipation) und die Ausübung von Selbst-Kontrolle.

In der Erforschung der Zeitdiskontierung geht es darum, diese Prozesse näher zu beleuchten, deren Interaktion und originäre Rolle in der Entscheidungsfindung besser zu verstehen. Zahlreiche Wissenschafts-Disziplinen beschäftigen sich mit diesem Phänomen, wie die Wirtschaftspsychologie, biologische Psychologie - Neurowissenschaft, Ökonomie, Philosophie, Soziologie, Biologie, Rechtswissenschaften, Politikwissenschaft und andere Disziplinen (Kalenscher & Pennartz, 2008).

Die vorliegende Studie hatte das Ziel, das Phänomen der Entwertung zeitlich verzögerter Belohnungen (Zeitdiskontierung) mittels Elektroencephalographie (EEG) zu untersuchen, und soll damit einen empirischen Beitrag zur neurowissenschaftlichen Untersuchung der Zeitdiskontierung (zugrundeliegende neuronale Korrelate) liefern.

Bisherige neurowissenschaftliche Studien zum Thema verwendeten die Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), mithilfe derer sich der Ort neuronaler Aktivität mit hoher Genauigkeit darstellen lässt. fMRT und EEG sind komplementäre Methoden, die Stärke des EEG liegt in der hohen zeitlichen Auflösung, die einen Einblick in den zeitlichen Verlauf (in die zeitliche Abfolge) von Hirnprozessen ermöglicht.

Mit der vorliegenden Studie soll der Erkenntnisstand zur Zeitdiskontierung um diesen Aspekt erweitert werden, gezeigt werden, welche Entsprechung die an der

Zeitdiskontierung beteiligten psychologischen Prozesse in den Hirnströmen von Menschen finden.

Die Entwertung zeitlich verzögerter Belohnungen wurde mittels eines Entscheidungsparadigmas gemessen, in dem sich die Versuchspersonen zwischen € 10 nach dem Experiment und einer höheren monetären Belohnung um einige Wochen verzögert entscheiden mussten. Insgesamt wurden die Personen vor 240 Wahlen gestellt, was es ermöglicht, die Stärke ihrer Diskontierung zu erfassen und die Hirnströme in Form der *Langsamen Potentiale* in Bezug auf verschiedene Aspekte der verzögerten Belohnung (wie Verzögerungsdauer und Belohnungshöhe) sowie in Bezug auf das Entscheidungsverhalten zu analysieren.

Im **zweiten Kapitel** werden ökonomische Modelle zur Beschreibung des menschlichen Entscheidungsverhaltens und das Modell des hyperbolischen Diskontierens vorgestellt. Des Weiteren werden Faktoren diskutiert, die einen Einfluss auf die Zeitdiskontierung haben, was zeigen soll, dass es keine singuläre individuelle Diskontierungsfunktion gibt, die individuelle Zeitdiskontierung vielmehr großen Schwankungen unterliegt.

Im **dritten Kapitel** geht es um die Psychologie der Zeitdiskontierung, die anhand eines einflussreichen Modells behandelt wird, welches zwei zentrale Prozesse postuliert, die das Entscheidungsverhalten modulieren und ihre Entsprechung im Persönlichkeitskonstrukt der Impulsivität finden.

Im **vierten Kapitel** werden neurowissenschaftliche Befunde zur Zeitdiskontierung und verwandter Konstrukte diskutiert, um einen Einblick in relevante Hirnareale und beteiligte neuronale Prozesse zu ermöglichen.

Das **fünfte Kapitel** gibt eine kurze Einführung in die physiologischen Grundlagen und kognitiven Korrelate *Langsamer Potentiale*, die in der vorliegenden Studie gemessen und analysiert wurden.

Im empirischen Teil wird die Fragestellung der vorliegenden Studie herausgearbeitet, das Experiment beschrieben, und in der Folge werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

2. Intertemporale Entscheidungsfindung

Entscheidungsfindung unter Risiko und Entscheidungsfindung im Zeitbereich (Zukunftsplanung), welche zwei Klassen von ökonomischen Entscheidungssituationen darstellen, beschäftigen Wissenschaftler vieler Disziplinen, wie der Psychologie, Biologie, Neurowissenschaften, Ökonomie, Rechtswissenschaften, Politikwissenschaften und der Philosophie.

Paradebeispiele für Risikoabwägung und Zukunftsplanung betreffen das Abschließen von Versicherungen (Kalenscher & Pennartz, 2008). Überlegt man, eine Haushaltsversicherung abzuschließen, wird man die laufenden Kosten (des Versicherungsbeitrages) mit dem Risiko eines Brandes, Wasserschadens etc. abwägen. Beim Abschließen einer Pensionsversicherung hingegen verzichtet man auf Geld in der Gegenwart, um eine finanzielle Absicherung im Alter (in der Zukunft) zu gewährleisten, allgemeiner ausgedrückt verzichtet man auf eine unmittelbare Belohnungsmaximierung zugunsten einer langfristig vernünftiger erscheinenden Strategie. Der Risikoaspekt ist hier gering, jedoch nicht vollkommen zu vernachlässigen, da der Erhalt von Belohnungen in der Zukunft immer eine gewisse Unsicherheit birgt.

Das Pensionsversicherungsbeispiel illustriert die Entscheidungsfindung im Zeitbereich (im folgenden als *intertemporale Entscheidungsfindung* bezeichnet), wo man die Wahl zwischen Optionen (positiven oder negativen Ergebnissen/Handlungsfolgen/Belohnungen) treffen muss, die zu verschiedenen Zeitpunkten auftreten. Ganz allgemein geht es in intertemporalen Entscheidungssituationen um das Abwägen zwischen dem Nutzen (oder Wert) eines gegenwartsnahen (typischerweise unmittelbaren) Ergebnisses mit dem Nutzen (oder Wert) eines anderen gegenwartsfernen Ergebnisses.

Steht man etwa vor der Wahl, einen Schokoladekuchen oder einen Fruchtsalat als Dessert zu nehmen, muss man den unmittelbaren Genuss, der vielleicht bei ersterem höher ist, abwägen mit den gesundheitlichen Vorteilen, den letzterer im Vergleich zu ersterem mit sich bringt. Beim Konsum von schädigenden Substanzen (Rauschmitteln etc.) muss man zwischen dem unmittelbaren Genuss, der aus dem Konsum resultiert und den gesundheitlichen Schäden in der Zukunft abwägen (Soman, Ainslie, Frederick, Li, Lynch, Moreau, Mitchell, Read, Sawyer, Trope, Wertenbroch & Zauberman, 2005).

Zeitdiskontierung, wie sie in der vorliegenden Studie untersucht wird, bezeichnet den Prozess der systematischen Entwertung von Belohnungen durch den Faktor Zeit. Es handelt es sich also um Entwertung im Kontext intertemporaler Entscheidungsfindung, bei welcher eine Wahl zwischen einer kleineren, früheren Belohnung und einer höheren späteren Belohnung¹ getroffen werden muss.

Unter *Probabilistischer Diskontierung* versteht man die Entwertung von Belohnungen, die nicht mit Sicherheit erfolgen. Der subjektive Wert einer Belohnung sinkt mit zunehmender Unsicherheit darüber, ob die Belohnung tatsächlich eintreten wird. Hierbei handelt es sich um Entwertung im Kontext von Risikoentscheidungen (Green & Myerson, 2004).

Trifft man Entscheidungen mit Implikationen für die eigene Zukunft, muss man jedoch auch negative Konsequenzen (Bestrafungen) berücksichtigen. Auch für diese gibt es einen Wertabfall über die Zeit, der aversive Charakter der Strafe nimmt ab. Um die Entwertung von Bestrafungen zu erfassen, werden experimentell Entscheidungssituationen konstruiert, die eine Entscheidung zwischen Bestrafungen mit unterschiedlicher zeitlicher Verzögerung (Berns et al., 2006) oder Wahrscheinlichkeit verlangen.

2.1 Historische Ursprünge intertemporaler Entscheidungsfindung

John Rae (1834) interessierte sich dafür, warum Staaten sich in ihrem Wohlstand unterscheiden, und führte die Unterschiede auf den psychologischen Faktor des *Willens zur Akkumulation* zurück, der das Spar- und Investitionsverhalten einer Gesellschaft determiniere. Rae setzte somit daran an, die von Adam Smith beschriebenen Akkumulationsunterschiede zwischen den Staaten psychologisch zu erklären (Frederick, Loewenstein & O'Donoghue, 2002).

Dieser *Wille zur Akkumulation* wiederum würde gestärkt durch zwei Faktoren, durch soziale und wohltätige Neigungen sowie durch Selbstbeherrschung (geprägt von intellektueller Stärke und tief in der Gesellschaft verankerten Tugenden wie Reflexionsvermögen, Sorgfalt, Besonnenheit und Klugheit). Selbstbeherrschung steht in Beziehung zu Bräuchen und Sitten einer Gesellschaft, welche Menschen dazu bringen würden, zu sparen und Mil-

¹ Anm.: Zeitdiskontierung ist für positive und negative Handlungs-Folgen/Konsequenzen (Verstärkung) möglich. Da die Befunde für beide unterschiedlich sind, wird die Verstärkung je nach Richtung als *Belohnung* oder *Bestrafung* bezeichnet, und auf den Begriff der *Verstärkung* weitgehend verzichtet.

lionäre zu werden, und auf der anderen Seite Millionäre dazu verleiten, ihr Vermögen zu verprassen (Fisher, 1930, nach Frederick et al., 2002). Als limitierenden Faktor erwähnte Rae die Unsicherheit des menschlichen Lebens. Feindselige Lebensbedingungen, schadhaft für Gesundheit und Leben, unfreundliche Umweltbedingungen, gefährliche Beschäftigungen würden die Menschen verschwenderisch und unbesonnen, auf den momentanen Gewinn ausgerichtet, machen. Krieg und Seuche würden Verschwendung und Prasserei mit sich bringen (Rae, 1834, S.57, nach Frederick et al., 2002).

Ein weiterer limitierender Faktor für den Akkumulationswillen sei die Leidenschaft zur unmittelbaren Konsumation und die Unannehmlichkeiten, die sich aus dem Bedürfnisaufschub ergeben würden. Daran ansetzend kann man zwei verschiedene Standpunkte ausmachen, die gemeinsam haben, dass sie intertemporale Entscheidungen auf unmittelbare Gefühlszustände zurückführen.

Die *Antizipatorische Nutzen-Theorie* (Jevons, 1888, nach Frederick et al., 2002) besagt, dass nur dann die spätere Bedürfnisbefriedigung angestrebt wird, wenn der zukünftige Nutzen antizipiert werden kann und daraus eine Befriedigung erwächst, die jene der unmittelbaren Bedürfnisbefriedigung übersteigt. Unterschiede im Verhalten ergeben sich dem zufolge aus unterschiedlichen antizipatorischen Fähigkeiten von Menschen sowie Situationen, welche diese beeinflussen.

Die *Abstinenz-Perspektive* (Senior, 1836, nach Frederick et al., 2002) ging davon aus, dass Bedürfnisaufschub zu negativen Gefühlen führe und infolge dessen die unmittelbare Bedürfnisbefriedigung angestrebt werden würde. Hier ergeben sich Verhaltensunterschiede aus interindividuellen Unterschieden im Erleben negativer Gefühle beim Bedürfnisaufschub sowie aus unterschiedlichen Situationen, etwa der Nähe der angestrebten Belohnung.

Eugen von Böhm-Bawerk (1889) führte als neuen psychologischen Faktor die Schwierigkeit bzw. Unfähigkeit, zukünftige Bedürfnisse einzuschätzen, ein (Frederick et al., 2002). Das Neue an Böhm-Bawerks Position war, dass er intertemporale Entscheidungen als technische Entscheidungen über die Verteilung von Ressourcen bzw. Konsumationen auf verschiedene Zeitpunkte auffasste bzw., allgemeiner formuliert, intertemporale Entscheidungen in denselben Termini konzeptualisierte wie andere ökonomische Kompromissentscheidungen.

All diese früh postulierten psychologischen Motive intertemporaler Entscheidungsfindung wurden in der *Diskontierten Nutzen-Theorie* (DUT) reduziert auf die sog. Diskontierungs-Rate. Im folgenden Abschnitt wird eine Einführung über Modelle

ökonomischen Verhaltens gegeben und die DUT als zentrale klassische Theorie genauer beschrieben.

2.2 Ökonomische Modelle der Zeitdiskontierung

Klassische Modelle des ökonomischen Verhaltens von Menschen behandeln dieses nicht deskriptiv, im Sinne einer Beschreibung des tatsächlichen Verhaltens, sondern normativ, im Sinne des idealen bzw. *rationalen* Verhaltens, welches definitionsgemäß jenes ist, das konform geht mit dem zugrunde liegenden normativen Modell (Kalenscher & Pennartz, 2008). Dabei trifft das Modell Grundannahmen (Axiome) über die Elemente des Entscheidungsraumes und die Präferenzrelationen des Entscheidungsträgers. Aus diesen Axiomen können Regeln abgeleitet werden, wie das gezeigte Wahlverhalten in Nützlichkeits-Relationen transformiert werden, den einzelnen Entscheidungsoptionen (z.B. Belohnungen) ein subjektiver Wert zugewiesen werden kann (Kalenscher & Pennartz, 2008). Die Berechnung des subjektiven Werts ist jedoch nur dann valide, wenn die normativen Grundannahmen (Axiome) des Modells bzw. der ökonomischen Theorie erfüllt sind. Die Nicht-Erfüllung der Axiome wird als irrationales Verhalten bezeichnet.

Eine der prominentesten Annahmen, die fast allen Modellen rationalen Verhaltens zugrunde liegt, ist, dass Personen danach streben, ihren *Nutzen* zu maximieren, wobei unter Nutzen die relative Zufriedenheit oder Gratifikation, die aus einem Gut erwächst, verstanden wird. Nutzen kann den Zugewinn an Geld, aber genauso auch den Genuss eines guten Essens oder einen abstrakteren Gewinn wie die Freude bei künstlerischer Selbstentfaltung ausdrücken. Im folgenden wird der Begriff des *subjektiven Wertes* synonym für den Begriff des *Nutzens* verwendet, da ersterer in der Psychologie üblicher ist.

Eine der einflussreichsten Theorien zu Risiko-Entscheidungen ist die *Theorie des erwarteten Nutzens* (Expected Utility Theory, EUT; (Von Neumann und Morgenstern, 1944)), die modifiziert auch auf intertemporale Entscheidungen angewendet werden kann.

Die Grundannahmen der EUT sind (Kalenscher & Pennartz, 2008):

- *Vollständigkeit*: es existieren Präferenzen, die zwischen allen Entscheidungs-Optionen differenzieren
- *Transitivität*: hierarchische Ordnung der Präferenzen
- *Kontinuität*: es besteht zumindest eine geringe Wahrscheinlichkeit der Indifferenz gegenüber der am meisten und der am wenigsten präferierten Option
- *Unabhängigkeit*: wenn eine nicht-präferierte Alternative hinzugefügt wird, ändert sich nichts an der Präferenz-Reihenfolge

Die Theorie geht davon aus, dass Personen jene Option wählen, die den maximalen Nutzen verspricht, bzw. sich so verhalten, dass der summierte Nutzen aller Entscheidungsfolgen maximal wird. Der summierte Nutzen ergibt sich aus der Summe der subjektiven Werte aller Entscheidungsfolgen, gewichtet (bzw. entwertet/diskontiert) mit deren Wahrscheinlichkeit.

Übertragen auf die Zeitdomäne lässt sich die **diskontierte Nutzen-Theorie** (Discounted Utility Theory, DUT; (Samuelson, 1937, nach Kalenscher & Pennartz, 2008)) formulieren, wobei hier die Zeit bis zu einer Entscheidungsfolge und nicht deren Wahrscheinlichkeit der Diskontierungsfaktor ist. Die DUT soll erklären, wie Individuen unter bestimmten Bedingungen intertemporale Entscheidungen treffen bzw. Zeit-Präferenzen entwickeln. Obwohl Samuelson die DUT nicht als deskriptives Modell einführte, wurde sie lange Zeit zum zentralen Modell für Wahlverhalten im Kontext intertemporaler Entscheidungssituationen erhoben. Insbesondere die Aufstellung von Axiomen (Koopman, 1960, nach Frederick et al., 2002) verhalf der DUT zu einer Zementierung ihrer Popularität, wobei auch hier keine psychologische Plausibilität, sondern die Ableitung von Zeitpräferenzen von Individuen unter idealen (und vermutlich unrealistischen) Bedingungen angestrebt wurde (Frederick et al., 2002).

Im Folgenden werden einige Grundannahmen (Axiome) der DUT und Widersprüche zu real beobachtbarem Entscheidungsverhalten diskutiert (Kalenscher & Pennartz, 2008).

➤ Monotonie

Dieses Axiom besagt, dass Belohnungen, die früher in der Zeit auftreten, (bei gleicher Höhe) immer gegenüber späteren bevorzugt werden. Eine Forderung die fragwürdig ist, da Personen den späteren Erhalt von Belohnungen als Sparverhalten sehen könnten und daher vielleicht lieber ein Jahr warten, wo sie damit rechnen könnten, vielleicht keinen Job zu haben. Einen Monat hingegen zu warten, könnte vom Standpunkt jener Personen keinen Sinn machen.

Bei Bestrafungen ist etwas ähnliches zu beobachten. Ist der Abstand zwischen zwei Bestrafungen kurz, wird eher die unmittelbare gewählt, da das Warten als aversiv erlebt wird. Bei genügend hohem zeitlichen Abstand wechselt jedoch die Präferenz und die spätere Belohnung wird gewählt, da die Verzögerung nicht mehr als Warten empfunden wird.

➤ Integration neuer Alternativen in existierende Verhaltenspläne (Frederick et al., 2002). Die DUT postuliert, dass Personen Entscheidungsalternativen evaluieren, indem sie diese in ihre vorhandenen Pläne integrieren. Integration bedeutet, dass der neue summierte Nutzen aller Konsumationsmöglichkeiten ($c't, \dots c'T$) berechnet wird, der sich durch die Entscheidungsalternative ergibt, und auf dieser Grundlage eine Entscheidung getroffen wird, wenn $(c't, \dots c'T) > (ct, \dots cT)$. Anders ausgedrückt werden Entscheidungen nicht isoliert getroffen aufgrund ihres isolierten Nutzens, sondern danach, wie sie die aggregierten Konsumationsmöglichkeiten über zukünftige Perioden beeinflussen.

➤ Positive Zeitpräferenzen (Frederick et al., 2002)

Diskontierungsraten sind immer positiv, d.h. spätere Belohnungen werden gegenüber früheren immer entwertet. Parfit (1971) brachte dafür ins Spiel, dass es kein beständiges Selbst gebe, dass ein zukünftiges Selbst schwächer erlebt werde als das gegenwärtige und ersterem daher auch weniger leicht Nutzen zugeordnet werden könne.

Frederick et al. (2002) konnten jedoch keinen empirischen Zusammenhang zwischen Entwertung verzögerter Geldbelohnungen und wahrgenommener Instabilität der eigenen Identität feststellen.

➤ Konsumations-Unabhängigkeit (Kalenscher & Pennartz, 2008)

Die Präferenz für die Konsumation einer Belohnung sollte laut DUT unabhängig von der Konsumation zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt sein, eine Forderung, die unvereinbar mit psychologischen und physiologischen Mechanismen ist. Samuelson (1952) widersprach dem und räumte ein, dass die Menge Wein, die er gestern konsumierte und die er morgen konsumieren wird, einen Einfluss habe auf seine heutige Indifferenz gegenüber Wein und Milch. Empirische Belege für dieses Bedürfnis nach Konsumations-Diversifizität bzw. -Streuung lieferten Loewenstein und Prelec (1993).

➤ Stationarität (Kalenscher & Pennartz, 2008) bezieht sich darauf, dass Personen Zeitintervalle gleichermaßen evaluieren, unabhängig davon, wie weit diese zeitlich von der Person entfernt sind. Die Konsequenz daraus ist, dass sich die Präferenzen nicht ändern sollten, wenn zu den Verzögerungen beider Belohnungen eine Zeitkonstante hinzugefügt wird. Wenn eine Person 20 Euro in 11 Wochen gegenüber 10 Euro in 10 Wochen bevorzugt, so sollte sie dies auch 10 Wochen später noch tun, wenn sie nun gefragt wird, ob sie lieber € 20 in einer Woche oder € 10 sofort hätte (das wäre im Sinne der DUT zeit-konsistentes Verhalten, da die Person bei ihrer ursprünglichen Präferenz bleibt). Im Experiment müsste eine Person, die € 20 in 11 Wochen gegenüber € 10 in 10 Wochen bevorzugt, auch € 20 in einer Woche gegenüber € 10 sofort bevorzugen. Dieser Annahme liegt zugrunde, dass der unterschiedliche subjektive Wert beider Optionen sich lediglich aus der unterschiedlichen zeitlichen Verzögerung der Optionen ergebe und sich die Differenz der Verzögerungen bei obigem Beispiel ja nicht ändere.

Mathematisch wurde diese Forderung in Form einer **exponentiellen Diskontierungs-Funktion** (mit einer konstanten Diskontierungsrate) ausgedrückt, der die Annahme zugrunde liegt, dass Präferenzen zeit-konsistent sind, d.h., dass die relative Präferenz für eine frühere Belohnung über eine spätere unabhängig

davon ist, wann die Person sich entscheiden muss (relativ zum Belohnungszeitpunkt).

Bei einer **konstanten Diskontierungsrate** von 10 % pro Woche, haben 100 Euro in einer Woche nur mehr einen subjektiven Wert von 90 Euro, in zwei Wochen von 81 Euro, in drei Wochen von 72,9 Euro und so weiter. Die Konsequenz aus dieser Forderung ist, dass Präferenzen stabil und konsistent sein müssen, sich nicht verändern, solange sich die Zeitspanne zwischen den Belohnungen nicht verändert.

Tatsächlich ist jedoch regelmäßig eine Präferenzumkehr bei veränderter gemeinsamer Verzögerung beider Optionen zu beobachten. Mit *gemeinsamer Verzögerung* ist jener Zeitbereich gemeint, den beide Optionen gemeinsam haben und der nur bei einer unmittelbaren Belohnung 0 ist. Im obigen Beispiel mit einer um 10 Wochen verzögerten früheren Belohnung und einer um 11 Wochen verzögerten späteren Belohnung beträgt die gemeinsame Verzögerung 10 Wochen. Eine Präferenzumkehr wäre, wenn eine Person 10 Euro Heute gegenüber 20 Euro in einer Woche, aber 20 Euro in 11 Wochen gegenüber 10 Euro in 10 Wochen bevorzugt.

Zu erklären ist eine solche Präferenzumkehr nur durch variable Diskontierungsraten, die bei geringer Verzögerung sehr hoch sind und dann über die Zeit mehr und mehr abnehmen, was als *Gegenwarts-Verzerrung* (present-biased) bezeichnet wird. Das bedeutet so viel, dass eine Belohnung, die näher heran rückt (gegenwartsnahe ist), überproportional hoch bewertet wird (O'Donoghue & Rabin, 1999).

Die empirischen Daten (Diskontierungs-Verhalten) zahlreicher Studien (Ainslie, 1975; Glimcher, Kable & Louie, 2007; Grossbard und Mazur, 1986; Kirby, 1997; Kirby & Marakovic 1995; Mazur, 1984, 1987, 1988 u.a.) konnten besser durch eine sog. hyperbolische Diskontierungsfunktion (Abb. 1) erklärt werden, in der die Diskontierungsrate variabel ist, und eine Präferenzumkehr beschrieben werden kann:

hyperbolische Diskontierungsfunktion : $SV = A / (1 + kD)$

SV bezeichnet den reduzierten subjektiven Wert, den die Belohnung A nach der Verzögerung D hat, beeinflusst vom individuellen Diskontierungsparameter k. Der Diskontierungsparameter fasst sämtliche psychologischen Motive zusammen, zukünftige Belohnungen zu entwerten.

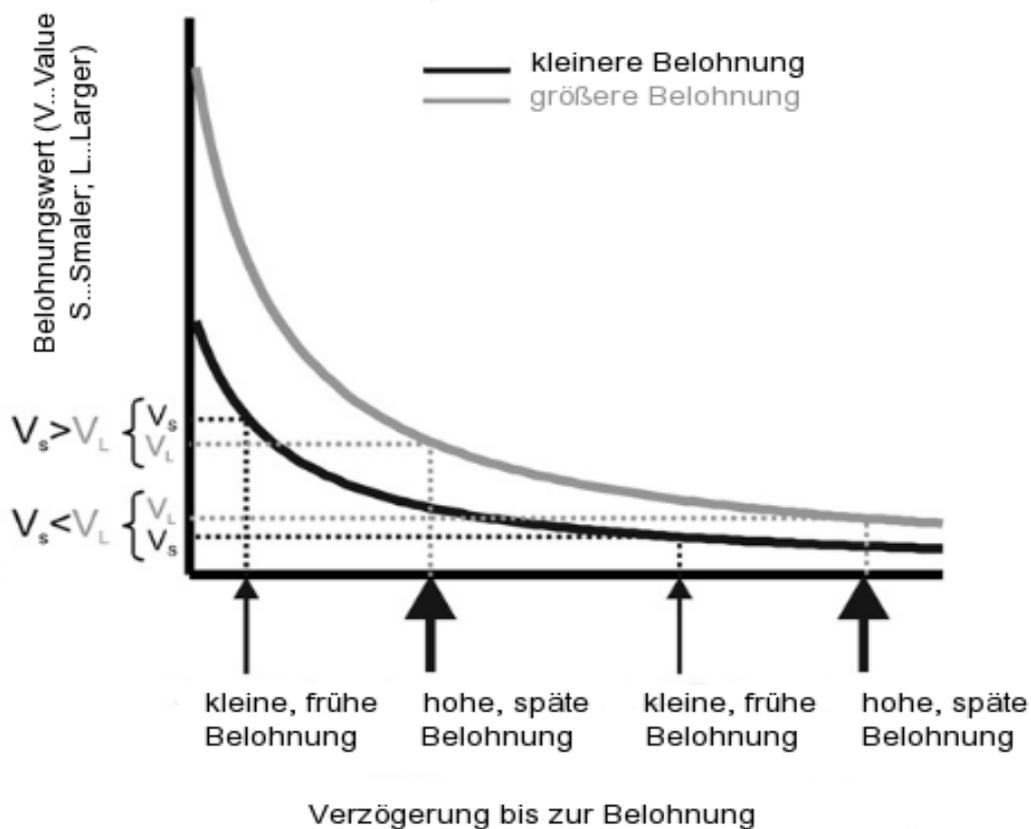


Abb. 1: Hyperbolische Diskontierungsfunktion. Die Rate des Wertabfalls ist nicht konstant für eine bestimmte Verzögerungsdauer, sondern wird immer schwächer (flacher), je weiter die Person zeitlich von der Belohnung entfernt ist. Muss sich eine Person zwischen zwei Belohnungen entscheiden und die frühe ist eine Woche, die späte 5 Wochen verzögert, so ist der Diskontierungsunterschied beider Belohnungen massiv und eine Person mag sich für die frühere Belohnung entscheiden (V_S). Addiert man zu beiden Verzögerungen 10 Wochen, bedeutet das, die frühere Verzögerung ist nun 11 Wochen, die spätere 15 Wochen verzögert. Nun ist der Diskontierungsunterschied viel geringer, was es möglich macht, dass nun die spätere Belohnung einen höheren Wert besitzt (V_L) und eine Präferenzumkehr stattfindet. V steht für subjektiven Wert der Belohnung, V_S für subjektiven Wert der objektiv kleineren Belohnung, V_L für subjektiven Wert der objektiv größeren Belohnung. Ist V_S größer als V_L , wird die kleinere, frühere Belohnung gewählt, ist hingegen V_L größer V_S , wird die höhere, spätere Belohnung gewählt (aus Kalenscher & Pennartz, 2008).

Auch wenn dieses Modell in Frage gestellt wurde (Subadditive Diskontierung, s.u.), ist es nach wie vor das am weitest verbreitete zur Erklärung von Zeitpräferenz. Hyperbolisches Diskontieren verletzt einige Annahmen der DUT, ist jedoch nicht unbedingt unvereinbar mit Rationalität, da rationales Verhalten als zukunftsorientiertes Verhalten definiert wird, als Verhalten, welches auf die Maximierung des zukünftigen

Erwartungswertes abzielt. Ändern sich die Verzögerungen von Belohnungsoptionen, so ändert sich auch der Erwartungswert und ein rationaler Entscheidungsträger wird jene Option wählen, deren Erwartungswert am höchsten ist, unabhängig davon, welche Option er davor präferiert hat (Kalenscher & Pennartz, 2008). Die Diskontierung verzögerter Belohnungen wurde unter zahlreichen Bedingungen und mit verschiedensten Belohnungen und Bestrafungen untersucht, wobei die folgenden Effekte allesamt der DUT widersprechen, die eine identische Diskontierung für alle Arten von Gütern und Kategorien postuliert.

2.2.1 Situationale Diskontierungsfaktoren

Die Stärke der Diskontierung hängt stark davon ab, was diskontiert wird. Beispielsweise wird die Attraktivität von Belohnungen stärker diskontiert als die Aversivität von Bestrafungen (*Vorzeicheneffekt*; (Thaler, 1981)). Eine Verstärkung erfährt der Vorzeicheneffekt, wenn Personen sich innerhalb kurzer Zeit einerseits zwischen Belohnungen und andererseits zwischen Bestrafungen entscheiden müssen (Frederick & Read, 2002).

Das Warten auf Bestrafungen kann einen aversiven Charakter haben, was dazu führt, dass unmittelbare Bestrafungen gegenüber verzögerten Bestrafungen (bei gleicher Bestrafungsintensität) sogar bevorzugt werden, und erst bei größeren Verzögerungen sinkt der aversive Charakter der Bestrafung (Benzion, Rapoport & Yagil, 1989).

Auch spielt es eine Rolle, wie eine Entscheidungssituation dargestellt wird. Gehen Personen davon aus, die Belohnung später zu bekommen, sind sie weniger bereit, für einen schnelleren Erhalt zu bezahlen, als wenn sie davon ausgehen, sie unmittelbar zu bekommen und nun gefragt werden, für welchen Betrag sie bereit wären zu warten (Loewenstein, 1988). Die Diskontierung ist also stärker, wenn Verzögerungen vermieden werden sollen, als wenn der Zeitpunkt der Belohnung beschleunigt werden soll. Der 'Besitz' führt zu einer überproportional hohen Bewertung der Belohnung, obwohl in beiden Fällen Unmittelbarkeit gegeben ist, die Ausgangslage ist nur eine andere. Im ersten Fall ist die Ausgangslage die spätere Belohnung, im zweiten die unmittelbare Belohnung. Somit wird die Ausgangslage zu einer Art Referenzpunkt, an dem die Diskontierung ausgerichtet wird, neben anderen Faktoren. Diese unterschiedliche Darstellung der Entscheidungssituation (Ausgangssituation) kann zu einem unterschiedlichen Verhalten führen, was als *Framing-Effect* (Kahneman & Tversky, 1979) bezeichnet wird.

Auch die Höhe der Belohnung wirkt sich auf die Stärke der Entwertung aus, wobei größere Belohnungen weniger stark entwertet werden als kleinere, in einer weniger steil verlaufenden Diskontierungs-Funktion dargestellt werden können (**Magnitude-Effect**; (Green, Fristoe & Myerson, 1994)). Eine Verstärkung erfährt der Magnitude-Effect, wenn die Person sich abwechselnd (bzw. in knapper zeitlicher Abfolge) zwischen größeren Belohnungen (z.B. € 1000 heute vs. € 1200 in 2 Wochen) und kleineren Belohnungen (z.B. € 10 heute vs. € 12 in 2 Wochen) entscheiden muss (Frederick & Read, 2002).

Bei Studien mit einem größeren **Zeithorizont** ist die Diskontierungsrate kleiner, wobei ab einem Zeithorizont von mehr als einem Jahr kein Unterschied mehr feststellbar ist (Frederick et al., 2002).

Read (2001) entdeckte, dass die Diskontierungsrate auch von der Partitionierung der Verzögerungsintervalle abhängt, bei einer feineren Partitionierung eine steilere Diskontierung stattfindet. Beispielsweise war die Diskontierung über ein 24-Monate-Intervall kleiner als über drei 8 Monate-Intervalle, trotz gleicher Gesamtlänge, was als **subadditive Diskontierung** bezeichnet wird und durch keine exponentielle oder hyperbolische Diskontierungsfunktion erklärt werden kann (Frederick et al., 2002). Etwas Ähnliches wurde auch bei subjektiver Wahrscheinlichkeitsschätzung von Ereignissen beobachtet, wobei hier möglicherweise auch andere psychologische Prozesse ins Spiel kommen. Die Wahrscheinlichkeit, einen tödlichen Unfall zu erleiden, wird geringer eingeschätzt, wenn nach der generellen Wahrscheinlichkeit gefragt wird, als wenn nach den Wahrscheinlichkeiten spezifischer Unfallgefahren gefragt wird (Tod durch Ertrinken, Tod durch einen Autounfall etc.; (Tversky & Koehler, 1994, nach Frederick et al., 2002)).

Wenn zwischen **Sequenzen von Belohnungen** gewählt werden muss, werden üblicherweise jene gewählt, bei denen die Belohnungshöhe steigend ist, gegenüber jenen, bei denen die Belohnungshöhe sinkend ist, auch wenn bei letzteren die Belohnungshöhen so gestaltet werden, dass sie größer sind als bei ersteren, was in einer negativen Zeitpräferenz resultiert (Frederick & Loewenstein, 2002). Beispielsweise wurde die Sequenz \$ 23.000, \$ 24.000, ..., \$ 27.000 gegenüber \$ 27.000, \$ 26.000, ..., \$ 23.000 bevorzugt (gleiche Gesamtsumme), obwohl den Personen gesagt wurde, dass bei angemessenem Sparen und Investition die letztere Sequenz wesentlich ertragreicher sei (Loewenstein & Sicherman, 1991, nach Frederick et al., 2002). Bei Bestrafungssequenzen werden eher jene gewählt, wo die Bestrafungshöhe sinkend ist, selbst wenn die Gesamtbefragungshöhe größer ist als in jener

Sequenz mit steigender Bestrafungshöhe (Varey & Kahnemann, 1992, nach Frederick et al., 2002).

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass Zeitdiskontierung gut durch eine hyperbolische Diskontierungsfunktion beschrieben werden kann, deren Steigung von der Qualität und Quantität der Belohnung/ Bestrafung bzw. situationalen Merkmalen, von der Impulsivität des Entscheidungsträgers sowie von anderen Faktoren abhängig ist, was im Widerspruch zu den Axiomen klassischer ökonomischer Theorien steht, welche kaum deskriptive Validität haben. Im Gegensatz zu Verhaltens-`Fehlern` widersprechen die Verhaltens-Abweichungen hier nicht der Einsicht der Personen. Somit ist es fragwürdig von Fehlern im Verhalten zu sprechen. Vielmehr handelt es sich um Abweichungen von normativen ökonomischen Modellen, die `ideales`, `rationales` Verhalten beschreiben (`ideal` aus Sicht der Ökonomie, ohne Berücksichtigung psychologischer Faktoren).

Zentral für hyperbolische Diskontierung ist die Gegenwartsverzerrung, die bewirkt, dass unmittelbare Belohnungen überproportional hoch bewertet werden, die Entwertungs-Rate bei kleineren Verzögerungen sehr hoch ist, dann aber immer mehr absinkt, je weiter die Belohnung in die Zukunft rückt.

3. Psychologie der Zeitdiskontierung (Impulsivität vs. Zukunftsplanung)

Zeitdiskontierung ist ein evolutionär gesehen alter Prozess (Hodges & Wolf, 1981), der bei allen Menschen und Tieren beobachtbar ist. Zahlreiche Autoren haben Zeitdiskontierung bzw. intertemporale Entscheidungsfindung als Konflikt zwischen einem aktuellen 'Selbst' und einem zukünftigen 'Selbst', zwischen aktuellen und zukünftigen Bedürfnissen konzeptualisiert (Fudenberg & Levine, 2006; Laibson, 1997; Thaler & Shefrin, 1981). So gebe es ein kurzsichtiges, auf momentane Bedürfnisbefriedigung ausgerichtetes 'Selbst' und ein weitsichtiges, zukunftsplanendes, vernünftiges 'Selbst'. Eine, in einer Entscheidungssituation gleichermaßen starke Aktivierung würde zu einem 'intrapersonalen dynamischen Konflikt' führen würden.

Anders ausgedrückt kann man auch von widerstreitenden Entscheidungsprozessen sprechen, einem phylogenetisch älteren, emotionalen ('heißen') Prozess mit kurzem Zeithorizont, der auf schnell verfügbare Belohnungen anspricht, und einem phylogenetisch jüngeren, rationalen ('kühlen') Prozess, der eine langfristige Gewinnmaximierung im Sinn hat. McClure, Laibson, Loewenstein und Cohen (2004) vertreten diesen Ansatz bei der Konzeptualisierung der Zeitdiskontierung, sprechen von einem BETA-System, welches v.a. unmittelbare Belohnungen hoch bewertet und einem DELTA-System, welches alle verfügbaren Belohnungen bewertet (s. Kapitel 4). Die relative Stärke beider Prozesse/Systeme kann erklären, warum aktuelle Bedürfnisse aufgeschoben werden oder umgekehrt aktuelle Belohnungen konsumiert werden, je nachdem welches System gerade dominant ist, was von Situationsvariablen, Stärke des Konfliktes zwischen momentaner Bedürfnisbefriedigung und Langzeit-Zielen und Persönlichkeitseigenschaften abhängt.

Bei Tieren scheint es nach bisherigem Erkenntnisstand lediglich das kurzsichtige, auf sofortige Belohnungs-Konsumation ausgerichtete System zu geben. Dementsprechend stark diskontieren sie verzögerte Belohnungen im Experiment (Ainslie, 1974; Green, Myerson & Holt, 2002; Tobin & Logue, 1994). Selbst die am weitest entwickelten Primaten zeigen keinen (nicht-instinktiven) Bedürfnisaufschub, der über wenige Minuten hinausgeht (Kagel, Battalio & Green, 1995; Rachlin, 1989). Verhaltensweisen wie das Anlegen von Essensvorräten erscheinen stereotyp und instinktiv und daher vermutlich nicht vergleichbar mit menschlicher Zukunftsplanung.

Beide Systeme haben ihre evolutionäre Bedeutung und führen zu einem situationsadäquaten, optimalen Entscheidungsverhalten, sofern sie sich in der richtigen Balance befinden. Das kurzfristige, emotionale System dient dazu, dass momentan aktivierte Bedürfnisse befriedigt werden. Die Aktivierung von Bedürfnissen folgt durch physiologische Mangelzustände und durch Hinweisreize, die die Möglichkeit zu einer ungestörten Bedürfnisbefriedigung versprechen (z.B. Essen). Starker Hunger z.B. erfordert es, dass die Entscheidungsfindung auf aktuell verfügbare Belohnungen ausgerichtet wird. Ein reduziertes Körper-Energie-Niveau (gemessen am Blut-Glukose-Spiegel) führte zu einer verstärkten Zeitdiskontierung von Geld (Wang & Dvorak, 2010). Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass in so einer Situation nicht nur Essen, sondern diverse Belohnungen, die verzögert sind, diskontiert werden. Van den Bergh, Dewitte und Warlop (2008) zeigten, dass die Betrachtung erotischer Hinweisreize zu einer stärkeren Zeitdiskontierung von Geld, Süßigkeiten und Limonade in einer Folgeaufgabe führte. Es scheint, als würde ein gemeinsames Belohnungsverarbeitungs-Netzwerk im Gehirn existieren, welches durch aktivierte Bedürfnisse aller Art angesprochen wird, den individuellen Zeithorizont massiv verkürzt und den Fokus auf die Gegenwart lenkt. Das weitsichtige, rationale System ist notwendig, um eine langfristige Optimierung des eigenen Verhaltens zu erzielen, beispielsweise Gefahren, die sich aus aktuellem Verhalten ergeben können, abzuwenden.

Beim Menschen ist kurzfristiges, zukünftige Konsequenzen missachtendes Verhalten assoziiert mit der Persönlichkeitseigenschaft **Impulsivität**. Impulsivität wird regelmäßig als 2-Faktormodell konzeptualisiert mit den Faktoren *Belohnungssensitivität* und *hastige, übereilte Impulsivität* (Dawe, Gullo & Loxton, 2004).

Eine erhöhte **Belohnungssensitivität** bedeutet eine starke Reaktivität auf Belohnungen bzw. auf Hinweisreize, die Belohnungen ankündigen (z.B. gemessen an der Aktivierung in 'Belohnungsarealen' beim Erhalt bzw. der Antizipation von Belohnungen), die dazu führt, dass das Verhalten auf sofortige Bedürfnisbefriedigung ausgerichtet wird. Pathologisch erhöht ist die Belohnungssensitivität bei diversen Suchterkrankungen (Dawe et al., 2004), wo es zu einer Entgleisung des mesolimbischen Dopaminsystems und Störung präfrontaler Kontrollmechanismen kommt (Hyman, 2005).

Es verwundert daher nicht, dass drogenabhängige Personen zukünftige Belohnungen stärker entwerten als Kontrollpersonen. Eine erhöhte Zeitdiskontierung wurde gefunden bei Opiat-Abhängigen (Kirby, Petry & Bickel, 1999), Kokain-Abhängigen, (Coffey, Gudleski, Saladin & Brady, 2003), Problem-Trinkern (Petry, 2001; Richards, Zhang, Mitchell

& deWit, 1999) und Rauchern (Baker, Johnson & Bickel, 2003; Bickel, Odum & Madden, 1999; Mitchell, 1999). Die Kausalität der beobachteten Phänomene ist nicht geklärt. Kontinuierlicher Drogenkonsum führt zu einer Entgleisung des Hirnstoffwechsels, die die 'Belohnungssensitivität' und damit Impulsivität erhöht (Hyman, 2005). Dafür, dass erhöhte 'Belohnungssensitivität' eine Prädisposition für Drogen-Konsum-Verhalten darstellt, liefern Bickel et al. (2007) Hinweise, wo Ratten, die eine stärkere Zeitdiskontierung zeigten, mit höherer Wahrscheinlichkeit sich selbst im Experiment Kokain verabreichten.

Eine stärkere Zeitdiskontierung wurde bei diversen psychischen Störungen gefunden, die mit Impulsivität assoziiert sind, wie z.B. Aufmerksamkeits-Defizit-Störung (Plichta et al., 2009), Spielsucht (Alessi & Petry, 2003; Petry & Casarella, 1999), Essstörungen, Antisozialer Persönlichkeitsstörung (Hinson, Jameson & Whitney, 2003; Petry, 2002).

Der zweite Faktor der Impulsivität *hastige, übereilte Impulsivität* (Dawe et al., 2004) beschreibt ein unüberlegtes, spontanes, emotionsgesteuertes Verhalten, als Folge von Beeinträchtigungen des präfrontalen Hirnstoffwechsels, wobei bei gesunden Personen nicht von Beeinträchtigung, sondern eher von Personen- oder situationsbedingter mangelnder Ausübung exekutiver Kontrolle zu sprechen ist. Dieser Faktor, mit neurophysiologischem Korrelat im lateralen Präfrontalkortex, der mit reduzierten Exekutivfunktionen (Handlungsplanung, -Steuerung, -Evaluation) assoziiert ist, steht ebenfalls in Beziehung zu Bedürfnisaufschub/ Zeitdiskontierung.

Es wurde gezeigt, dass eine experimentell manipulierte Belastung des Arbeitsgedächtnisses (mit neurophysiologischem Korrelat im dorsolateralen Präfrontalkortex - DLPFC) zu einer steileren Diskontierung führt (Hinson et al., 2003).

Weiters waren Impulsivitätsfragebögen (BIS 10-R - Skala 'nicht planende Impulsivität': Barratt, 1985) positiv korreliert mit der Stärke der Zeitdiskontierung (De Wit, Flory, Acheson, McCloskey & Manuck, 2007). Umgekehrt stehen gut funktionierende Exekutivfunktionen (zur Handlungsplanung, -Steuerung und -Evaluation) mit Bedürfnis-aufschiebendem, schwach diskontierendem Verhalten in Verbindung.

Auch Intelligenz ist negativ assoziiert mit Zeitdiskontierung, höhere Intelligenz fördert Bedürfnis-aufschiebendes Verhalten (De Witt et al., 2007). Schlussfolgerndes Denken ist wie das Arbeitsgedächtnis und die Exekutivfunktionen (kognitive Kontrolle u.a.) primär im lateralen Präfrontalkortex lokalisiert und ist damit in ein funktionelles Netzwerk eingebettet, welches eine kühle, rationale Entscheidungsfindung im Einklang mit Langzeit-Zielen unterstützt.

Bei Kindern ist die Zeitdiskontierung erhöht, der Präfrontalkortex befindet sich in der Entwicklung und Kontrollmechanismen für impulsives Verhalten sind noch nicht voll ausgebildet (Steinberg et al., 2009).

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass beide Aspekte der Impulsivität, sowohl erhöhte Belohnungssensitivität als auch beeinträchtigte oder reduzierte Exekutivfunktionen, dazu führen, dass zukünftige Belohnungen stärker entwertet werden.

4. Neuronale Grundlagen der Belohnungsverarbeitung und Zeitdiskontierung

Die neurowissenschaftliche Erforschung der Diskontierung verzögerter (monetärer) Belohnungen (*Zeitdiskontierung*) ist relativ jung, die Anfänge machten McClure et al. (2004a), und dementsprechend kontrovers sind bis heute die Ansätze, die sich damit auseinander setzen.

Im Folgenden wird eine kurze Einleitung in die neuronalen Grundlagen der Belohnungsverarbeitung und im Anschluss ein Überblick über die in Zeitdiskontierung und verwandte psychologische Prozesse involvierten Hirnareale gegeben.

Abbildung 4 zeigt verschiedene kortikale und subkortikale Areale, die in Zeitdiskontierung involviert sind. In allen in den folgenden Abschnitten besprochenen Zeitdiskontierungs-Experimenten wurden monetäre Belohnungen (Gewinn) oder Bestrafungen (Verlust) als Stimuli verwendet.

Das Streben nach Belohnung ist zentral für das Überleben und die Reproduktion aller Lebewesen. Belohnungen werden operational definiert als Stimuli, die Verhalten positiv verstärken, d.h. sie erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Verhalten gezeigt wird (Skinner, 1948).

Man kann unterscheiden zwischen *primären Verstärkern* wie Essen, Wasser, sexuellen Stimuli, die Verhalten verstärken, ohne, dass Lernen stattgefunden hat, und *sekundären Verstärkern*, die erst durch Konditionierungsprozesse Verstärkerqualität erhalten (McClure, York & Montague, 2004b). Hierfür kommt so gut wie jeder sensorische Stimulus in Frage, in neuroökonomischen Experimenten wird üblicherweise Geld als sekundärer Verstärker verwendet.

Kennzeichnend für die menschliche Belohnungsverarbeitung ist das antizipatorische Element, welches ermöglicht, nicht nur aktuell verfügbare, sondern auch zukünftige Belohnungen (und Bestrafungen) in der aktuellen Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Für diese Belohnungs-Antizipation ist der Präfrontalcortex zentral, der beim Menschen verglichen mit allen anderen Lebewesen am stärksten ausgeprägt ist.

Alle im folgenden besprochenen frontalen Areale sind daher nicht generell notwendig, um Belohnungen verarbeiten zu können, jedoch ermöglichen erst sie die Einbettung der Belohnungsinformation in eine zukunftsplanende Entscheidungsfindung.

Als belohnungsrelevante Areale im Gehirn werden v.a. der **Orbitofrontalkortex** (OFC), **Präfrontalkortex** (PFC), das **Ventrale Striatum/ Nucleus Accumbens** (VS/NAcc), die **Amygdala** und der **Anteriore Cinguläre Cortex** (ACC) genannt (McClure et al., 2004b).

Speziell bei der Verarbeitung (Konsum) von Belohnungen wurde eine erhöhte Aktivierung im OFC, Amygdala und VS/NAcc beobachtet, bei folgenden Belohnungsarten: Fruchtsaft, Wasser, appetitiven Gerüche, sexuellen Stimuli, Geld und positivem Feedback (sekundäre Verstärker), abstrakten Hinweisreizen als Prädiktoren für Belohnung (sekundäre Verstärker), sozialen Belohnungen (wie z.B. hübschen Gesichtern, sozialen Interaktionen, affekt-betonten Wörtern, angenehmen Berührungen) usw. (McClure et al., 2004b). Diese konsistente Aktivierung durch verschiedenste Belohnungen legt ein gemeinsames neuronales Netzwerk nahe, in dem verschiedenartige Belohnungen in Form einer gemeinsamen neuronalen Währung verarbeitet werden, ein einheitliches Wertsignal erzeugen.

4.1 Experimentelle Messung der Zeitdiskontierung

Neurowissenschaftliche Experimente zur Untersuchung der Zeitdiskontierung gaben Entscheidungssituationen vor, in denen Personen zwischen einer unmittelbaren, oder kürzer verzögerten, kleineren monetären Belohnung und einer stärker verzögerten, größeren monetären Belohnung wählen mussten. Üblicherweise wird eine Vielzahl von Entscheidungssituationen vorgegeben, in denen Höhe und Verzögerung der Belohnungen systematisch variiert werden, um so ein Profil des Diskontierungsverhaltens der Personen erstellen zu können. Während der Aufgabenbearbeitung wurde in diesen Studien die Veränderung des cerebralen Blutflusses (*BOLD-Signal-Change*) mittels *funktioneller Magnetresonanztomographie* (fMRT) gemessen, um so Rückschlüsse über aktivierte Hirnareale anstellen zu können, die sensibel auf bestimmte psychologische Prozesse während der Aufgabenbearbeitung reagieren. Die interessierenden Prozesse variieren teilweise zwischen den Experimenten, werden im Folgenden anhand der involvierten Hirnareale diskutiert.

4.2 Orbitofrontalcortex (OFC)

Der **Orbitofrontalcortex (Abb. 2)** erhält Informationen aus allen sensorischen Modalitäten (hoch verarbeitete visuelle, auditorische und sensomotorische Information, polysensorische Information aus dem superioren temporalen Cortex, Information aus Geschmacks- und olfaktorischen Arealen), ist jedoch nur schwach mit motorischen Arealen assoziiert, in erster Linie indirekt über starke Verbindungen mit dem NAcc. Darüber hinaus bestehen enge Verbindungen mit dem limbischen System, wie der Amygdala (emotionale Information), dem Hippocampus, mit dem autonomen Nervensystem, dem Hypothalamus (motivationale Information) und anderen Hirnstammstrukturen wie dem periaquäduktalen Grau (Wallis, 2007). Diese Verbindungen machen den OFC zu einem idealen Kandidaten für die Belohnungsverarbeitung, für die Integration diverser Informationen (Belohnungsqualitäten, Emotionen, motivationale Zustände usw.) zur Berechnung und Speicherung eines einheitli-

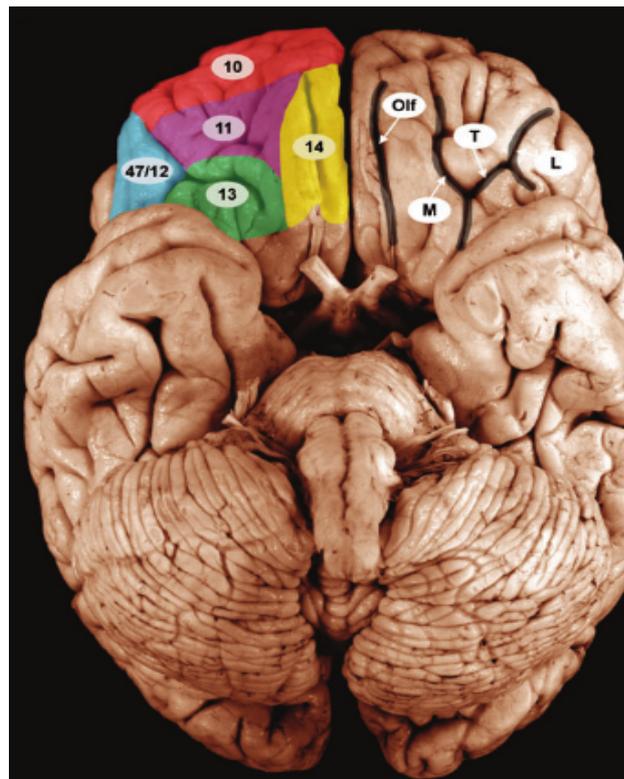


Abb. 2: Ventraler Blick auf den menschlichen OFC, illustriert die wichtigsten Regionen (Petrides & Pandya, 1994) und die Haupt-Sulci. Olf = olfaktorischer Sulcus, M = medialer orbitaler Sulcus, T = transversaler orbitaler Sulcus, L = lateraler orbitaler Sulcus. BA47/12 = lateraler OFC, BA14 = medialer OFC (aus Wallis, 2007).

chen subjektiven Wertes verschiedenster Belohnungsarten. Beispielsweise ist das Wert-Signal im OFC stark abhängig von der aktuellen Bedürfnislage, nimmt etwa bei Sättigung ab, signalisiert somit den relativen Wert, den eine aktuelle Belohnung hat (Wallis, 2007).

Darüber hinaus berücksichtigt der OFC auch die mit einer Entscheidung verbundenen Kosten. In einem Affen-Experiment zeigte sich, dass OFC-Neurone schwächer feuern, wenn der Affe die Belohnungen nach einer zeitlichen Verzögerung (Zeitdiskontierung) antizipierte (Roesch & Olson, 2005). Unerwartete Belohnungen in Human-Studien führten zu einer erhöhten Aktivierung des medialen OFC, verglichen mit erwarteten Belohnungen (Berns, McClure, Pagnoni & Montague, 2001). OFC-Schädigungen beim Menschen führen zu suboptimalen Entscheidungen im Sinne der Zukunftsplanung, da ein integriertes Urteil über den Wert einer Entscheidung nicht mehr möglich ist (Damasio, 1994).

Für Anstrengungs-Diskontierung (Hindernis, über das die Ratte klettern musste, um zur höheren Belohnung zu gelangen) zeigte sich bei Ratten eine erhöhte Aktivierung im MPFC, nicht jedoch im OFC (Rudebeck, Walton, Smyth, Bannerman & Rushworth, 2006).

Kennerley, Lara und Wallis (2005) zeigten, dass in komplexen Entscheidungssituationen, wo Belohnungshöhe, Belohnungswahrscheinlichkeit und Anstrengung zur Zielerreichung integriert werden müssen, um das eigene Verhalten zu steuern, der Affen-MPFC am stärksten aktiviert war.

Wallis (2007) schließt daraus, dass der **MPFC** ein geeigneterer Kandidat zur Berechnung eines abstrakten Belohnungswertes im Kontext der Entscheidungsfindung sei, da er die Belohnungshöhe mit Variablen des Entscheidungskontextes (erforderliche Anstrengung, Belohnungswahrscheinlichkeit usw.) verbinde, um Entscheidungen zu treffen, Verhalten zu steuern. Enge Verbindungen zu cingulären motorischen Arealen würden den MPFC für diese Rolle prädestinieren. Den neuronalen Kreislauf beschreibt Wallis (2007) folgendermaßen: der **OFC** generiere ein Wertsignal (antizipierte Konsequenzen einer Handlung, Handlungsziele [z.B. Belohnung]), welches den **LPFC** reize, um Handlungspläne zur Erreichung des Zieles zu generieren; die Signale aus dem OFC und LPFC würden im **MPFC** zusammenlaufen, welcher den Gesamt-Wert einer Handlung berechnen würde (s. Abb. 3). Negative Handlungsergebnisse (Bestrafungen) führten zu erhöhter lateraler OFC-Aktivierung, positive (Belohnungen) zu erhöhter medialer OFC-Aktivierung (Anderson et al., 2003; Kringelbach, 2005; O'Doherty, Kringelbach, Rolls, Hornak & Andrews, 2001).

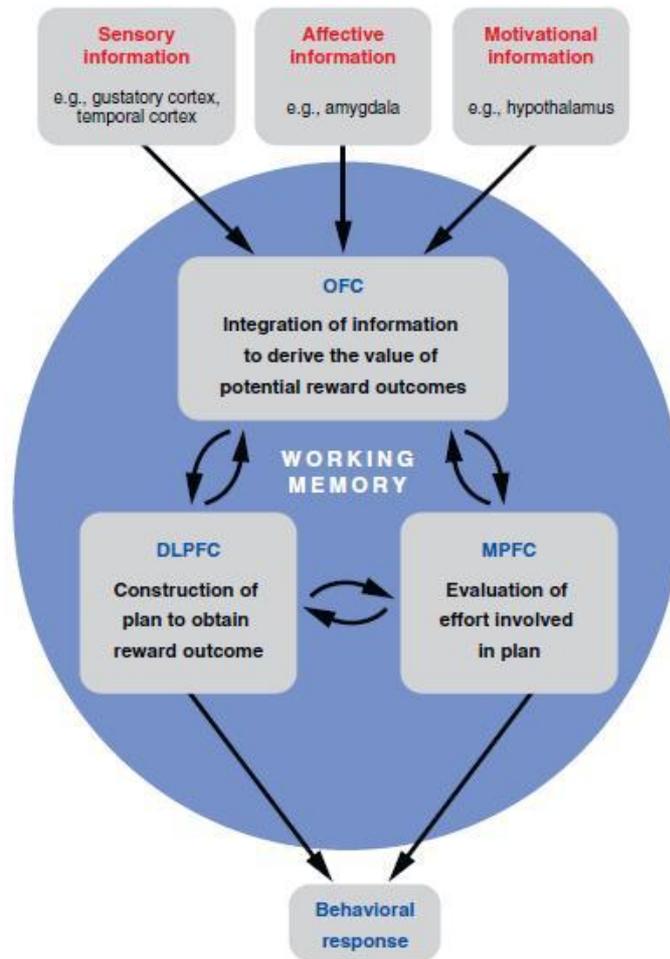


Abb. 3: Modell neuronaler Mechanismen, die der Entscheidungsfindung im PFC zugrunde liegen (aus Wallis, 2007).

Die enge Verbindung des OFC mit dem NAcc habe vermutlich die Funktion, letzteren zu hemmen, wenn eine impulsive, belohnungsorientierte Reaktion im Widerspruch zu höheren Langzeit-Zielen steht. Bei Suchtverhalten ist die Top-Down-Kontrollfunktion des lateralen OFC reduziert und die Belohnungssensitivität des NAcc erhöht, was ein Verhalten bewirkt, das auf unmittelbare Bedürfnisbefriedigung, ungeachtet zukünftiger Konsequenzen, ausgerichtet ist (Dawe et al., 2004).

4.3 MPFC, VS/NAcc, PCC

Wie in Abschnitt 4.1 besprochen, laufen im MPFC zahlreiche belohnungsrelevante Informationen zusammen, werden integriert zur Gesamtbewertung einer Belohnung. Im Fol-

genden sollen Befunde zu dessen Rolle in der Zeitdiskontierung dargestellt werden, in Situationen, wo zeitlich verzögerte Belohnungen antizipiert und bewertet werden müssen. Da MPFC, VS/NAcc und PCC in den folgenden Studien weitgehend konsistent gemeinsam aktiviert waren (vermutlich in ein funktionelles Netzwerk eingebettet sind), werden diese Areale gemeinsam besprochen.

MPFC, VS/NAcc und PCC waren stärker aktiviert in Entscheidungssituationen, wo eine unmittelbare Belohnung und eine verzögerte Belohnung verfügbar waren, verglichen mit Entscheidungssituationen, wo eine Wahl zwischen zwei verzögerten Belohnungen zu treffen war (McClure et al., 2004a; erste neurowissenschaftliche Studie die sich mit Zeitdiskontierung auseinandersetzte). Die Autoren schlossen daraus, dass der MPFC, VS/NAcc und PCC zu einem neuronalen System (BETA-Areale; mesolimbisches Dopamin-System) gehören, welches ein Streben nach unmittelbarer Bedürfnisbefriedigung, nach unmittelbarer Belohnung repräsentieren würde und dementsprechend bei unmittelbaren Belohnungen am stärksten aktiviert sei. Xu, Liang, Wang, Li und Jiang (2009) zeigten ebenfalls eine erhöhte MPFC-, VS/NAcc- und PCC-Aktivierung in Durchgängen, wo eine unmittelbare Belohnung und eine erhöhte MPFC-, PCC-, ACC- und Insula-Aktivierung in Durchgängen, wo eine unmittelbare Bestrafung verfügbar war, wobei die Aktivierung höher war, wenn zwischen zwei Bestrafungen zu wählen war.

Kable und Glimcher (2007) zeigten, dass die MPFC-, VS/NAcc- und PCC-Aktivität nicht nur sensibel für unmittelbare Belohnungen ist, sondern auch den subjektiven Wert der verzögerten Belohnung kodiert (der subjektive Wert ergibt sich aus Belohnungshöhe- und Verzögerung und aus dem individuellen Diskontierungsparameter – S. Kapitel 2, S14).

Der MPFC alleine zeigte eine reduzierte Aktivierung bei langen Belohnungs-Verzögerungen. Da die unmittelbare Belohnung bei Kable und Glimcher (2007) konstant gehalten wurde, lässt sich nicht sagen, ob die Summe des Wertes beider Belohnungen, die Differenz, die höhere, verzögerte Belohnung oder der subjektive Wert der gewählten Belohnung von MPFC, VS/NAcc und PCC kodiert wird.

Pine et al. (2009) untersuchten ebenfalls die neuronale Repräsentation des subjektiven Wertes verzögerter monetärer Belohnungen, wobei hier auch die Abnahme des marginalen Nutzens² bei zunehmender Belohnungshöhe berücksichtigt wurde, Nutzen als eigener Regressor (anstelle von Belohnungshöhe) in die Analyse einfluss. Verglichen mit dem einfa-

² Der marginale Nutzen entspricht dem Zuwachs an Nutzen, wenn eine weitere Einheit eines Gutes konsumiert wird, und sinkt mit zunehmenden Einheiten, die hinzugefügt werden.

chen hyperbolischen Modell wie bei Kable und Glimcher (2007) und Ballard und Knutson (2009) entspricht der Nutzen der Belohnungshöhe, der Diskontierungsparameter der Belohnungsverzögerung und der diskontierte Nutzen dem subjektiven Wert (SV). Für den diskontierten Nutzen (der dem SV im klassischen Modell entspricht) zeigten sich signifikante Effekte im **dorsalen Striatum**. Im Unterschied zu anderen Diskontierungsstudien war hier immer die Wahl zwischen zwei verzögerten Belohnungen zu treffen.

Peters und Büchel (2009) analysierten die neuronale Kodierung des subjektiven Wertes in der Zeit- und Wahrscheinlichkeitsdiskontierung im Vergleich, und fanden sowohl übereinstimmende als auch Domänen-spezifische neuronale Systeme. Linkes ventrales Striatum und rechter zentraler OFC (sowie eine Subregion des VMPFC) kodierten den subjektiven Wert verzögerter Belohnungen und den subjektiven Wert probabilistischer Belohnungen gleichermaßen. MPFC, PCC und lateraler parietaler Cortex korrelierten stärker mit dem SV verzögerter Belohnungen, rechte superiore/inferiore parietale Areale sowie linker mittlerer okzipitaler Gyrus korrelierten stärker mit dem SV probabilistischer Belohnung.

Kable und Glimcher (2007), Pine et al. (2009) und Peters und Büchel (2009) verfolgten einen **Single-Valuation-Ansatz** (Figner et al., 2010), da hier ein neuronales System gesucht wird, das verschiedenste Belohnungsmerkmale verbindet, um zu einer Bewertung der Belohnung zu kommen, dessen Signal den subjektiven Wert einer Belohnung wieder spiegelt, wobei damit nicht verneint wird, dass es verschiedene Systeme gibt, die die einzelnen Belohnungsmerkmale und spezifische Belohnungsqualitäten singular repräsentieren können. Verschiedene Systeme mögen unterschiedliche Belohnungsqualitäten verarbeiten, jedoch wird ein neuronales System vermutet, dass diese Qualitäten normalisiert, in eine gemeinsame neuronale Währung transformiert. Im alltäglichen Leben ist es ständig notwendig, Entscheidungen zwischen Optionen unterschiedlichster Qualität zu treffen, und um das zu erleichtern, wird vermutet, dass diese auf neuronaler Ebene in eine einheitliche Währung transformiert und somit vergleichbar werden.

Bei Ballard und Knutson (2009) reagierten exakt jene von McClure et al. (2004a) als BETA-Areale bezeichneten Hirnstrukturen (MPFC, VS/NAcc, PCC) auf die Höhe der verzögerten Belohnung. Nur bei hoch-impulsiven (stark diskontierenden) Personen reagierte der MPFC und PCC auch auf die Belohnungs-Verzögerung mit einer stärkeren Deaktivierung bei hohen Verzögerungen. Der NAcc hoch-impulsiver Personen zeigte eine geringere Sensitivität für Belohnungshöhe.

Die obigen Befunde sprechen dafür, dass der **MPFC** den subjektiven Wert unmittelbarer und verzögerter monetärer Belohnungen repräsentiert. Das Wert-Signal des MPFC ergibt sich aus der in Abhängigkeit von der zeitlichen Verzögerung diskontierten Belohnungshöhe (bzw. dem subjektiven Nutzen der sich aus dieser ergibt (Pine et al., 2009)).

Aus den obigen Studien geht jedoch nicht hervor, ob der MPFC den Wert der höheren, verzögerten Belohnung, die Summe oder Differenz aller verfügbaren Belohnungen, oder die Belohnung mit dem höheren subjektiven Wert kodiert. Marco-Pallarés, Mohammadi, Samii und Münte (2010) liefern dazu Befunde. VS/NAcc, VMPFC, Insula und Amygdala waren hier mit der Differenz des Wertes beider Optionen assoziiert, nicht mit der Summe, unabhängig davon, ob der Wert der unmittelbaren oder der Wert der späteren Belohnung höher war. FitzGerald, Seymour und Dolan (2009) lieferten ebenfalls Befunde dafür, dass das MOFC- (auch als subgenualer cingulärer Cortex bezeichnet) und PCC-Signal die Differenz im Wert zweier Entscheidungsoptionen wieder spiegelt. Hier wurden die Teilnehmer aufgefordert, zwischen Geldbeträgen und Objekt-Bündeln (kombinierte Konsumgüter) zu wählen, also ebenfalls zwischen Belohnungen, die nicht direkt vergleichbar sind, die unterschiedliche Qualitäten aufweisen.

Entgegengesetzte Befunde liefern Blair et al. (2006), die allerdings im Kontext der unterschiedlichen Entscheidungsaufgabe zu sehen sind. Personen mussten immer zwischen zwei Bildern wählen, denen ein bestimmter Wert zugeordnet ist. Nach der Wahl bekamen sie Feedback, ob sie etwas gewonnen oder verloren hatten. Der **VMPFC** war am höchsten korreliert mit der Summe beider Optionen. Der möglicherweise zentrale Unterschied zu Diskontierungsaufgaben ist, dass hier objektive Werte von Entscheidungsoptionen vorliegen (die sich nicht qualitativ unterscheiden), die nicht vom Individuum berechnet, sondern eher im Sinne einer konditionierten Reaktion auf ein Bild abgerufen werden müssen. Um sich für die eine Option zu entscheiden, ist es nicht notwendig, die andere zu entwerten, da der Wert objektiv gegeben ist, beide Optionen sich nur quantitativ unterscheiden. Möglicherweise bestehen auch Unterschiede in den gefundenen Arealen. FitzGerald et al. (2009) zeigten eine Aktivierung im subgenualen cingulären Cortex, der an der Innen-Seite des ventralen Frontalcortex liegt, Blair et al. (2006) eine Aktivierung im MOFC, der an der Unterseite des Frontalcortex liegt. MOFC und VMPFC liegen jedoch nahe beieinander und werden oft als identisch behandelt (Abb. 4).

Die Rolle des **VS/NAcc** (und Beziehung zum PFC/OFC) im Kontext der Zeitdiskontierung ist hingegen weniger genau erforscht. Zwar scheinen diese Kernstrukturen eng mit

der Berechnung des subjektiven Wertes zusammen zu hängen, welche Funktion hier genau zum Tragen kommt, ist jedoch unbekannt. Möglicherweise bedeutet die höhere Aktivierung bei höherem subjektiven Wert die Signalisierung eines höheren Anreizwertes der verfügbaren Optionen. Das VS/NAcc ist aktiv, wenn Veränderungen in der Umwelt passieren, die einen veränderten Anreiz darstellen (z.B. unerwartet hoher Gewinn – Erwartungsverletzung/*reward prediction error*) und hat damit vermutlich die Funktion, Verhalten zu steuern (McClure, Berns & Montague, 2003). Bei der Zeitdiskontierung werden zwar nicht unbedingt Erwartungen verletzt, jedoch ändert sich der Anreiz von Belohnungen in der Umgebung von Durchgang zu Durchgang, somit muss ein Signal angepasst werden, welches die Relevanz der folgenden Entscheidung signalisiert (Hare, O’Doherty, Camerer, Schultz & Rangel, 2008). Welche Hinweisreize erhöhten Anreiz aufweisen, hängt vermutlich von der Impulsivität der Person ab (s.u.).

4.4 DLPFC, VLPFC, LOFC

Rechter dorsolateraler PFC, rechter ventrolateraler PFC, rechter lateraler OFC zeigten sich in allen Entscheidungssituationen gleichermaßen aktiv, unabhängig davon, ob eine unmittelbare Belohnung verfügbar war oder nicht, reagierten jedoch sensibel auf die Aufgabenschwierigkeit (unterschiedlicher Wert beider Entscheidungs-Optionen; (McClure et al., 2004a; Xu et al., 2009)). Bei Wahl der verzögerten Belohnung, also beim Aufschub der Belohnung, waren diese lateralen frontalen Areale stärker aktiviert als MPFC, VS/NAcc und PCC, bei Wahl der unmittelbaren Belohnung hingegen zeigte sich kein Unterschied. McClure et al. (2004a) bezeichneten diese mit Bedürfnisaufschub assoziierten Areale als **DELTA-Areale** (DLPFC, LOFC, PPC), jene Areale, die stärker bei Verfügbarkeit einer unmittelbaren Belohnung aktiviert waren, als **BETA-Areale** (MPFC, VS/NAcc, PCC).

Nach McClure et al. (2004) findet die Entscheidung aufgrund der Belohnungs-Evaluierung durch zwei widerstreitende Prozesse statt, die beide zusammen zu einer quasi-hyperbolischen Diskontierung führen. Diese Konzeptualisierung der Zeitdiskontierung wird daher als **Dual-Valuation-Ansatz** bezeichnet (Figner et al., 2010).

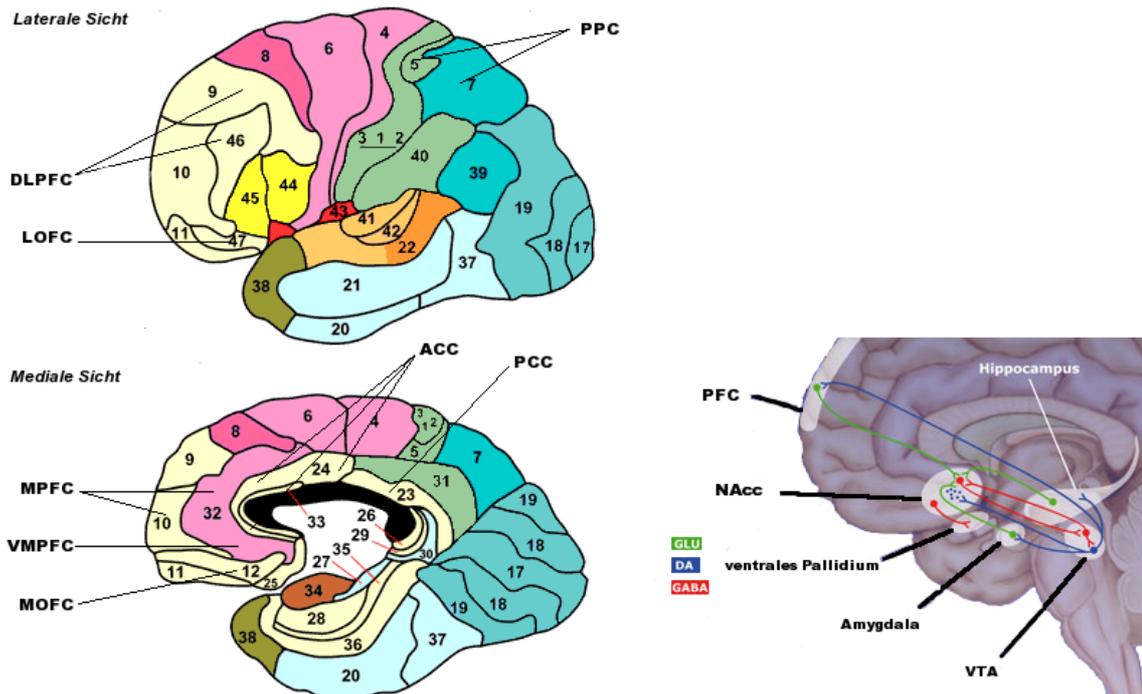


Abb. 4: In Zeitdiskontierung involvierte kortikale (links) und subkortikale Areale (rechts): DLPFC – kognitive Kontrolle/ Schlussfolgerndes Denken/ Zukunftsplanung; ACC – Konflikt-Monitoring u.a.; VMPFC/MOFC, PCC, VS/Nacc, VTA sensitiv für subjektiven Wert. **β -Areale** (McClure et al., 2004a): MOFC, MPFC, PCC, VS/Nacc, VTA, Hippocampus, **δ -Areale**: (D)LPFC, LOFC (Quelle - linke Grafik: <http://spot.colorado.edu/~dubin/talks/brodmann/brodmann.html> ; Quelle - rechte Grafik: Ferrer, Moral & Bozzo (2007)).

Ein „ungeduldiger“ BETA-Prozess würde unmittelbare Belohnungen hoch bewerten, ein „vernünftiger“ DELTA-Prozess würde Belohnungen unabhängig vom Unmittelbarkeits- aspekt beurteilen, und daher tendenziell rationale Entscheidungen bevorzugen. Die Wahl sei abhängig von der relativen Stärke beider Prozesse. Ein starker BETA-Prozess (bei Konfrontation mit einer unmittelbaren Belohnung, etwa Drogen-Hinweisreizen), bei gleichzeitig reduzierter DELTA-Aktivität, führe zu einer impulsiven Entscheidung. Sind in einer Entscheidungsoption nur verzögerte Optionen verfügbar, würde kaum BETA-Aktivität stattfinden, und tendenziell eher die spätere höhere Belohnung favorisiert werden (McClure et al., 2004).

Ballard und Knutson (2009) zeigten, dass linker DLPFC, TPJ (tempo-parietal junction) und rechter PPC eine stärkere Deaktivierung bei langen Belohnungs-Verzögerungen aufweisen. Bei hoch-impulsiven (stark diskontierenden) Personen war dieser Effekt stärker ausgeprägt. Die Aktivität in lateralen frontalen Arealen wird im Sinne von Selbstkontrolle/kognitiver Hemmung interpretiert. Bei Zukunftsplanung (Evaluation der

verzögerten Belohnung) schalte sich der DLPFC ein, um Kontrolle im Sinne rationaler Entscheidungen zu implementieren. Bei hohen Verzögerungen würden die Kontrollressourcen des DLPFC überlastet, was sich in einer zunehmenden Deaktivierung äußere. Reduzierte Kontrollressourcen (z.B. durch Müdigkeit, Belastung der Ressourcen durch andere Anforderungen) führen zu vermehrt impulsivem Verhalten, zur Wahl unmittelbar verfügbarer Belohnungen. Bei hoch-impulsiven Personen sind die Kontrollressourcen generell reduziert, wobei der zweite Faktor der Impulsivität, eine erhöhte Belohnungssensitivität (Dawe et al., 2004), ebenfalls einen Einfluss auf die Zeitdiskontierung hat.

Bestätigung für diese *Selbstkontroll-Ansatz* findet sich bei Figner et al. (2010). Eine experimentelle De-Aktivierung des linken DLPFC mittels repetitiver transkranieller Magnetstimulation (rTMS) bewirkte einen signifikanten Anstieg der Wahl der unmittelbaren Belohnung, hatte jedoch keinen Einfluss auf die Bewertung der Belohnungen, und bewirkte auch keinen Anstieg der Wahl der früheren Belohnung in Durchgängen, wo die Wahl zwischen zwei verzögerten Belohnungen zu treffen war. In der Kontrollbedingung ohne rTMS wurde häufiger beobachtet, dass Personen die verzögerte Belohnung in der Entscheidungsaufgabe wählten, obwohl sie die unmittelbare in der Bewertungsaufgabe höher bewerteten. Diese Befunde sprechen dafür, dass der DLPFC nicht in die Bewertung der Belohnungen involviert ist, sondern in die Hemmung einer impulsiven Reaktion die nach unmittelbarer Belohnung strebt.

Indirekt den Selbstkontroll-Ansatz unterstützende Befunde liefern Luo, Ainslie, Giragossian und Monterosso (2009) die in einer Zeitdiskontierungs-Aufgabe unmittelbare und verzögerte Belohnungen nach ihrem subjektiven Wert paarten, somit Belohnungspaare ermittelten gegenüber denen die Versuchsteilnehmer indifferent waren. Anschließend waren diese Belohnungen im Rahmen einer Reaktionszeitaufgabe einzeln zu gewinnen, und die neuronale Reaktion auf Durchgänge wo eine unmittelbare Belohnungen zu gewinnen war fiel in Putamen, Thalamus und Mittelhirn stärker aus als auf, im subjektiven Wert korrespondierende, verzögerte Belohnungen. Die involvierten Regionen wurden von den Autoren eher der Kodierung des subjektiven Werts, als der Kodierung spezifischer Merkmale wie Belohnungshöhe oder – Verzögerung zugeschrieben, und die Schlussfolgerung der Autoren war, dass in der Entscheidungssituation Selbst-Kontrolle ausgeübt wird, die die Wahl der späteren Belohnung begünstigt, obwohl die frühere höher bewertet wird.

McClure et al. (2004a) gingen noch von einem Dual-Evaluation-Modell aus, wo BETA-Areale sensibel auf unmittelbare Belohnungen und DELTA-Areale sensibel auf alle Beloh-

nungen (unabhängig vom Aspekt der Unmittelbarkeit) reagieren würden. Letztere würden die Vernunft repräsentieren Bedürfnisse aufzuschieben, um später einen höheren Gewinn zu erzielen.

Nach Figner et al. (2010) kann der DLPFC durchaus diese 'Vernunft' repräsentieren, lediglich die Bewertung der Belohnungen sei andernorts anzusiedeln. Kein Widerspruch ergibt sich zur Schlussfolgerung von McClure et al. (2004a), dass laterale frontale Areale die verzögerte Belohnung stärker gewichten würden. Sie würden dies lediglich nicht in der Bewertung tun sondern dann, wenn eine Entscheidung zu treffen sei, und Vernunft zum Tragen kommen könne.

4.5 DLPFC und VMPFC – funktionelle Verbindungen

Nach Hare, Camerer und Rangel (2009) schaltet sich der DLPFC ein, sobald höhere, abstrakte Ziele von der Entscheidung betroffen sind. Es wurden DiätetikerInnen aufgefordert zunächst verschiedene Lebensmittel/ Speisen auf den Skalen 'gesund' und 'wohlschmeckend' zu bewerten. Anschließend wurden sie vor Wahlen gestellt zwischen einem von der jeweiligen Person als neutral bewerteten und einem anderen Lebensmittel zu wählen, und die korrespondierende Hirnaktivität wurde mittels fMRT dargestellt. Personen wurden je nach Entscheidungsverhalten der Selbstkontroll- (Wahl gesunder Lebensmittel) und Nicht-Selbstkontroll-Gruppe (Wahl wohlschmeckender, ungesunder Lebensmittel) zugewiesen. VMPFC-Aktivität (als Signal eines integrierten Werturteiles) in der Selbstkontroll-Gruppe war korreliert mit Geschmack- und Gesundheits-Bewertung, VMPFC-Aktivität in der Nicht-Selbstkontroll-Gruppe war nur mit der Geschmacks-Bewertung korreliert. DLPFC-Aktivität war generell erhöht in Durchgängen, bei denen erfolgreich Selbstkontrolle implementiert wurde (Verweigerung von wohlschmeckenden, ungesunden Lebensmitteln), und das in signifikant höherem Maße in der Selbstkontrollgruppe. Die Höhe der DLPFC-Aktivität in der Selbstkontroll-Gruppe war negativ korreliert mit der Aktivität im VMPFC. Die funktionelle Verbindung ist folgende: der DLPFC moduliert die Aktivität (negativer Zusammenhang) im inferioren frontalen Gyrus (BA46), und dieser moduliert die Aktivität im VMPFC (positiver Zusammenhang). Implementierte Selbstkontrolle bewirkt demnach eine Veränderung des Bewertungsprozesses. Belohnungen die Langzeitzielen (Gesundheit) entgegenstehen verlieren an Wert, erkennbar am reduzierten Wert-Si-

gnal im VMPFC. Ob Selbstkontrolle erfolgreich ausgeübt werden könne, hänge von der Fähigkeit des DLPFC ab den VMPFC zu modulieren.

Hare et al. (2009) postulieren mit Bezug auf Kable und Glimcher (2007), dass generell das Bewertungs-Signal in der Zeitdiskontierung vom VMPFC stamme, dass der DLPFC nicht in die Evaluation von Entscheidungsoptionen involviert sei (auch nicht in 'vernünftige', zukunftsbezogene), diese jedoch durch Modulation des VMPFC beeinflusse.

Der VMPFC zeigte in mehreren Experimenten eine Reaktivität auf höhere Ziele, integrierte diese in den Bewertungsprozess. Beispielsweise zeigten niedrig-impulsive Personen (häufige Wahl der verzögerten Belohnung) erhöhte VMPFC-, PCC- und VS-Sensitivität für die Höhe der verzögerten Belohnung (Ballard & Knutson, 2009). Das höhere Ziel mag hier darin bestehen, den zukünftigen Gewinn zu optimieren. Bei Hare et al. (2009) zeigen Personen (DiätikerInnen) der Selbstkontroll-Gruppe erhöhte VMPFC-Reaktivität auf den Gesundheitsaspekt von Nahrungsmitteln (hier besteht das höhere Ziel darin, sich gesund zu ernähren). Da höhere Ziele (im Sinne einer optimalen Zukunftsplanung) generell mit dem DLPFC assoziiert werden, scheint es nahe liegend, dass dieser involviert ist in den Bewertungsprozess des VMPFC. Kommt es zu einem Konflikt zwischen Belohnungsattributen, z.B. niederes Ziel: 'wohlschmeckend' - erhöht Zielwert, höheres Ziel: 'ungesund' - reduziert Zielwert, dann schaltet sich der **DLPFC** ein um im Sinne der höheren Ziele, den Wert der Option zu reduzieren. Das Attribut 'ungesund' wird im Entscheidungsprozess tragend (da es einen negativen Wert hat, als *Bestrafung* zu bezeichnen), die Option wird entwertet und eine Deaktivierung im VMPFC ist zu verzeichnen.

Möglicherweise bestimmt der DLPFC welche Attribute in den Bewertungsprozess einfließen, kann somit bewirken, dass z.B. höhere Attribute (wie Gesundheit) mit-evaluiert werden, in die Gesamtbewertung integriert werden. Meistens sind höhere Ziele mit einem Zustand in der Zukunft verknüpft, es handelt sich in solchen Fällen also um Zukunftsplanung. In diesem Sinne ist es auch nicht verwunderlich, dass der DLPFC zu jenen Arealen gehört, die im Kontext der Zeitdiskontierung am stärksten aktiv sind.

Aus dem Bewertungssignal des MOFC /VMPFC eine Entscheidung abzuleiten, ist problematisch, da gerade aversive Entscheidungen den momentanen Bedürfnissen zuwider laufen, jedoch im Sinne von Langzeit-Zielen getroffen werden müssen, mit einer Deaktivierung im MOFC/VMPFC und mit einer Aktivierung im DLPFC einhergehen. Möglicherweise reagiert das Wertsignal besonders stark auf unmittelbare Belohnungen, auf Beloh-

nungen (bzw. Belohnungsattribute) die eine schnelle Bedürfnisbefriedigung versprechen. Wird eine Entscheidung aufgrund anderer Attribute getroffen, würde es nicht verwundern, dass das gefundene Wertsignal entsprechend kleiner ist, insbesondere wenn die Entscheidung den Verzicht auf eine Belohnung im Interesse abstrakter, höherer Ziele beinhaltet.

4.6 Individuelle Unterschiede in der Zeitdiskontierung - Impulsivität

Ein in der Literatur häufig genannter Aspekt der Persönlichkeitseigenschaft Impulsivität ist eine erhöhte Belohnungssensitivität, die einen hohen Anreizwert unmittelbarer, schnell verfügbarer Belohnungen bewirkt (Dawe et al., 2004). Um die neuronalen Grundlagen einer erhöhten Belohnungssensitivität zu untersuchen, sind Zeitdiskontierungs-Aufgaben höchst geeignet, da hier Personen mit Entscheidungssituationen konfrontiert sind, in denen sie die Wahl haben zwischen schnell verfügbaren kleineren und verzögerten höheren Belohnungen.

Bei Ballard und Knutson (2009) reagierte der **NAcc** bei hoch-impulsiven Personen weniger stark auf die Höhe der variierten verzögerten Belohnung, die Aktivität in Belohnungshöhe-kodierenden Arealen wie MPFC und PCC reagierte bei hoch-impulsiven Personen sensibel auf hohe Verzögerungen und die Deaktivierung des DLPFC bei hohen Verzögerungen fiel größer aus, was für reduzierte Selbstkontroll-Kapazitäten spricht. Das wiederum bewirkt eine reduzierte Antizipationsleistung zukünftiger Ereignisse (Belohnungen), einen kürzeren Zeithorizont, wodurch der Fokus auf unmittelbare Belohnungen fällt, diese im Bewertungsprozess zum tragen kommen, und die MPFC-, NAcc-Sensitivität auf die Höhe der verzögerte Belohnung reduziert ist.

Interessante Befunde liefern Hariri et al. (2006). Hier wurde die Diskontierung verzögerter Belohnungen offline in einer Verhaltensstudie gemessen, korreliert mit der neuronalen Reaktivität auf 'reward prediction errors' im Kontext einer fMRT-Studie. In einem Verhaltensexperiment wurde zunächst die Stärke der individuellen Zeitdiskontierung erhoben. Im anschließenden fMRT-Experiment wurde die Hirnaktivität in Reaktion auf unerwartet positives und negatives Feedback (positiver und negativer 'reward prediction error') aufgezeichnet. Die Stärke der Zeit-Diskontierung wurde in Beziehung gesetzt zur Reaktivität des ventralen Striatums (VS) auf das Feedback (Belohnung vs. Bestrafung). Letztere spiegelt wieder, wie stark die neuronale Reaktion einer Person auf unerwartete Belohnun-

gen und Bestrafungen ausfällt und kann daher als Parameter für Belohnungssensitivität herangezogen werden. Erhielten stark-diskontierende Personen unerwartet positives Feedback, zeigten sie eine höhere VS- und MPFC-Aktivität als schwach-diskontierende Personen, und diese Reaktion war im Vergleich zu jener auf Bestrafungen überproportional hoch. Auch auf Bestrafungen reagierten hoch-impulsive Personen mit erhöhter VS- und MPFC-Aktivität. Die differentielle Aktivität im DLPFC und lateralen OFC auf positives im Vergleich zu negativem Feedback war hingegen bei schwach-diskontierenden Personen höher.

Diese Befunde sprechen für eine erhöhte Belohnungs-Sensitivität stark-diskontierender (hoch-impulsiver) Personen, die eine hohe Saliens belohnungs-ankündigender Hinweisreize bewirkt, bei gleichzeitig reduzierter kognitiver Verarbeitung von Belohnungen. Dieses spezifische Aktivierungsmuster bewirkt einen belohnungs-dominanten Reaktionsstil, der auf eine unmittelbare Bedürfnisbefriedigung ausgerichtet ist (s. a. Kapitel 3).

Bei niedrig-impulsiven Personen gewinnen möglicherweise höhere Ziele (wie Gesundheit) über Konditionierungsprozesse selbst Belohnungscharakter (Hare et al., 2009), jedoch können höhere Ziele auch das Verhalten bestimmen, ohne Belohnungscharakter zu haben. Die Antizipation zukünftiger, abstrakter Belohnungen (z.B. Prüfungserfolg) mag im Augenblick des Lernens keinen Belohnungscharakter haben, als aversiv erlebt werden (ängstliche Erwartung der Prüfung). In diesem Fall wird man vergeblich nach einem Wertsignal für die Option (Prüfungserfolg) suchen, die das bedürfnisaufschiebende Verhalten bewirkt. Die VMPFC-Aktivität wird reduziert sein, die DLPFC-Aktivität erhöht (Hare et al., 2009).

Im Falle der Zeitdiskontierung ist die Situation eine andere, da die Antizipation der zukünftigen Belohnung selbst belohnend sein kann. Auch die verzögerte Belohnung ist eine konkrete (nicht abstrakte) Belohnung, solange der individuelle Zeithorizont nicht überschritten wird.

Man stelle sich die zunehmende Erhöhung der Belohnungsverzögerung vor. Bis zu einer bestimmten Grenze wird es möglich sein, die verzögerte Belohnung zu antizipieren, und sie wird einen Belohnungscharakter haben (ausgedrückt in VMPFC-Aktivität). Die Höhe dieser Grenze ist von der Belohnungshöhe und -Qualität, von Persönlichkeitsmerkmalen (Impulsivität) und verschiedenen, in Kapitel 3 diskutierten Faktoren abhängig, wie aktivierten Bedürfnissen, Blutzuckerspiegel etc. Ab dieser Grenze wird der subjektive Zeithorizont überschritten und die verzögerte Belohnung verliert ihren Belohnungscharakter, die unmittelbare Belohnung wird an Saliens gewinnen, sich in den Vordergrund drängen,

die VMPFC-Aktivität bestimmen. Dennoch ist es noch immer möglich, sich für die verzögerte Belohnung zu entscheiden, aufgrund höherer, rationaler Ziele ('es ist vernünftiger so zu handeln'), und das bedeutet in dieser Situation, sich gegen eine Belohnung zu entscheiden, wie im obigen Prüfungsbeispiel (auch in diesem ist es natürlich theoretisch denkbar, dass die Antizipation des Erfolges Belohnungscharakter hat, die Grenze wo dies nicht mehr der Fall ist, liegt jedoch vermutlich viel niedriger).

5. Langsame Hirn-Potentiale

Da in der vorliegenden Studie *langsame Hirnpotentiale* in Abhängigkeit von Zeitdiskontierungs-relevanten kognitiven Prozessen analysiert wurden, sollen in diesem Kapitel einige Befunde zu *langsamen Potentialen* diskutiert werden.

Unter *Langsamen Potentialen* (SCPs – *Slow Cortical Potentials*) versteht man die langsamsten Potentialverschiebungen des Feldpotentials (hauptsächlich <1 Hz, bis ~ 4 Hz). SCPs werden mit langsameren, bewussten, höheren kognitiven Prozessen (s.u.) assoziiert.

Eine negative Potentialverschiebung in SCPs wird traditionell als erhöhte kortikale Erregbarkeit, eine positive hingegen als Reduktion kortikaler Aktivität interpretiert (He & Raichle, 2009). Bauer, Pripfl, Lamm, Prainsack & Taylor, 2003 liefern Befunde für den Zusammenhang zwischen Positivierung und neuronaler Deaktivierung. Emotional reaktive Personen zeigten bei gelernter Hilflosigkeit (Unlösbarkeit einer Zahlen-Fortsetzungs-Aufgabe zum schlussfolgernden Denken) eine größere Positivierung, wobei die Quellenlokalisierung mittels LORETA eine reduzierte Aktivierung im anterioren cingulären Cortex (ACC) ergab.

Mehrere Studien fanden bei gleichen kognitiven Aufgaben korrespondierende SCP-Aktivierungsmuster (*Skalptopographien*) und BOLD-Signale (Voxel-Profile), einen korrespondierenden Anstieg beider Parameter bei höherer Aufgabenschwierigkeit, und damit eine Korrelation zwischen fMRT-Signal und SCP-Amplitude (Sabatinelli, Lang, Keil & Bradley, 2007; He, Snyder, Zempel, Smyth & Raichle, 2008; Khader, Schicke, Röder & Rösler, 2008; Nagai, Critchley, Featherstone, Trimble & Dolan, 2004). Nagai et al. (2004) zeigten etwa, dass eine höhere ACC-Aktivierung mit einer höheren CNV – Amplitude (*contingent negative variation*), als Index für Erwartung, korrespondiert.

Die wichtigste physiologische Grundlage der SCPs sind EPSPs ('Exzitatorische Postsynaptische Potentiale') an den apikalen Dendriten der Pyramidenzellen in der obersten Rindenschicht des Großhirns (Schicht I). In dieser Rindenschicht bestehen weitverzweigte intrakortikale und kortiko-kortikale Verbindungen, d.h. hier entstehende EPSPs breiten sich räumlich weit aus, zeigen sich als *Depolarisationsfelder*, die mehrere mm^2 ausmachen können. Den SCPs und dem korrespondierenden fMRI-Signal liegen also größere kortikale Netzwerke zugrunde.

He und Raichle (2009) führen Befunde an, die SCPs mit Aufmerksamkeit, Bewusstsein und Volition in Verbindung bringen, etwa mit der bewussten Wahrnehmung von Reizen (Pins & Ffytche, 2003; Libet, Alberts, Wright & Feinstein, 1967), mit der bewussten, willentlichen Ausführung von Bewegungen (Libet, Gleason, Wright & Pearls, 1983).

Sabatinelli et al. (2007) zeigten ein größere *spätes positives Potential* (LPP – *Late positive potential*) in Reaktion auf emotionale Bilder verglichen mit neutralen Bildern.

Diener, Kuehner und Flor (2010) gaben eine Aufgabe vor, in der die Probanden zunächst einen Warnreiz (S1) hörten, gefolgt von einem imperativen Reiz (S2), auf den sie eine Reaktion zeigen mussten, um ein aversives Ereignis abzuwenden (Stromschlag). Die erforderliche Reaktion zur Vermeidung des Stromschlages wurde den Probanden mitgeteilt (Bedingung *vorhandene Kontrolle*), zu gewissen Zeitpunkten im Experiment wurde der Stromschlag jedoch dennoch verabreicht (*Kontrollverlust*-Bedingung). In der Kontrollverlustbedingung zeigte sich 800 bis 3500 ms nach S2-Onset eine stärkere Negativierung ($\sim 5\mu\text{V}$) über fronto-zentralen Elektroden (Fz, Cz u.a.), die sog. PINV (*postimperative negative variation*, auch als CNV – *contingent negative variation* bezeichnet). Bei Wiedererlangung der Kontrolle zeigte sich eine signifikant kleinere PINV.

Die Quellenlokalisierung mittels sLORETA für die Bedingung *vorhandene Kontrolle* ergab Aktivierungsmaxima in BA 7 (superiorer parietaler lobus), BA 6 (prämotorisches Areal - frontaler Lobus), BA 9, BA 46 (DLPFC), BA 10 (frontopolarer Cortex), für die Bedingung *Kontrollverlust* Aktivierungsmaxima in BA 7, BA 40, BA 6 (medialer frontaler Cortex). Ein Vergleich der Bedingungen ergab in der *Kontrollverlust*-Bedingung eine signifikant stärkere Aktivierung im anterioren cingulären Cortex (ACC; BA 24), welcher üblicherweise mit Konflikt-Situationen assoziiert wird (Botvinick, Braver, Barch, Carter & Cohen, 2001). Diener et al. (2010) interpretieren die PINV-Amplitude als Indikator für Reaktionsunsicherheit (Ambiguität), als Indikator für ein System, das versucht Kontrolle zu exekutieren.

Hellwig et al. (2008) führten analog zum S1-S2-Paradigma ein Konditionierungsexperiment durch, wo auf einen neutralen Reiz (CS+) nach einem kurzen Zwischenintervall ein elektrischer Stromschlag (UCS) folgte. In der Kontrollbedingung folgte auf einen anderen neutralen Reiz (CS-) kein Stromschlag. In der CS+-Bedingung zeigte sich eine größere CNV (hier *stimulus preceding negativity* genannt, da vor dem UCS auftretend) an Cz und Pz als in der CS- - Bedingung. Die Erwartung eines biologisch bedeutsamen Reizes (UCS)

führte also zu einer größeren Negativierung, maximal über zentralen und parietalen Elektroden-Positionen.

Mehrere Studien fanden einen negativen Zusammenhang zwischen psychometrischer Intelligenz und Stärke der neuronalen Aktivität bei kognitiven Aufgaben sowie eine stärkere Fokussierung der Aktivierung auf Aufgaben-spezifischen Arealen bei höherer Intelligenz. Diese Befunde werden üblicherweise im Rahmen der *Neuronalen Effizienz*-Hypothese interpretiert, die besagt, dass höhere kognitive Kapazitäten eine geringere neuronale Aktivierung bei kognitiven Anforderung erfordern (Ertl & Schafer, 1969; Neubauer & Fink, 2009).

Fasst man die obigen Befunde zusammen, so stellen SCPs die Aktivität weitläufiger neuronaler Systeme dar, sind das Korrelat langsamer, höherer kognitiver Prozesse. Die Höhe der Amplitude steht in enger Verbindung zur Stärke des fMRT-Signals. Die Stärke einer Negativierung kann als Indikator für die Stärke der neuronalen Aktivität herangezogen werden bzw. die Erregbarkeit kortikaler Areale.

Die Negativierung scheint stärker auszufallen in Situationen, in denen Unsicherheit über die auszuübende Reaktion besteht, in denen eine Erwartung bezüglich bevorstehender Bestrafung (eventuell auch Belohnung) besteht, generell wenn verstärkt Aufmerksamkeits- und andere kognitive Ressourcen rekrutiert werden (Ressourcen-Allokation; (Rösler, Heil & Ridder, 1997)).

6. Studie: Fragestellung und Hypothesen

In der vorliegenden Arbeit soll das Phänomen der Entwertung zeitlich verzögerter Belohnungen (Zeitdiskontierung) mittels Elektroencephalographie (EEG) untersucht werden und damit der neurowissenschaftliche Erkenntnisstand über involvierte Hirnareale um den Aspekt des zeitlichen Verlaufs der beteiligten Prozesse erweitert werden.

Da es sich hierbei um die erste Studie handelt, die das Entscheidungsparadigma der Zeitdiskontierung mittels EEG untersucht, ist die Ausrichtung eine explorative, es soll untersucht werden, welche Entsprechung die an der Zeitdiskontierung beteiligten psychologischen Prozesse in den Hirnströmen von Menschen finden.

Aus dem oben genannten Grund wurde eine einfache Aufgabe verwendet, die die grundlegendste Form der Diskontierung von zeitlich verzögerten monetären Belohnungen erfasst (im Unterschied zu spezielleren Designs, die etwa Vergleiche zu probabilistischer Diskontierung, zur Diskontierung von Verlusten anstellen – s. Kapitel 4). Folgestudien sind erforderlich, um spezifischere Aspekte zu messen. Die verwendete Aufgabe ist in der Präsentationsform an Standardaufgaben (McClure et al., 2004a) orientiert, die experimentelle Variation der Belohnungsattribute hingegen einerseits ähnlich wie bei Folgestudien (Ballard & Knutson, 2009; Kable & Glimcher, 2007), andererseits auf die Methodik des EEG ausgerichtet (s. Methode – Zeitdiskontierungsaufgabe). Die Präsentationsform (beide Optionen wurden simultan präsentiert) wurde gewählt, weil es eine häufig verwendete ist (McClure et al., 2004a; Xu et al., 2009; Marco-Pallares et al., 2009) und alternative Präsentationsformen mit Nachteilen verbunden sind (beispielsweise kommen bei jener von Kable und Glimcher (2007), wo nur die verzögerte Belohnung präsentiert wird, Prozesse des Arbeitsgedächtnisses hinzu, da man sich die unmittelbare Belohnung in Erinnerung rufen muss).

Da es keine a priori Befunde zu elektrophysiologischen Korrelaten der Zeitdiskontierung gibt, sollten grundlegende Verarbeitungsprozesse untersucht werden, die Sensitivität der Hirnströme (*Langsamen Potentiale*) für die Attribute der verzögerten Belohnung (niedrige vs. hohe Belohnungshöhe, kurze vs. lange Belohnungsverzögerung) sowie für das individuelle Entscheidungsverhalten (Wahl der unmittelbaren vs. Wahl der verzögerten Belohnung).

Die Analyse beschränkte sich auf langsame Potentiale, da v.a. höhere Entscheidungsprozesse von Interesse waren, wie Belohnungsevaluation (insbesondere die Diskontierung der Belohnung in Abhängigkeit von deren zeitlicher Verzögerung), Belohnungsvergleich und Entscheidungsfindung.

Um Unterschiede in den Langsamen Potentialen auf die Diskontierung der verzögerten Belohnung zurückführen zu können, wurde die unmittelbare Belohnung konstant gehalten und die verzögerte Belohnung bezüglich Höhe (Betrag) und Verzögerung systematisch variiert. Des Weiteren wurden inter-individuelle Unterschiede in Abhängigkeit von der Impulsivität der Personen (Einteilung in zwei Gruppen nach der Stärke der Zeitdiskontierung) untersucht. Personen die häufiger die unmittelbare Belohnung wählten wurden der Gruppe *hoch-impulsiv*, Personen die seltener die unmittelbare Belohnung wählten der Gruppe *niedrig-impulsiv* zugewiesen.

Es wurden die an den Elektroden gemessenen SCP-Amplituden im zeitlichen Verlauf analysiert und Rückschlüsse über deren Lokalisation mittels sLORETA (Pascual-Marqui, 2002) angestellt.

6.1 Hypothesen

Die Größe negativer SCP-Amplituden wird als Höhe des Entscheidungskonflikts (Reaktions-Unsicherheit; (Diener et al., 2010)), Ausmaß der Anforderungen/Schwierigkeit einer Entscheidungssituation (Khader et al., 2008) bzw. Höhe der mobilisierten kognitiven Ressourcen (Rösler et al., 1997) interpretiert.

Die Annahme ist, dass schwierigere Entscheidungssituationen eine stärkere Mobilisierung von Aufmerksamkeits- und anderen kognitiven Ressourcen (etwa kognitiver Hemmung) bewirken, was sich in einer größeren SCP-Amplitude (Negativierung) äußert.

Eine exakte Zuordnung zu bestimmten kognitiven Prozessen (insbesondere zur Berechnung/Kodierung des Subjektiven Wertes) ist auf Grundlage der bisherigen SCP-Befunde nicht möglich. Amplituden-Unterschiede werden aus diesem Grund zusammen mit fMRI-Befunden zu Aufgabenschwierigkeit (McClure et al., 2004) und kognitiver Kontrolle (Ballard et al., 2009) im Kontext der Zeitdiskontierung diskutiert.

In Bezug auf die **Langsamen Potentiale (SCPs)** wird erwartet, dass diese im interessierenden Zeitfenster (700 – 2200 ms nach Präsentation der Belohnungs-Optionen) ein negati-

ves Maximum über frontalen, zentralen Elektroden erreichen, da im frontalen Cortex der Ort der Entscheidungsfindung anzusiedeln ist (s. 'Delta-Areale' - McClure et al., 2004a; Xu et al., 2009), und die *PINV*, assoziiert mit Reaktionsunsicherheit und Aufmerksamkeitsmodulation, hier die größte Amplitude zeigte (Diener et al., 2010).

Generell sollten SCP-Unterschiede in Abhängigkeit von der Belohnungs-Höhe und -Verzögerung feststellbar sein, mit einer größeren SCP-Amplitude für kleine Belohnungen mit kurzer Verzögerungsdauer (im Wert und Verzögerung der unmittelbaren Belohnung ähnlicher), da hier die Aufgabenschwierigkeit (Reaktions-Unsicherheit; Diener et al., 2010) höher ist, sowie in Abhängigkeit von der Wahl, mit einer größeren SCP-Amplitude für die Wahl der verzögerten Belohnung, da hier verstärkt kognitive Kontrolle erforderlich ist (McClure et al., 2004a).

Die SCP-Sensitivität für die Höhe der verzögerten Belohnung sollte bei niedrig-impulsiven Personen höher sein, da ihnen Entscheidungssituationen mit größeren verzögerten Belohnungen leichter fallen müssten. Hoch-impulsive hingegen entwerten verzögerte Belohnungen so stark, dass selbst größere verzögerte Belohnungen im subjektiven Wert nicht weit über der kleineren unmittelbaren Belohnung liegen.

Die SCP-Sensitivität für die Verzögerung der verzögerten Belohnung sollte bei hoch-impulsiven Personen höher sein, da ihnen Entscheidungssituationen mit kurz verzögerten Belohnungen relativ zu Entscheidungssituationen mit lang verzögerten Belohnungen schwerer fallen müssten. Niedrig-impulsive entwerten wesentlich schwächer und sollten daher weniger große Unterschiede in Abhängigkeit von der Belohnungsverzögerung zeigen.

Die SCP-Amplituden sollten generell bei Hoch-impulsiven kleiner sein als bei Niedrig-impulsiven, da hier seltener die verzögerte Belohnung gewählt wird (und damit weniger Selbst-Kontrolle erforderlich ist). Bei Wahl der verzögerten Belohnung wird eine größere SCP-Amplitude bei hoch-impulsiven Personen vermutet, da diese über weniger Kontrollressourcen verfügen und daher im Sinne der *Neuronalen Effizienzhypothese* eine stärkere Negativierung zeigen müssten.

Der zeitliche Verlauf der SCPs bzw. der SCP-Unterschiede in Abhängigkeit von Belohnungs-Höhe und -Verzögerung soll explorativ untersucht werden, da diesbezüglich keine a priori-Hypothesen aufgestellt werden können.

In Hinblick auf die **Quellenlokalisierung** wird erwartet, dass mediale Belohnungsareale (MPFC, MOFC, PCC) sensitiv auf die Höhe der verzögerten Belohnung reagieren (Ballard

& Knutson, 2009) und laterale präfrontale Areale (DLPFC, LOFC) bei Wahl der verzögerten Belohnung stärker aktiviert sind als bei Wahl der unmittelbaren Belohnung (McClure et al., 2004a; Hare et al., 2009; Figner et al., 2010). Bei niedrig-impulsiven Versuchspersonen sollte generell eine stärkere laterale frontale Aktivierung (DLPFC, LOFC) feststellbar sein, da sie sich definitionsgemäß häufiger für die verzögerte Belohnung entscheiden, und dies v.a. bei geringerem Wert der verzögerten Belohnung erhöhte Selbstkontrolle erfordert (Hare et al., 2009).

Da nach Kable und Glimcher (2007), Ballard und Knutson (2009) davon auszugehen ist, dass der MPFC auch den Wert der verzögerten Belohnung kodiert, sollte bei niedrig-impulsiven Personen dieser stärker aktiviert sein als bei hoch-impulsiven, insbesondere bei großer Belohnungshöhe und großen Verzögerungen (Bedingung *hoch_lang*). Bei Hoch-impulsiven bewirkt die größere Verzögerung eine Entwertung, welche sich in reduzierter MPFC-Aktivierung äußern müsste.

7. Methode

7.1 Versuchspersonen

Als Versuchspersonen nahmen 30 rechts-händige deutschsprachige Erwachsene (15 weibliche und 15 männliche Personen; Durchschnittsalter 26.23 Jahre (± 2.87 SD)) teil. Sämtliche Versuchspersonen waren nach eigener Angabe in ihrer Vergangenheit frei von psychiatrischen oder neurologischen Erkrankungen.

Einige Personen mussten aufgrund der folgenden Gründe von der Analyse exkludiert werden. Bei sechs Personen wurde das Artefaktkriterium nicht erfüllt (nach Korrektur blieben weniger als 40 von insgesamt 60 Trials (Durchgängen) pro Bedingung übrig). Im EEG zweier Personen zeigte sich ein starkes Rauschen in allen Kanälen. Eine Person zeigte zu schnelle Reaktionszeiten (Durchschnittsreaktionszeit: 623 ms). Eine Person gab an, sich Verzögerungen bei hohen Beträgen zum Teil nicht angesehen zu haben. Zwei Personen zeigten stark inkonsistentes Entscheidungs-Verhalten.

Insgesamt wurden somit die Daten von **18 Personen** (8 weibliche und 10 männliche Personen; Durchschnittsalter 26.6 Jahre (± 3.1 SD)) für die Analyse verwendet.

7.2 Versuchsablauf

7.2.1 Zeitdiskontierungsaufgabe

Die Zeitdiskontierungs-Aufgabe wurde am Computer präsentiert, wobei die Personen mittels der Zahlentasten 1 und 3 am Ziffernblock des Keyboards ihre Wahl treffen mussten.

Die Instruktion lautete dahingehend, dass die Versuchspersonen an einer Studie teilnehmen würden, in der untersucht werden würde, wie Menschen verzögerte monetäre Belohnungen subjektiv entwerten. Es gäbe keine richtige Antwort und sie hätten beliebig lange Zeit. Es wurde darauf hingewiesen, dass am Ende des Experiments zufällig aus einem Trial (Durchgang) ihre Wahl ermittelt werden würde und sie den korrespondierenden Betrag je

nach Wahl sofort oder nach der entsprechenden Verzögerung ausbezahlt bekommen würden.

Die beiden Entscheidungsoptionen wurden auf beiden Seiten des Bildschirms präsentiert, wobei der kleinere Betrag (konstant € 10,-, verfügbar unmittelbar nach dem Experiment) immer links des Fixationskreuzes und der höhere Betrag immer rechts präsentiert wurde. Die Versuchspersonen wurden instruiert, mit den Augen in die Mitte des Bildschirms, auf das Fixationskreuz zu fokussieren, wobei die Priorität darin läge, die beiden Optionen schnell und gut zu erfassen, also kleine Augenbewegungen zulässig seien. Damit sollte eine mangelnde Verarbeitungstiefe und eine zusätzliche Belastungen durch eine weitere Anforderung so gut wie möglich reduziert werden, bei gleichzeitiger Vermeidung größerer Augenbewegungsartefakte.

Abbildung 5 zeigt den Zeitverlauf eines Trials. Zu Beginn des Trials erschienen beide Belohnungs-Optionen am Bildschirm (Stimulusonset). Zwei gelbe Dreiecke unterhalb der Belohnungs-Optionen zeigten an, dass eine Entscheidung zu treffen ist. Sobald die Person ihre Wahl getroffen hatte, wurde das korrespondierende Dreieck für 1.5 Sekunden rot, um zu signalisieren, dass die Wahl erfolgreich aufgezeichnet worden war. Anschließend kam ein zwischen 1 und 2 Sekunden variierendes Inter-Trial-Intervall, in welchem nur das Fixationskreuz zu sehen war.

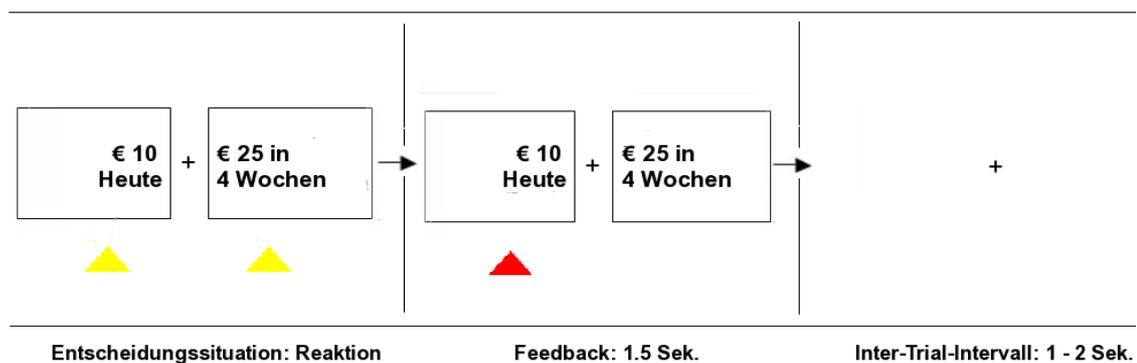


Abb. 5: Zeitverlauf eines Trials. **Links**, der Stimulus-Onset: beide Belohnungsoptionen erschienen am Bildschirm, die kleinere, unmittelbare Belohnung (€ 10 Heute) immer links, die größere, verzögerte Belohnung immer rechts vom Fixationskreuz. Die gelben Pfeile unterhalb signalisierten, dass eine Wahl zu treffen ist. **Mitte**, das Feedback: nach dem Tastendruck zeigte das rote Dreieck für 1.5 Sekunden an, welche Option gewählt worden war, das mit der nicht gewählten Option assoziierte Dreieck verschwand. **Rechts**, das Inter-Trial-Intervall: für die Dauer von 1-2 Sekunden war nur das Fixationskreuz am Bildschirm zu erkennen. Im Anschluss kam das nächste Trial, die nächste Entscheidungssituation.

Insgesamt musste jede Person in 240 Trials eine Entscheidung treffen, zwischen einer unmittelbaren und einer höheren verzögerten monetären Belohnung, wobei die Reihenfolge der Trials zufällig variiert wurde, sich also bei jeder Person unterschied.

Variiert wurde die *Höhe* der späteren Belohnung, in zwölf Stufen (niedrig: € 11,12,13,14,15,16 versus hoch: € 25,26,27,28,29,30) sowie die *Verzögerung* der späteren Belohnung in zehn Stufen (kurz: 1,2,3,4,5 Wochen versus lang: 12,13,14,15,16 Wochen). Aus allen Kombinationen der Faktoren *Höhe* und *Verzögerung* resultierten 120 Trials, von denen jedes zwei mal präsentiert wurde. Es handelte sich also um ein vollständig gekreuztes faktorielles Design mit den unabhängig, parametrisch variierten Faktoren *Höhe* und *Verzögerung*. Die Höhe der unmittelbaren Belohnung (verfügbar sofort im Anschluss an das Experiment) betrug konstant € 10, was es ermöglichte Unterschiede zwischen den Bedingungen auf die variierte verzögerte Belohnung zurückzuführen.

Die Wahl der Höhen- und Verzögerungsstufen erfolgte derart, dass der Einfluss beider Faktoren auf den Subjektiven Wert (Subjective Value, SV) entsprechend der hyperbolischen Funktion

$$SV = A/(1 + k \cdot D)$$

[A...Höhe, D...Verzögerung, k...individueller Diskontierungsparameter]

vollkommen äquivalent ausfallen würde, was eine direkte Vergleichbarkeit der Effekte ermöglichen sollte. Die Entscheidung für dieses Modell erfolgte aufgrund der weiten Verbreitung sowohl in Human- als auch Tierstudien (siehe Green & Myerson, 2004). Als Diskontierungsparameter k zur Berechnung der subjektiven Werte zur Auswahl der Höhen- und Verzögerungsstufen (a priori) wurde ein in mehreren Studien durchschnittlicher Parameter von $k = 0.02$ herangezogen (Ballard & Knutson, 2009; Kable & Glimcher, 2007; Kirby & Maraković, 1995).

7.2.2 Elektroenzephalographie (DC-EEG)

Die hier eingesetzte Methode, um Rückschlüsse über die Hirnaktivität der Probanden während der Aufgabenbearbeitung treffen zu können, ist jene der ereigniskorrelierten Potentiale im Elektroenzephalogramm. Dabei wurde die Aufgabenbearbeitung mit der EEG-Aufzeichnung synchronisiert, was es ermöglicht, eine Beziehung zwischen kognitiven Pro-

zessen und elektrophysiologischer Messung herzustellen. Die gemessenen Potential-schwankungen ergeben sich durch neuronale Aktivität an den apikalen Dendriten in der obersten Schicht der Großhirnrinde (Telencephalon). Durch Innervierung der Dendriten entstehen Aktionspotentiale, die wiederum eine Kaskade an exzitatorischen oder inhibitorischen postsynaptischen Potentialen (EPSP/IPSP) auslösen. Letztere sind langsam und summieren sich daher an der Neuronenmembran, was es ermöglicht sie zu messen. Da die Ionenströme die Hirnaktivität ausmachen, können (über die Messung dieser Ionenströme) neuronale Prozesse nahezu vollkommen synchron, d.h. zum Zeitpunkt des Auftretens erfasst werden. Einschränkungen ergeben sich einerseits aus der hohen Hintergrundaktivität des Gehirns, wodurch es erst durch Mittelungsprozesse (*Averaging*) möglich ist, Potential-schwankungen zu erfassen, die kognitiven Prozessen zugeordnet werden können.

Andererseits sind die auf der Kopfoberfläche gemessenen Potentiale das Resultat konzentrierter Aktivität vieler Zellensembles, was es unmöglich macht, vom Ort der Messung (Elektrode) exakt auf den Ort der Aktivität zu schließen.

Es existieren jedoch mathematische Verfahren (sLORETA s.u.; (Pascual-Marqui, 2002)), mithilfe derer ein Modell der Beziehung von Messung und Quelle aufgestellt wird, der Ort neuronaler Aktivität simuliert werden kann. SLORETA wurde auch in dieser Studie, zur Quellenlokalisierung herangezogen, der Schwerpunkt lag jedoch auf der Analyse der ereigniskorrelierten Potentiale (EKP), die als physiologisches Korrelat sensorischer, motorischer und kognitiver Prozesse angesehen werden können.

Dabei kann man unterscheiden zwischen einerseits schnellen EKPs, die auf eine Reizwahrnehmung oder eine Handlung hin folgen, frühe exogene Potentiale, die auf physikalische Stimulusmerkmale reagieren, darauffolgende endogene Potentiale, die das Resultat einer kognitiven Verarbeitung, bzw. sensibel für kognitive Variablen sind, und andererseits sog. *Langsamen Potentialen* (SCPs - Slow Cortical Potentials; s. Kapitel 5), welchen längerfristige Potentialverschiebungen zugrundeliegen und die mit einer höheren kognitiven Verarbeitung assoziiert werden (He & Raichle, 2009). In der vorliegenden Arbeit wurden die Langsamen Potentiale analysiert. Für die Messung der Langsamen Potentiale ist ein Gleichspannungsverstärker notwendig (DC-Verstärker), der es ermöglicht, Potentiale mit geringer Frequenz zu erfassen.

7.2.3 Applikation und Registrierung

Es wurden die Hirnströme an 59 zerebralen Ring-Elektroden (integriert in einer Haube der Firma Easycap) mit einer Samplingrate von 250 Hz. registriert, wobei die Spannungsdifferenzen zwischen Kopfelektroden und sternovertebraler Referenz gemessen wurden. Letztere besteht aus dem gewichteten Mittel einer Elektrode am Schlüsselbein (Sternoclavicular-Gelenk) und einer Elektrode am siebten Halswirbel (Vertebra Prominens).

Um die Augenbewegungen der Versuchspersonen aufzuzeichnen (zum Zweck der anschließenden Augenbewegungskorrektur der EEG-Messung) wurden jeweils 2 Elektroden links und rechts von den Augen für horizontale (HEOG) und 2 Elektroden ober- und unterhalb des linken Auges für vertikale Augenbewegungen (VEOG) appliziert. Das EOG wurde bipolar registriert.

Als Erdung diente eine Masse-Elektrode, die an der Stirn angebracht wurde. Die Elektroden bestanden aus gesintertem Silberchlorid (Ag/AgCl) und wurden mithilfe der Elektrodenhaube äquidistant (M10 System mit 61 Elektroden) am Kopf appliziert. Die beiden präaurikulären Kanäle (A1 und A2) wurden nicht aufgezeichnet, insgesamt wurden also die Potentiale an 59 Elektroden registriert. Die Elektroden auf der zentralen Linie entsprechen denen des 10-20 Systems. Die linke und rechte Seite sind symmetrisch (Lage der Elektroden relativ zum 10-20 System, s. Abb. 6).

Um den elektrischen Hautwiderstand zu reduzieren, wurde die Hautschicht unter den Elektroden mit einer sterilen Nadel angekratzt, ein zwischen Ringelektrode und Kopfhaut injiziertes salzhaltiges Elektrodengel sorgte für bessere Leitfähigkeit. Es wurde darauf geachtet, dass die Elektrodenimpedanz der Kopfelektroden nicht mehr als 2 k Ω , jene der Referenzelektroden mehr als 1 k Ω betrug.

EEG und EOG wurden mit einer Bandbreite von 0,1 - 125 Hz mittels Verstärker der Firma Zickler verstärkt. Der Versuchsraum, in den die Personen nach Elektrodenapplikation geführt wurden, war gedämpft ausgeleuchtet.

Die Diskontierungsaufgabe wurde auf einem 17-Zoll-CRT-Bildschirm (Sony) präsentiert, Reaktionen der Versuchspersonen wurden über eine PC-Tastatur aufgezeichnet.

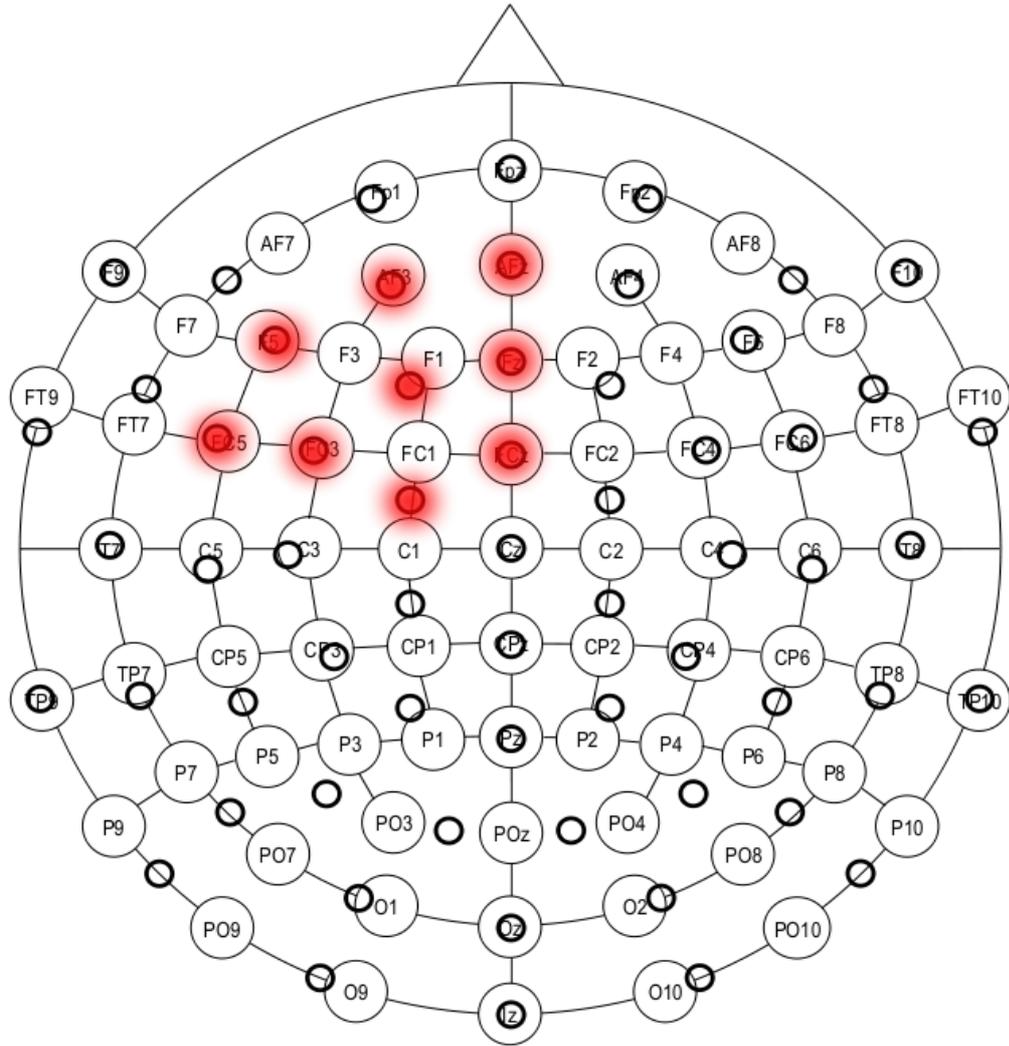


Abb. 6: Elektrodenschema. Positionen der abgeleiteten Elektroden (fett umrandet) relativ zum 10-20 System (beschriftete Positionen). Die präaurikulären Kanäle bei FT9 und FT10 wurden nicht abgeleitet. Rot markiert sind jene Elektroden deren Potentiale in die statistische Analyse einfließen (s. Methode - SCP-Analyse).

7.3 Elektrophysiologische Analyse

7.3.1 Vorbereitung (Preprocessing)

Der Trial-Zeitbereich wurde auf 0 bis 2200 ms (stimulus-locked – Präsentation der Belohnungs-Optionen) festgelegt, da damit gewährleistet ist, dass ein Trial die Summe aus Reaktionszeit und Feedbackdauer (1500 ms) nicht unterschreitet. Im Rahmen der Baseline-

Korrektur wurde die mittlere Amplitude im Zeitfenster -200 bis 0 ms (stimulus-locked) von den Amplituden-Werten abgezogen.

Trials, in denen die Personen kürzere Reaktionszeiten als 700 ms zeigten, wurden entfernt (dieser Grenzwert wurde willkürlich festgelegt, um eine gewisse Mindestdauer der Trials zu gewährleisten, und spontane, unüberlegte Reaktionen zu exkludieren). Da die durchschnittliche Reaktionszeit 2093 ms betrug, fällt der überwiegende Teil des 2200 ms langen Zeitfensters somit auf die Stimulusverarbeitung und Entscheidungsphase, wobei es hier natürlich starke interindividuelle Schwankungen gibt.

Eine Augenbewegungskorrektur (mittels zu Beginn der Messung aufgezeichnetem EOG) wurde durchgeführt, um jene Signale, die durch Augenbewegungen erzeugt wurden, so gut wie möglich zu reduzieren.

Die Bedingungen wurden einmal nach Belohnungshöhe (2) x Belohnungsverzögerung (2) (4 Innersubjekt-Bedingungen mit je 60 Trials) und einmal nach dem Wahlverhalten, Wahl der unmittelbaren versus Wahl der verzögerten Belohnung, gebildet (2 Innersubjekt-Bedingungen):

- Bedingung 1 - **“niedrig_kurz”**: niedrige Belohnung (€ 11 - € 16) und kurze Verzögerung (1 – 5 Wochen)
- Bedingung 2 - **“niedrig_lang”**: niedrige Belohnung (€ 11 - € 16) und lange Verzögerung (12 – 16 Wochen)
- Bedingung 3 - **“hoch_kurz”**: hohe Belohnung (€ 25 - € 30) und kurze Verzögerung (1 – 5 Wochen)
- Bedingung 4 - **“hoch_lang”**: hohe Belohnung (€ 25 - € 30) und lange Verzögerung (12 – 16 Wochen)
- Bedingung 5: **Wahl der unmittelbaren Belohnung** (€ 10 – Heute)
- Bedingung 6: **Wahl der verzögerten Belohnung** (€ 11 bis € 30 – in 1 bis 16 Wochen)

Für die Bedingung *Wahl der unmittelbaren Belohnung* wurden für jede Person alle Trials, in denen sie die unmittelbare Belohnung in der Bedingung *niedrig_lang* gewählt hatten, verwendet, und zusätzlich weitere Trials per Zufall aus anderen Bedingungen, wo die unmittelbare Belohnung gewählt worden war, um auf insgesamt 60 Trials zu kommen

(analog zu den anderen 4 Bedingungen). Für die Bedingung *Wahl der verzögerten Belohnung* wurden für jede Person alle Trials, in denen sie die verzögerte Belohnung in der Bedingung *hoch_kurz* gewählt hatte, verwendet, und zusätzlich weitere Trials per Zufall aus anderen Bedingungen, wo die verzögerte Belohnung gewählt worden war, um ebenfalls auf insgesamt 60 Trials zu kommen. Damit sollten möglichst eindeutige Präferenzen für die eine oder andere Belohnung durch die Bedingungen repräsentiert werden.

Die sechs Innersubjekt-Bedingungen (*niedrig_kurz*, *niedrig_lang*, *hoch_kurz*, *hoch_lang*; *Wahl der unmittelbaren Belohnung*, *Wahl der verzögerten Belohnung*) wurden weiters in EEG-Lab (open-source Matlab-toolbox zur Bearbeitung ereigniskorrelierter EEG-Daten; (Delorme & Makeig, 2004)) analysiert. Die Daten wurden mit einem 30 Hz Low Pass Filter gefiltert, so dass alle Frequenzen über 30 Hz gedämpft wurden.

Trials, in denen unerwünschte Artefakte erkennbar waren, wurden entfernt, einerseits durch visuelle Inspektion, andererseits automatisch nach bestimmten Kriterien (Amplitudenkriterium: maximaler Amplitudenwert +/- 95 μ V, Driftkriterium: maximaler Anstieg von 50 μ V pro Trial). Blieben weniger als 40 Trials übrig, wurde die Person exkludiert.

Um die Elektroden zu bestimmen, die in die statistische Analyse der Langsamen Potentiale aufgenommen werden sollten, wurden die zweidimensionalen Skalp-Topographien (Verteilung der Potentiale über die Kopfhaut) visuell inspiziert, wobei ein negatives Maximum über frontalen Elektroden gefunden wurde, mit einer Tendenz zu Elektroden über der linken Hemisphäre (s. Ergebnisse 8.2 - Abb. 10). Die Analyse beschränkt sich auf Elektroden, die sich am Ort dieser maximalen Negativierung befinden (s. Abb. 6), wobei das Mittel aus allen als abhängige Variable diente.

Für jede der sechs Bedingungen wurden für jede Person Averages berechnet: es wurde aus jedem Trial der interessierende Zeitbereich (2200 ms) ausgeschnitten und das Mittel aller Trials einer Bedingung berechnet. Die Grand Averages wurden aus dem Mittel der Einzel-Averages der Versuchspersonen berechnet.

Ab 700 ms ist in den GrandAverages der ausgewählten fronto-zentralen Elektroden ein Unterschied/ 'Auseinanderdriften' zwischen den Bedingungen feststellbar (s. Ergebnisse 8.2.1 - Abb. 11). Daher wurden die Amplitudenwerte der Hirnpotentiale für folgende Zeitbereiche extrahiert (Abb. 7), für die weitere SPSS-Analyse exportiert (alle Angaben beziehen sich auf den Stimulusonset):

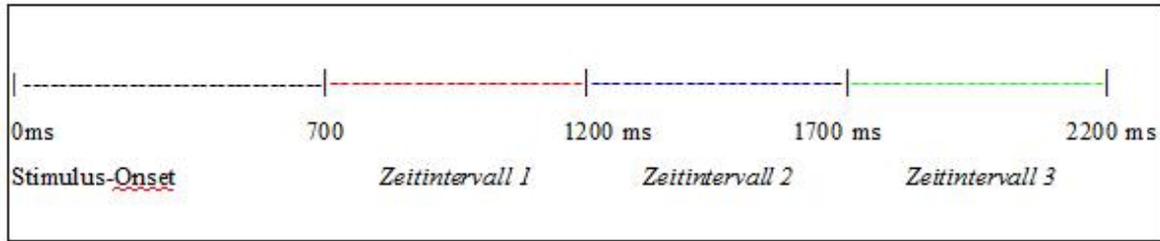


Abb. 7: Zeitintervalle (EKP-Analyse)

- Zeitintervall 1: 700– 1200 ms
- Zeitintervall 2: 1200– 1700 ms
- Zeitintervall 3: 1700 – 2200 ms

7.3.2 Zwischengruppenvergleich: Impulsivität

Für die Analyse der Unterschiede zwischen den Personen wurden diese den Gruppen *niedrig_impulsiv* und *hoch_impulsiv* zugewiesen mittels Mediansplit nach der relativen Häufigkeit der Wahl der unmittelbaren Belohnung: Der Gesamt-Range der relativen Häufigkeit (Wahl der unmittelbaren Belohnung) betrug 0.17 bis 0.87, alle Personen (N=9) mit einer relativen Häufigkeit <0.37 wurden der Gruppe – niedrig-impulsiv, alle Personen (N=9) mit einer relativen Häufigkeit > 0.37 der Gruppe – hoch-impulsiv zugewiesen.

7.4 Statistische Analyse

7.4.1 Verhaltensdaten

Das Wahlverhalten (relative Häufigkeit der Wahl der verzögerten Belohnung) der Personen wurde mittels loglinearer Analyse, mit den Faktoren *Impulsivität*, *Belohnungshöhe* und *Belohnungsverzögerung*, untersucht.

Durchschnittliche Reaktionszeiten wurden für die vier Belohnungs-Attribut-Bedingungen (*niedrig_kurz*, *niedrig_lang*, *hoch_kurz*, *hoch_lang*) und zwei Verhaltensbedingungen (*Wahl_unmittelbare Belohnung*, *Wahl_verzögerte Belohnung*) berechnet.

Da die Reaktionszeiten durch eine Person mit besonders hoher mittlerer Reaktionszeit (MW-RT = 6130.3 ms) verzerrt sind, wurden relative Reaktionszeiten berechnet ((MW-RT_Bedingung) - (MW-RT_Gesamt) / (MW-RT_Gesamt)) und für die weitere Analyse verwendet. Die absoluten mittleren Reaktionszeiten werden angegeben, da sie innerhalb das analysierte Zeitfenster fallen und daher bei der Interpretation der SCPs berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Verzerrung durch die höchste mittlere RT (6130.3 ms), fließt diese nicht die Berechnung der absoluten RTs ein.

Die Unterschiede in den relativen Reaktionszeiten, ausgelöst durch die Innersubjektfaktoren *Belohnungshöhe* (niedrig vs. hoch) und *Belohnungsverzögerung* (kurz vs. lang) sowie durch den Zwischensubjektfaktor *Impulsivität* (niedrig vs. hoch) wurden mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) analysiert. Auch für die Unterschiede in den relativen Reaktionszeiten, die auf *Wahlverhalten* (Wahl der unmittelbaren Belohnung vs. Wahl der verzögerten Belohnung) und *Impulsivität* (niedrig vs. hoch) zurückzuführen sind, wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) gerechnet.

7.4.2 SCP-Amplituden

Analyse 1: Belohnungsattribute

Für die statistische Analyse der Unterschiede in der SCP-Amplitude (AV) in Abhängigkeit von *Belohnungshöhe* und *-Verzögerung* wurde eine Varianzanalysen mit Messwiederholung (ANOVA), mit den Innersubjekt-Faktoren *Zeitintervall* (Intervall 1: 700-1200 ms vs. Intervall 2: 1200-1700 ms vs. Intervall 3: 1700-2200 ms), *Höhe* (niedrig vs. hoch), *Verzögerung* (kurz vs. lang) und Zwischengruppenfaktor *Impulsivität* (niedrig vs. hoch) gerechnet.

Analyse 2: Wahlverhalten

Für die statistische Analyse der Unterschiede in der SCP-Amplitude (AV) in Abhängigkeit vom *Wahlverhalten* wurde eine Varianzanalysen mit Messwiederholung (ANOVA), mit den Innersubjekt-Faktoren *Zeitintervall* (Intervall 1: 700-1200 ms vs. Intervall 2: 1200-1700 ms vs. Intervall 3: 1700-2200 ms), *Wahlverhalten* (Wahl der unmittelbaren Belohnung vs. Wahl der verzögerten Belohnung) und Zwischengruppenfaktor *Impulsivität* (niedrig vs. hoch) gerechnet.

7.5 Quellenlokalisierung (sLORETA)

Zur Quellenlokalisierung der an den Elektroden aufgezeichneten SCPs mit einer Länge von 1500 ms (s.u.) wurde das Software-Paket sLORETA (*standardized low resolution brain electromagnetic tomography*; (Pascual-Marqui, 2002)) verwendet. Es wurde die dreidimensionale Stromdichteverteilung der SCPs für jedes Zeitintervall (Intervall 1: 700-1200 ms vs. Intervall 2: 1200-1700 ms vs. Intervall 3: 1700-2200 ms) und Bedingung berechnet und zwischen den Bedingungen statistisch verglichen.

sLORETA berechnet die Stromdichteverteilung an 6430 Voxeln in der Grauen Substanz des menschlichen Gehirns und setzt dabei die Annahme voraus, dass benachbarte Voxel in ähnlicher Stärke und Ausrichtung aktiviert sind. Als Ergebnis bekommt man ein dreidimensionales Bild der Gehirnaktivität mit relativ geringer räumlicher, jedoch sehr hoher zeitlicher Auflösung. sLORETA-Bilder geben die elektrische Aktivität, in Form der quadrierten standardisierten Höhe der geschätzten Stromdichte, in jedem Voxel im neuroanatomischen Talairach-Raum an (Talairach & Tournoux, 1988).

sLORETA wurde im ersten Schritt benutzt, um die Aktivierungsmaxima in den 6 Bedingungen zu erfassen. Im nächsten Schritt wurden Kontraste gerechnet, um elektrophysiologische Unterschiede zwischen den Bedingungen zu erfassen. sLORETA vergleicht die Stromdichteverteilung Voxel für Voxel zwischen den kontrastierten Bedingungen. Die statistische Analyse der Unterschiede zwischen den Bedingungen erfolgte mittels *Statistical Nonparametric Mapping* (SnPM; (Nichols & Holmes, 2002)).

Folgende Unterschiede zwischen Bedingungen wurden auf Signifikanz geprüft (für alle 18 Personen und getrennt für hoch- und niedrig-impulsive Personen):

- niedrig_kurz - niedrig_lang (Verzögerungsunterschiede bei niedrigen Beträgen)
- hoch_kurz - hoch_lang (Verzögerungsunterschiede bei hohen Beträgen)
- hoch_kurz - niedrig_kurz (Höhe-Unterschiede bei kurzen Verzögerungen)
- hoch_lang – niedrig_lang (Höhe-Unterschiede bei langen Verzögerungen)
- hoch_kurz - niedrig_lang (maximale Differenz im subjektiven Wert)
- niedrig_kurz - hoch_lang
- Wahl_unmittelbare Belohnung - Wahl_verzögerte Belohnungen

Unterschiede zwischen niedrig- und hoch-impulsive Personen wurden in allen Bedingungen auf Signifikanz geprüft:

- niedrig_kurz: niedrig_impulsiv - hoch_impulsiv
- niedrig_lang: niedrig_impulsiv - hoch_impulsiv
- hoch_kurz: niedrig_impulsiv - hoch_impulsiv
- hoch_lang : niedrig_impulsiv - hoch_impulsiv

8. Ergebnisse

8.1 Verhaltensdaten

8.1.1 Wahlverhalten

Die Personen variierten stark in ihrem Wahlverhalten, in ihrer Präferenz für unmittelbare versus verzögerte Belohnungen. Die verzögerte Belohnung wurde in 13 bis 83 % aller Fälle, durchschnittlich in 53 % der Fälle gewählt. Unterschiede im Diskontierungsverhalten (relative Häufigkeit - Wahl der verzögerten Belohnung) zwischen den Geschlechtern sind nicht-signifikant ($\chi^2(1)=1.88$, $p=0.17$). In der Gruppe der *niedrig-impulsiven* wurde durchschnittlich in 72 % der Fälle die verzögerte Belohnung gewählt, in der Gruppe der *hoch-impulsiven* durchschnittlich in 33 % der Fälle.

Die loglineare Analyse der Häufigkeit der Wahl der verzögerten Belohnung mit den Faktoren *Impulsivität*, *Belohnungshöhe* und *Belohnungsverzögerung* ergibt, dass sich die Impulsivitäts-Gruppen signifikant in ihrer Wahl unterscheiden ($\chi^2(1)=39.88$, $p<0.001$). Niedrig-impulsive wählten 2.18 mal häufiger die verzögerte Belohnung als hoch-impulsive Personen. Darüber hinaus zeigte sich ein hoch-signifikanter Haupteffekt *Belohnungshöhe* ($\chi^2(1)=68.34$, $p < 0.001$; die verzögerte Belohnungen wurde 3.3 mal häufiger gewählt, wenn sie höher war), Haupteffekt *Belohnungsverzögerung* ($\chi^2(1)=19.54$, $p < 0.001$; die verzögerte Belohnung wurde 1.8 mal häufiger gewählt, wenn sie kürzer verzögert war), Wechselwirkungseffekt *Impulsivität*Belohnungshöhe* ($\chi^2(1)=6.8$, $p < 0.01$). Hoch-impulsive zeigten stärkere Verhaltens-Unterschiede in Abhängigkeit von der Belohnungshöhe: bei hoher Belohnungshöhe wählten hoch-impulsive 5.72 mal (niedrig-impulsive 2.73 mal) häufiger die verzögerte Belohnung als bei niedrigen Beträgen.

Der Wechselwirkungseffekt *Impulsivität*Belohnungsverzögerung* war ebenfalls signifikant ($\chi^2(1)=14.08$, $p < 0.001$). Hoch-impulsive zeigten stärkere Verhaltens-Unterschiede in Abhängigkeit von der Belohnungsverzögerung: bei kurzer Belohnungsverzögerung wählten hoch-impulsive 3.39 mal (niedrig-impulsive 1.46 mal) häufiger die verzögerte Belohnung als bei langer Belohnungsverzögerung.

Auch der Wechselwirkungseffekt *Belohnungshöhe*Belohnungsverzögerung* ist signifikant ($\chi^2(1)=16.19$, $p<0.001$). Eine kurz verzögerte Belohnung wird bei großer Belohnungs-

höhe 1.63 mal häufiger gewählt als bei kleiner Belohnungshöhe, eine lang verzögerte Belohnung hingegen 8.2 mal häufiger bei großer Belohnungshöhe relativ zu kleiner Belohnungshöhe.

Die relativen Häufigkeiten der Wahl der verzögerten Belohnung sind Tabelle 1 zu entnehmen. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich beide Gruppen sowohl von der Belohnungsverzögerung als auch von der Belohnungshöhe beeinflussen ließen, Belohnungshöhe generell einen stärkeren Effekt auf das Wahlverhalten hatte und dass die hoch-impulsiven Versuchspersonen sensibler auf Unterschiede in diesen Variablen reagierten.

8.1.2 Reaktionszeiten (RT)

Die mittlere Reaktionszeit aller Versuchspersonen beträgt 2093.4 Sekunden (SD = 1202 S.), unterscheidet sich zwischen den Impulsivitäts-Gruppen nicht signifikant ($t = -1.14$, $p = .272$). Der große Mittelwerts-Unterschied (1774.1 vs. 2412.7) ist auf eine Person (MW-RT = 6130.3 ms) zurückzuführen. Exkludiert man diese Person aus der RT-Berechnung resultiert eine mittlere Reaktionszeit von 1887.3 Sekunden (SD = 636.1 S.)

Die relativen Reaktionszeiten niedrig- und hoch-impulsiver Versuchspersonen in den 4 Versuchsbedingungen und 2 Verhaltensbedingungen sind Tabelle 1 zu entnehmen, die absoluten mittleren Reaktionszeiten sind in Tabelle 2 zu finden.

Die ANOVA für die relative Reaktionszeit in Abhängigkeit von den Attributen der verzögerten Belohnung ergab einen hoch-signifikanten Haupteffekt für *Höhe*, mit schnelleren RTs bei hohen Belohnungen ($F(1, 16) = 13.5$, $p < .01$) und einen hoch-signifikanten Wechselwirkungseffekt *Höhe*Gruppe* ($F(1, 16) = 22.5$, $p < 0.001$). Die niedrig-impulsiven Personen zeigten einen signifikant größeren Höhe-Effekt als die hoch-impulsiven Personen (s. Abb. 8).

Die ANOVA für die relative Reaktionszeit in Abhängigkeit vom Wahlverhalten ergab einen hoch-signifikanten Wechselwirkungseffekt *Wahlverhalten*Impulsivität* ($F(1, 16) = 18$, $p < 0.01$). Abbildung 9 zeigt die relativen RTs bei unterschiedlichem Wahlverhalten, bei niedrig- und hoch-impulsiven Versuchspersonen. Niedrig-impulsive zeigten erhöhte RTs bei Wahl der unmittelbaren Belohnung (+20 %), hoch-impulsive erhöhte RTs bei Wahl der verzögerten Belohnung (+10 %).

		<i>niedrig-impulsiv</i>		<i>hoch-impulsiv</i>	
		MW	SD	MW	SD
relRT	niedrig_kurz	.11	.13	.06	.12
	niedrig_lang	.20	.14	-.10	.11
	hoch_kurz	-.19	.17	-.01	.22
	hoch_lang	-.12	.05	.04	.22
	Wahl_unmittelbare Belohnung	.20	.11	-.01	.05
	Wahl_verzögerten Belohnung	-.05	.07	.10	.15
Wahl - verzögert	niedrig_kurz	58 %	22 %	19 %	15 %
	niedrig_lang	14 %	14 %	0 %	1 %
	hoch_kurz	100 %	0 %	73 %	26 %
	hoch_lang	100 %	1 %	23 %	36 %

Tab. 1: **relRT** - relative Durchschnittsreaktionszeiten niedrig- und hoch-impulsiver Versuchspersonen in den vier Versuchsbedingungen und zwei Verhaltensbedingungen. Die Zahlen sind als Anteil an der Gesamt-RT zu interpretieren. Z.B. bedeutet -.20, dass die RT in dieser Bedingung um 20 % geringer ist als im Durchschnitt; **Wahl - verzögert** - relative Häufigkeit der Wahl der verzögerten Belohnung niedrig- und hoch-impulsiver Versuchspersonen, in den vier Versuchsbedingungen.

		<i>niedrig-impulsiv</i>		<i>hoch-impulsiv</i>	
		MW	SD	MW	SD
RT (in ms)	Gesamt	1816.2	585	1967.1	727.8
	niedrig_kurz	1942.4	552.5	2032.6	572.7
	niedrig_lang	2188.2	949.8	1757.5	731.4
	hoch_kurz	1493.9	510.4	1921.8	831.6
	hoch_lang	1640.5	498.1	2156.6	1103.1
	Wahl_unmittelbare Belohnung	2163.3	1000.8	1923.1	740.5
	Wahl_verzögerten Belohnung	1675.2	572.2	2144.3	798

Tab. 2: Mittlere Reaktionszeiten (RT), niedrig- und hoch-impulsiver Versuchspersonen, gesamt sowie getrennt für die vier Versuchsbedingungen und zwei Verhaltensbedingungen. Die höchste mittlere RT (6130.3 ms) wurde entfernt, um ein unverzerrtes Bild der RTs zu vermitteln.

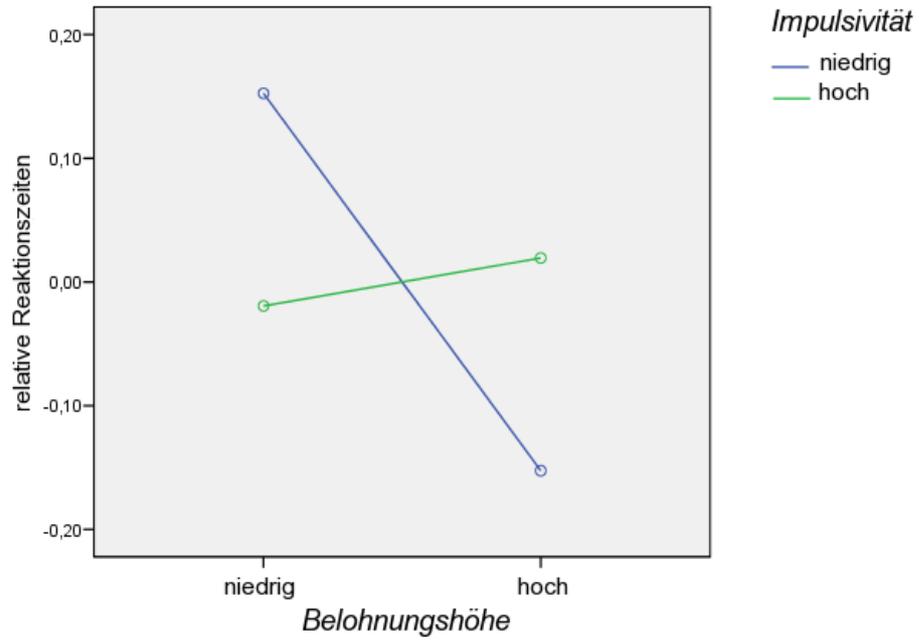


Abb. 8: relative Reaktionszeiten (relRT) hoch- und niedrig-impulsiver bei niedriger und hoher Belohnungshöhe. Prozentuelle Angabe der Abweichung von der durchschnittlichen Reaktionszeit.

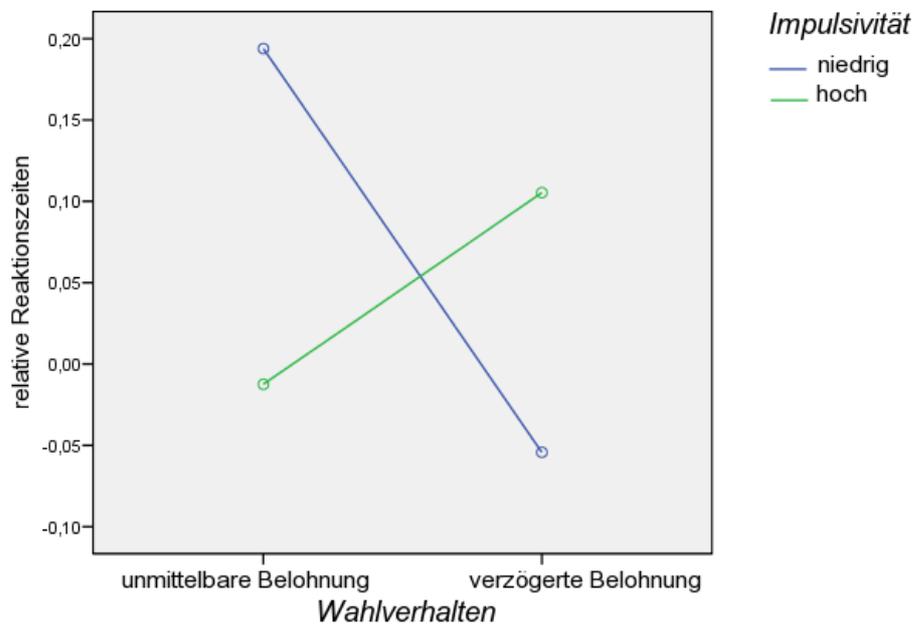


Abb. 9: relative Reaktionszeiten (relRT) hoch- und niedrig-impulsiver bei Wahl der unmittelbaren vs. verzögerten Belohnung. Prozentuelle Angabe der Abweichung von der durchschnittlichen Reaktionszeit.

8.2 Elektrophysiologische Daten

Die visuelle Inspektion der Skalp-Topographien ergab eine maximale Negativierung über frontalen Elektroden-Positionen, mit einer Tendenz in Richtung linke Hemisphäre. Dieses frontale Minimum war in den Grand Averages aller Bedingungen und Impulsivitäts-Gruppen gleichermaßen erkennbar. In Abbildung 10 erkennt man die P3, eine frühe Positivierung zwischen 250 und 500 ms nach Stimulus-Onset, über posterioren Elektroden (rot). Ab ca. 700 ms kann man eine Negativierung über anterioren (frontalen) Elektroden erkennen (blau), bei zunehmender Deaktivierung an posterioren Elektroden.

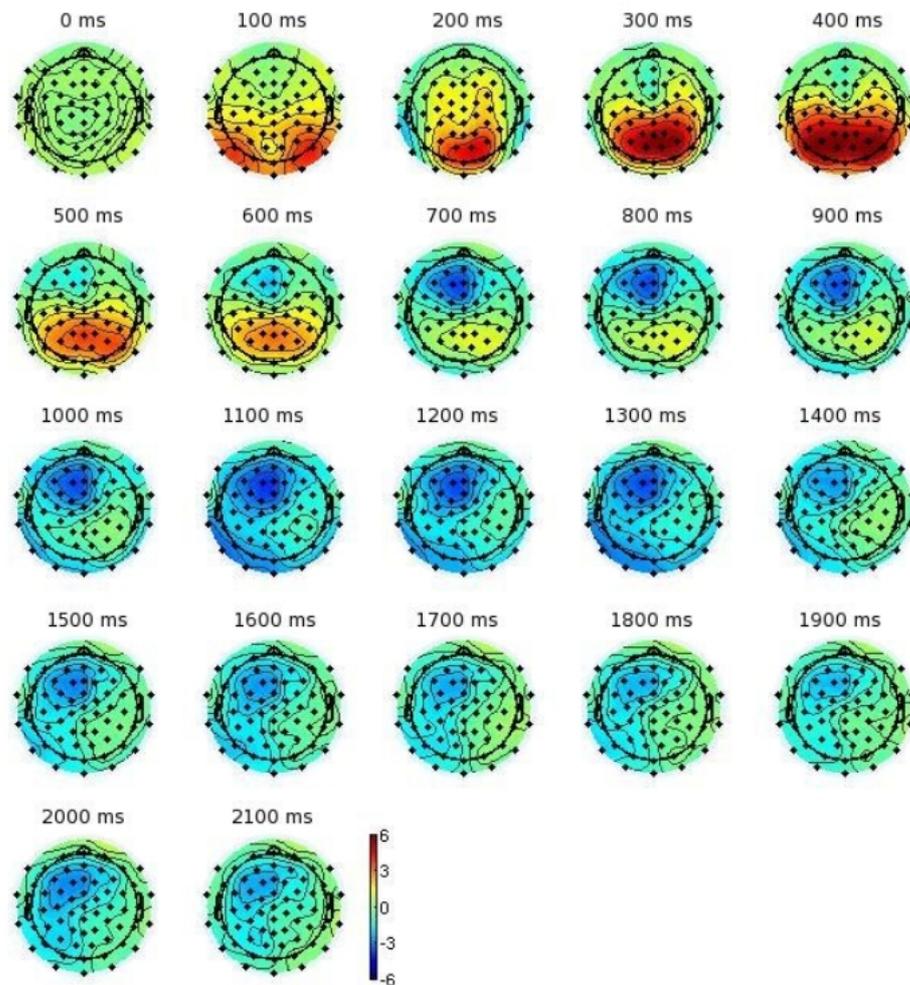


Abb. 10: Skalp-Topographien der Bedingung hoch_kurz (exemplarisch) für die Zeitpunkte 0 bis 2100 ms in 100ms-Schritten (stimulus-locked).

8.2.1 Analyse 1: Belohnungsattribute

Abbildung 11 zeigt die GrandAverages an den Elektroden FCz und FC3, in den 4 Versuchsbedingungen (*niedrig_kurz*, *niedrig_lang*, *hoch_kurz*, *hoch_lang*), für alle Personen. In Abbildung 12 sind die Grand Averages getrennt für hoch- und niedrig-impulsive Personen zu erkennen. Zur Erinnerung, die Versuchspersonen mussten sich entscheiden zwischen € 10 nach dem Experiment und einer höheren verzögerten Belohnung, die zwischen den Bedingungen variiert wurde: € 11 - € 16 mit einer Verzögerung von 1-5 Wochen (*niedrig_kurz*), € 11 - € 16 mit einer Verzögerung von 12 -16 Wochen (*niedrig_lang*), € 25 - € 30 mit einer Verzögerung von 1-5 Wochen (*hoch_kurz*), € 25 - € 30 mit einer Verzögerung von 12 -16 Wochen (*hoch_lang*). Ab ca. 700 ms nach Stimulus-Onset sind deutliche Unterschiede zwischen den Bedingungen erkennbar.

Die ANOVA für die SCP-Amplitude in Abhängigkeit von den Attributen der verzögerten Belohnung ergab einen hoch-signifikanten Haupteffekt *Verzögerung* ($F(1,16)=9.1$, $p<0.01$; Abb. 13), mit einer stärkeren Negativierung für kurze Verzögerungen, ein tendenziell-signifikanten Wechselwirkungseffekt *Höhe*Gruppe* ($F(1,16)=4.2$, $p=0.058$; Abb. 14), mit einem tendenziell stärkeren Höhe-Effekt bei niedrig-impulsiven Personen, sowie ein hoch-signifikanter Wechselwirkungseffekt *Zeitintervall*Höhe* ($F(1,16)=6.7$, $p<0.01$; Abb. 15). Post-hoc Tests (Tukey HSD) ergaben, dass ein signifikanter Höhe-Effekt nur für das letzte Zeitintervall (1700 – 2200 ms) besteht ($p<0.01$). Die SCP-Amplitude ist bei hohen Beträgen signifikant kleiner als bei niedrigen Beträge im Intervall 3 ($p<0.01$), und zudem signifikant kleiner als bei hohen ($p<0.05$) und niedrigen Beträge ($p<0.01$) im Zeitintervall 1 und niedrigen Beträge im Zeitintervall 2 ($p<0.05$).

Es zeigte sich also ein *Verzögerungs*-Effekt über alle Zeitintervalle (700 – 2200 ms), mit einer stärkeren Negativierung für kurze Verzögerungen, und ein *Höhe*-Effekt im letzten Intervall (1700 – 2200 ms), mit einer stärkeren Negativierung für niedrige Beträge. Abbildungen 16 und 17 veranschaulichen getrennt für niedrig- und hoch-impulsive Versuchspersonen den Effekt von Höhe und Verzögerung auf die SCP-Amplitude.

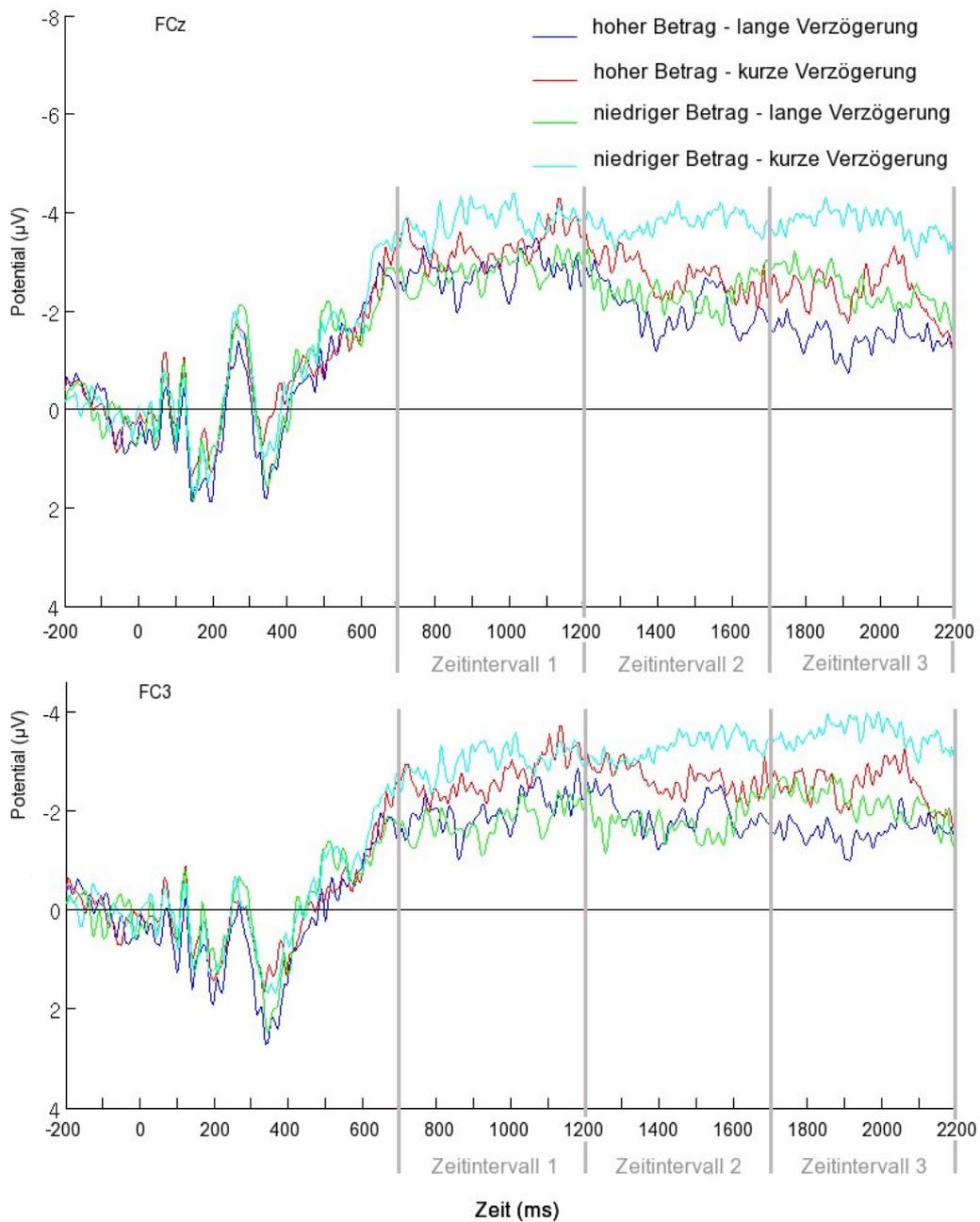


Abb. 11: Grand-average EEPs an FCz und FC3 für alle Versuchspersonen, ausgelöst durch Unterschiede in der verzögerten Belohnung, bzgl. Belohnungshöhe- und Verzögerung (Baseline von -200 bis 0 ms, Stimulus-onset bei 0 ms). Die grauen vertikalen Linien markieren die drei analysierten Zeitfenster (SCPs). **Mean RTs:** *niedrig_kurz* = 1984.9 ms; *niedrig_lang* = 1985.5 ms; *hoch_kurz* = 1695.3 ms; *hoch_lang* = 1883.4 ms

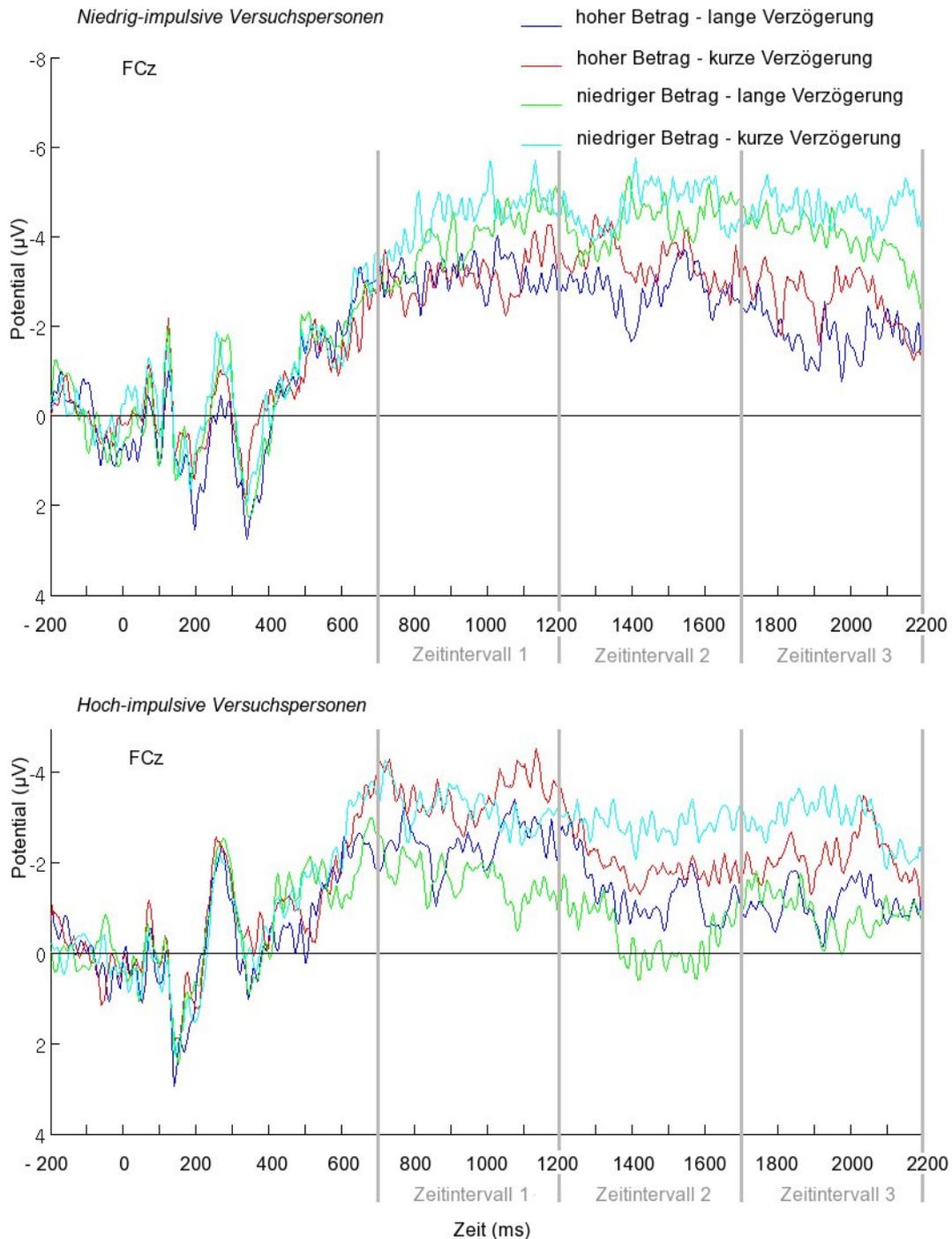


Abb. 12: Grand-average EEPs getrennt für niedrig-impulsive (oben) und hoch-impulsive Versuchspersonen (unten), ausgelöst durch Unterschiede in der verzögerten Belohnung, bzgl. Belohnungshöhe- und Verzögerung (Baseline von -200 bis 0 ms, Stimulus-onset bei 0 ms). Die grauen vertikalen Linien markieren die drei analysierten Zeitfenster (SCPs). **Mean-RTs niedrig-impulsive:** *niedrig_kurz* = 1942.5 ms; *niedrig_lang* = 2188.2 ms; *hoch_kurz* = 1493.9 ms; *hoch_lang* = 1640.5 ms. **Mean-RTs hoch-impulsive:** *niedrig_kurz* = 2032.67 ms; *niedrig_lang* = 1757.5 ms; *hoch_kurz* = 1921.9 ms; *hoch_lang* = 2156.6 ms.

Amplituden-Abbildungen (mittlere SCP-Amplituden der einzelnen Faktorstufen)

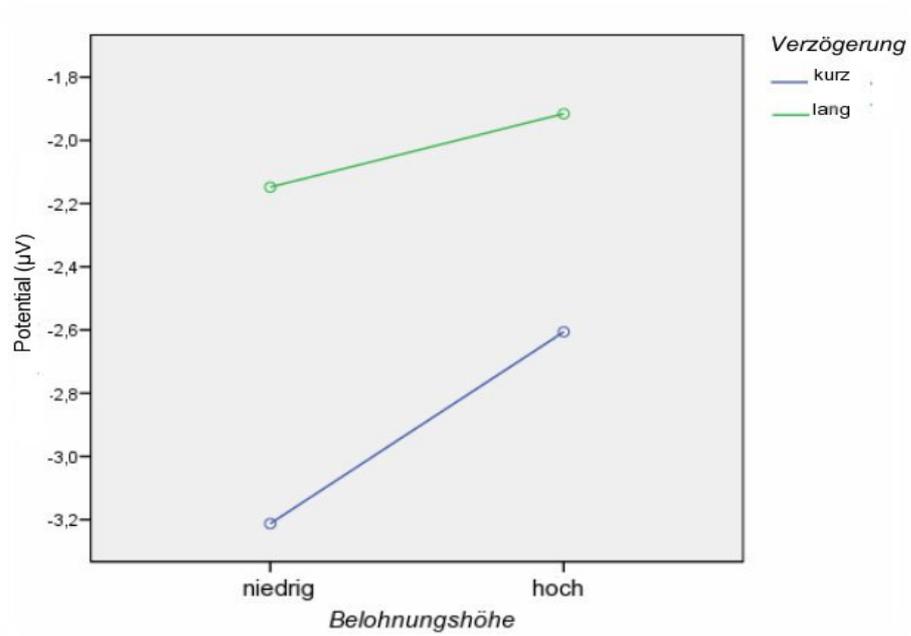


Abb. 13: Höhe * Verzögerung (Haupteffekt Verzögerung sign. $p < 0.01$)

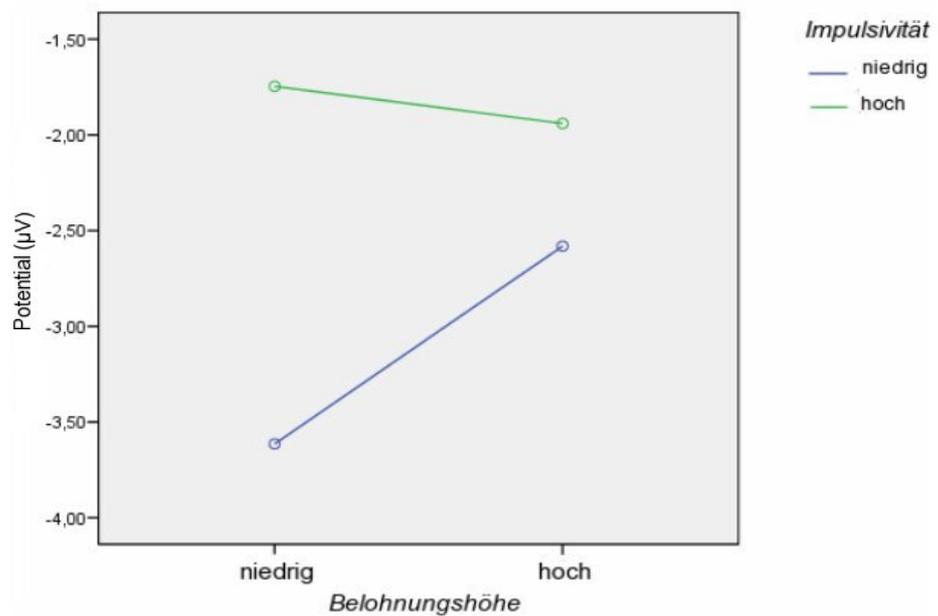


Abb. 14: Wechselwirkungseffekt Höhe*Gruppe (n.s. $p = 0.058$)

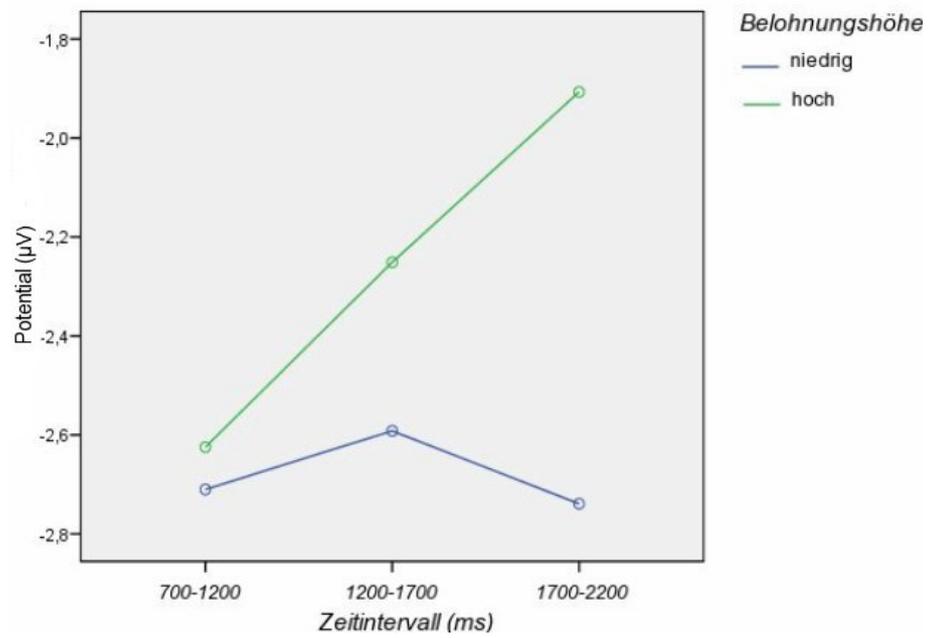


Abb. 15: Wechselwirkungseffekt Zeitintervall*Höhe (sign. $p < 0.01$)

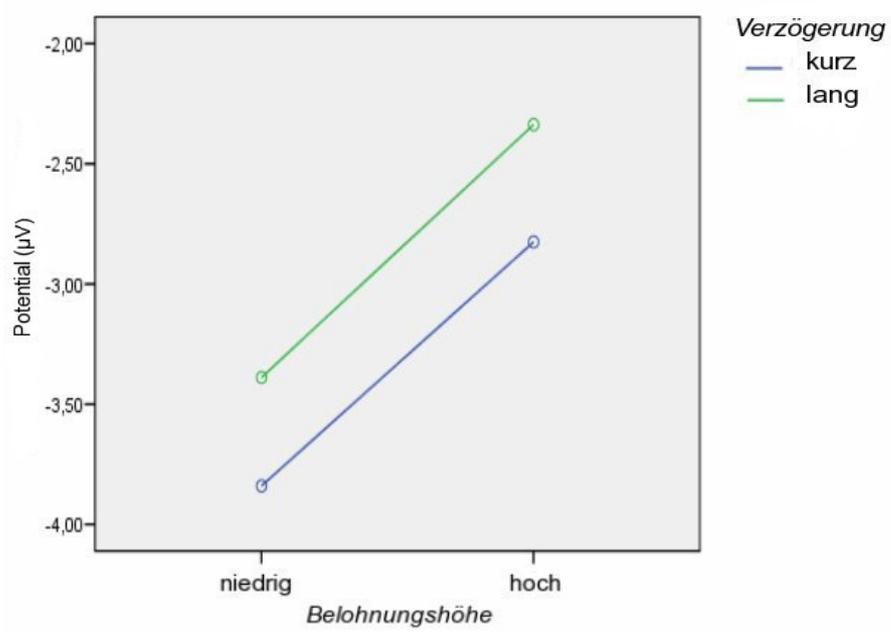


Abb. 16: Höhe*Verzögerung – niedrig-impulsive Versuchspersonen

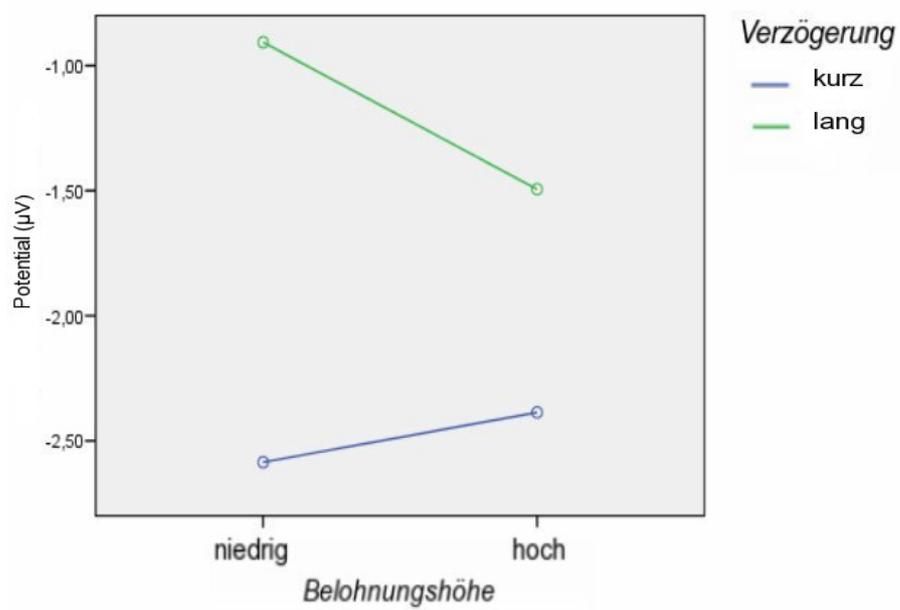


Abb. 17: Höhe*Verzögerung – hoch-impulsive Versuchspersonen

8.2.2 Analyse 2: Entscheidungsverhalten

Abbildung 18 zeigt die GrandAverages an FCz, bei der Wahl der unmittelbaren Belohnung vs. Wahl der verzögerten Belohnung, getrennt für hoch- und niedrig-impulsive Versuchspersonen.

Die ANOVA für die SCP-Amplitude in Abhängigkeit vom Wahlverhalten ergab einen tendenziell signifikanten Haupteffekt *Wahlverhalten* ($F(1,16)=3.9$, $p=0.064$), mit einer tendenziell negativeren Amplitude für die Wahl der verzögerten Belohnung), und einen signifikanten Wechselwirkungseffekt *Wahlverhalten*Impulsivität* ($F(1,16)=6.6$, $p<0.05$), mit einem stärkeren Wahlverhalten-Effekt für hoch-impulsive Personen.

Post-hoc Tests (Tukey HSD) ergaben jedoch nicht-signifikante Unterschiede zwischen der Wahl der unmittelbaren Belohnung einerseits und der Wahl der verzögerten Belohnung andererseits bei hoch- und niedrig-impulsiven Versuchspersonen ($p=0.28$).

8.2.3 Quellenlokalisierung

Alle Inner-Subjekt-Vergleiche sind nicht signifikant, es zeigten sich keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Variation der späteren Belohnung und in Abhängigkeit vom Entscheidungsverhalten. Die Quellenlokalisierung der SCP-Unterschiede kann somit nicht erfolgen.

Abbildung 19 zeigt die maximale Aktivierung, exemplarisch in der Versuchsbedingung *niedrig_kurz* (niedrige Belohnungshöhe – kurze Belohnungsverzögerung) über die drei Zeitintervalle. Tabelle 3 gibt für jede Versuchsbedingung und für jedes Zeitintervall die drei Areale wieder, die am stärksten aktiviert waren.

Aktivierungs-Unterschiede zwischen den Impulsivitätsgruppen waren nur in der Bedingung *niedrig_lang* (niedrige Belohnungshöhe – lange Belohnungsverzögerung) signifikant (Tab. 4), mit einer stärkeren Aktivierung bei niedrig-impulsiven Versuchspersonen im Temporalen Lobus (superioren temporalen Gyrus – BA22) und der Insula (BA13) im Zeitintervall 2 (1200-1700 ms) und Insula (BA13) im Zeitintervall 3 (1700-2200 ms). Abbildung 20 zeigt die signifikanten Aktivierungsunterschiede in der Bedingungen *niedrig_lang* zwischen niedrig- und hochimpulsiven Versuchspersonen.

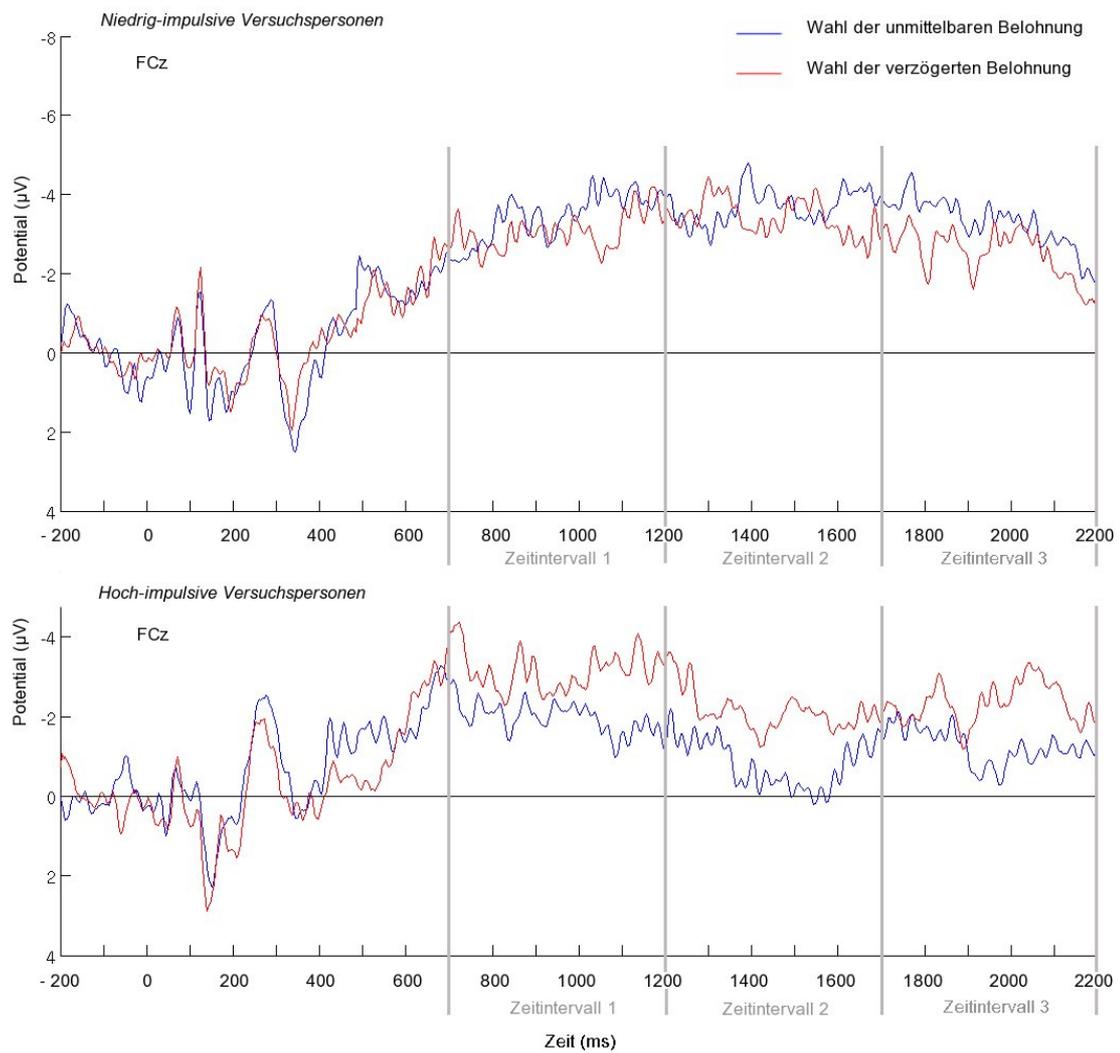
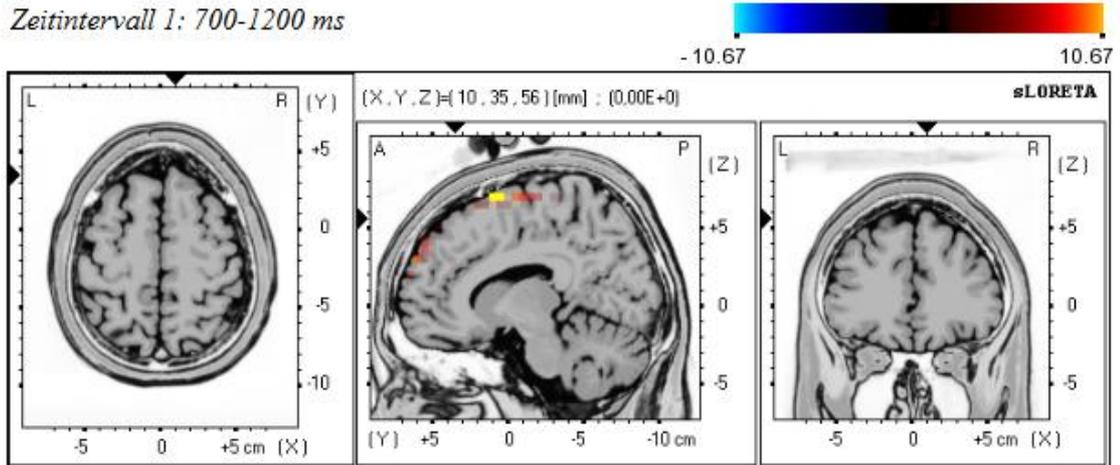
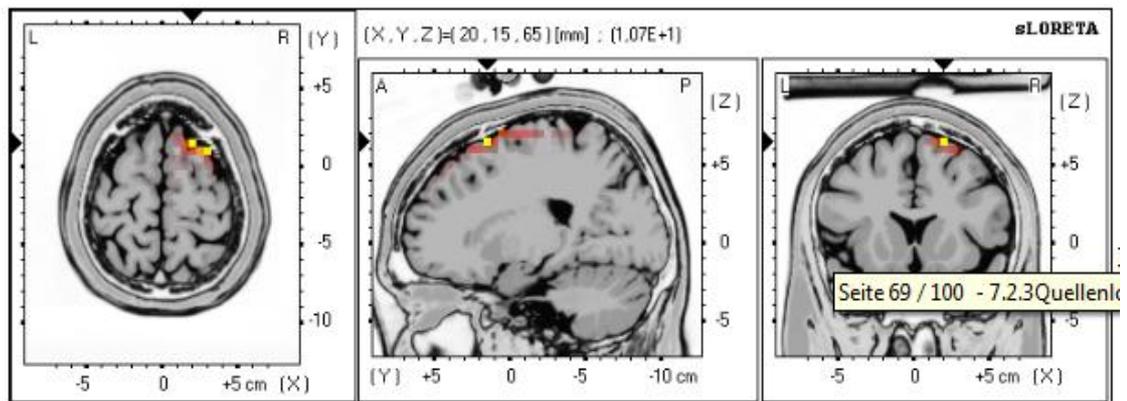


Abb. 18: Grand-average EEPs getrennt für niedrig-impulsive (oben) und hoch-impulsive Versuchspersonen (unten), ausgelöst durch Wahl der unmittelbaren vs. Wahl der verzögerten Belohnung (Baseline von -200 bis 0 ms, Stimulus-onset bei 0 ms). Die grauen vertikalen Linien markieren die drei analysierten Zeitfenster (SCPs).

Zeitintervall 1: 700-1200 ms



Zeitintervall 2: 1200-1700 ms



Zeitintervall 3: 1700-2200ms

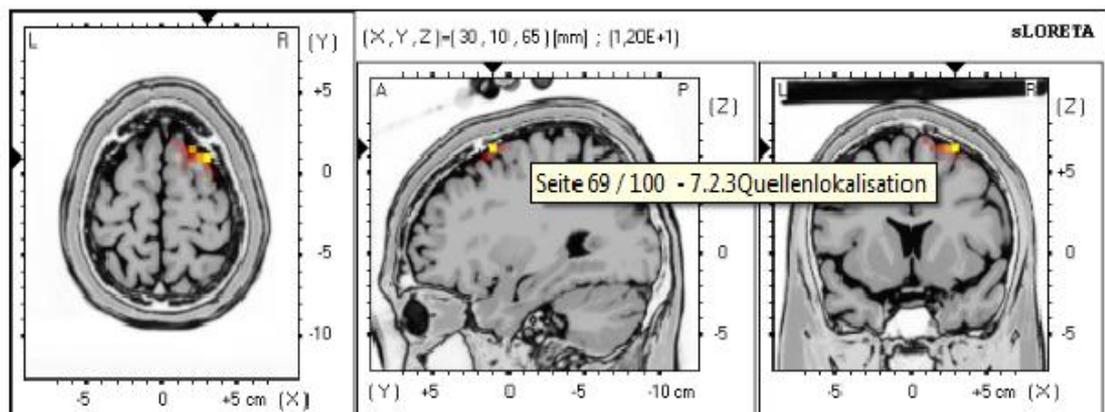


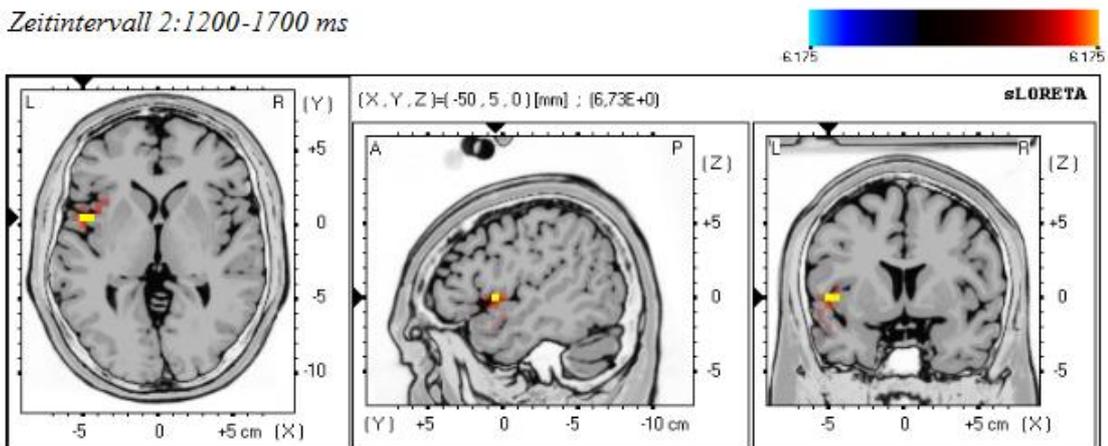
Abb. 19: Aktivierungsmaxima in LORETA in der Versuchsbedingung **niedrig_kurz** (niedrige Belohnungshöhe – kurze Belohnungsverzögerung) über die drei Zeitintervalle. Die Aktivierungsmaxima in den anderen Versuchsbedingungen sind vergleichbar, unterscheiden sich nicht-signifikant.

		X(MNI)	Y(MNI)	Z(MNI)	X(TAL)	Y(TAL)	Z(TAL)	Voxelval	BA	Lobe	Structure
B1	Intervall 1	10	10	70	10	13	64	10,8	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		10	60	30	10	60	25	10,1	10	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		5	55	40	5	55	34	9,61	9	Frontal Lobe	Medial Frontal Gyrus
	Intervall 2	20	15	65	20	18	59	10,7	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		30	10	65	30	13	59	10,6	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		15	45	50	15	46	44	9,65	8	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
	Intervall 3	30	10	65	30	13	59	12	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		20	15	65	20	18	59	11,7	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		15	45	50	15	46	44	10,9	8	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
B2	Intervall 1	-15	10	70	-15	13	64	12,5	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		-25	20	60	-25	22	54	11,7	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		10	60	30	10	60	25	10,8	10	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
	Intervall 2	20	5	70	20	8	64	10,8	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		25	10	65	25	13	59	10,6	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		45	-5	60	45	-2	55	9,07	6	Frontal Lobe	Precentral Gyrus
	Intervall 3	20	5	70	20	8	64	12	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		25	10	65	25	13	59	11,3	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		15	-35	70	15	-31	66	9,39	4	Frontal Lobe	Precentral Gyrus
B3	Intervall 1	10	10	70	10	13	64	10,6	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		-5	-25	70	-5	-21	66	9,38	6	Frontal Lobe	Medial Frontal Gyrus
		-10	-20	70	-10	-16	65	8,68	6	Frontal Lobe	Precentral Gyrus
	Intervall 2	20	5	70	20	8	64	11,2	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		20	10	65	20	13	59	10,2	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		10	-55	70	10	-50	67	9,37	7	Frontal Lobe	Postcentral Gyrus
	Intervall 3	20	5	70	20	8	64	11,1	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		20	10	65	20	13	59	10,5	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		-10	-60	70	-10	-55	67	10,2	7	Parietal Lobe	Postcentral Gyrus
B4	Intervall 1	10	10	70	10	13	64	10,6	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		-5	-25	70	-5	-21	66	9,38	6	Frontal Lobe	Medial Frontal Gyrus
		15	10	65	15	13	59	9,3	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
	Intervall 2	20	5	70	20	8	64	11,2	6	Frontal Lobe	Superior Frontal Gyrus
		20	10	65	20	13	59	10,2	6	Frontal Lobe	Middle Frontal Gyrus
		10	-55	70	10	-50	67	9,37	7	Parietal Lobe	Postcentral Gyrus

Tab. 3: Die drei am stärksten aktivierten Areale in den vier Versuchsbedingungen (B1: niedrig-kurz, B2: niedrig-lang, B3: hoch-kurz, B4: hoch-lang) und drei Zeitintervallen (Intervall 1: 700-1200ms, Intervall 2: 1200-1700ms, Intervall 3: 1700-2200ms). MNI-Koordinaten (X(MNI), Y(MNI), Z(MNI)), Talairachkoordinaten (X(TAL),Y(TAL),Z(TAL)), Brodmanareal (BA), Voxelvalue gibt t-Wert für Aktivierung an

Niedrig- vs. hoch-impulsive Versuchspersonen: Bedingung niedrig_lang

Zeitintervall 2: 1200-1700 ms



Zeitintervall 3: 1700-2200 ms

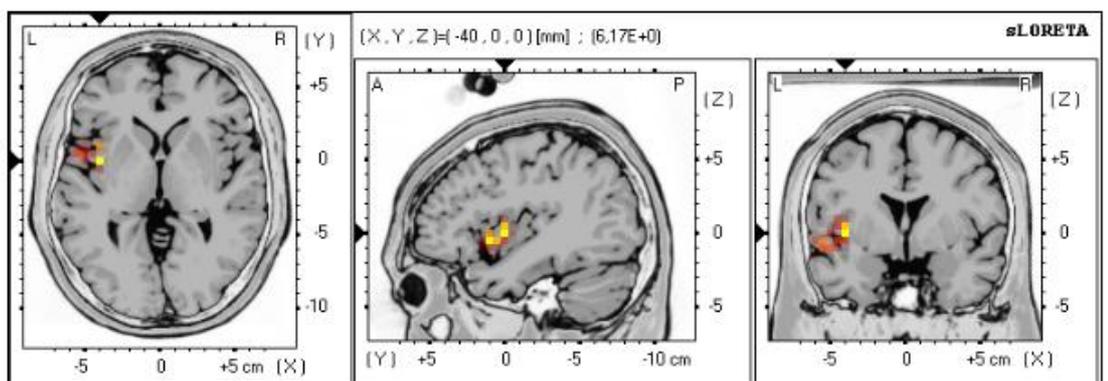


Abb. 20: Signifikante Aktivierungs-Unterschiede zwischen niedrig- und hoch-impulsiven Versuchspersonen in der Bedingung **niedrig_lang**. Niedrig-impulsive zeigten eine signifikant stärkere Aktivierung im Temporallappen und der Insula als hoch-impulsive.

	X(MNI)	Y(MNI)	Z(MNI)	X(TAL)	Y(TAL)	Z(TAL)	VoxelValue	BA	Lobe	Structure
Intervall 2	-50	5	0	-50	5	0	6,7	22	Temporal Lobe	Superior Temporal Gyrus
	-45	5	0	-45	5	0	6,7	13	Sub-lobar	Insula
	-35	15	-5	-35	14	-5	6,4	13	Sub-lobar	Insula
Intervall 3	-40	0	0	-40	0	0	6,2	13	Sub-lobar	Insula

Tab. 4: Signifikant stärkere Aktivierung bei niedrig-impulsiven als bei hoch-impulsiven Versuchspersonen in der Bedingung **niedrig_lang**, in den Zeitintervallen 2 (1200-1700ms) und 3 (1700-2200ms). Die Grenze des t-Wertes (VoxelValue) ab dem ein Voxel signifikant wird beträgt 6.16 ($p=0.05$). MNI-Koordinaten (X(MNI), Y(MNI), Z(MNI)), Talairachkoordinaten (X(TAL),Y(TAL),Z(TAL)), Brodmanareal (BA), Voxelvalue gibt t-Wert für Aktivierung an

9. Diskussion

In dieser Studie wurde das Phänomen der Zeitdiskontierung (Entwertung verzögerter Belohnungen) erstmals mittels EEG untersucht, mit dem Ziel die Sensitivität *Langsamer Hirnpotentiale (SCPs)* für verschiedene Belohnungsattribute (Höhe und Verzögerung) und Entscheidungsverhalten (impulsiv vs. bedürfnisaufschiebend) zu analysieren.

Die Ergebnisse der Studie liefern einen Einblick in die Sensitivität der SCPs für die Belohnungsattribute (vornehmlich für die Belohnungsverzögerung) im Kontext der Zeitdiskontierung, sowie in elektrophysiologische interindividuelle Unterschiede in Abhängigkeit von der Impulsivität der Versuchspersonen. Die Quellenlokalisierung der SCPs ergab keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Die fMRT-Ergebnisse von Ballard und Knutson (2009), McClure et al. (2004), bezüglich der Lokalisation diskontierungsrelevanter kognitiver Prozesse konnten somit nicht repliziert werden.

Die Diskontierung der verzögerten Belohnung (Impulsivität) schwankte stark über die Personen, und unterschied sich massiv zwischen den niedrig- und hoch-impulsiven Personen. Die Häufigkeiten der Wahl der verzögerten Belohnung über die vier Bedingungen zeigten, dass sich sowohl niedrig- als auch hoch-impulsive in ihrer Wahl von beiden Belohnungsattributen (Höhe und Verzögerung) beeinflussen ließen, beide in ihr Urteil integrierten. Die Belohnungshöhe hatte generell einen stärkeren Effekt auf das Wahlverhalten, und hoch-impulsive reagierten in Hinblick auf die Wahl der verzögerten Belohnung sensibler auf Unterschiede in Belohnungshöhe und -Verzögerung.

Hoch-impulsive Versuchspersonen wählten bei niedrigen Beträgen und bei langer Verzögerung kaum die verzögerte Belohnung. Nur bei hohen Beträgen mit kurzer Verzögerung wählten sie überwiegend die verzögerte Belohnung. In ihren Reaktionszeiten zeigten sie kaum Sensitivität für Belohnungshöhe und lediglich eine Beschleunigung der RTs bei niedriger Belohnungshöhe und langer Verzögerung. Letzteres ist nahe liegend, da ihnen die Ablehnung der verzögerten Belohnung hier besonders leicht fiel. Trials, in denen eine hohe Belohnung mit relativ kurzer Verzögerung verfügbar war, widersprachen ihrem generellen Antwortmuster (Wahl der unmittelbaren Belohnung), daher waren hier auch keine beschleunigten RTs erkennbar. Bei Wahl der verzögerten Belohnung zeigten sie langsamere RTs.

Niedrig-impulsive Versuchspersonen wählten bei hoher Belohnungshöhe so gut wie immer die verzögerte Belohnung, ließen sich nur bei niedriger Belohnungshöhe von der Verzögerung beeinflussen. Ihre Reaktionszeiten waren v.a. sensitiv für Belohnungshöhe, mit beschleunigten RTs bei hoher Belohnungshöhe, und verlangsamten RTs bei niedriger Belohnungshöhe. Des Weiteren waren sie langsamer bei Wahl der unmittelbaren Belohnung.

Langsame Potentiale (SCPs)

Es zeigte sich wie erwartet eine maximale Negativierung über frontalen, zentralen Elektroden-Positionen (ab ca. 700 ms, post-stimulus), in Einklang damit, dass der Frontalcortex zentral für intertemporale Entscheidungsfindung ist (McClure et al., 2004a; Xu et al., 2009). Auch Diener et al. (2010) fand in einem S1-S2-Paradigma an Cz das Amplituden-Maxima der PINV. Die Größe einer negativen SCP-Amplitude kann als Stärke der neuronalen Aktivierung interpretiert werden (Sabatinelli et al., 2007; He et al., 2008; Khader et al., 2008; Nagai et al., 2004).

Die Quellenlokalisierung mittels SLORETA ergab Aktivierungsmaxima in BA 4 (frontal - präzentral), BA 6 (superior frontal), BA 7 (frontal – postzentral), BA 8 (superior frontal), BA 9 (medial frontal), BA 10 (superior frontal). Die hier gefundenen Areale weisen augenscheinlich große Ähnlichkeit mit jenen bei Diener et al. (2010) gefundenen Maxima auf (BA 6, 7, 9, 10), wobei über die Ursache hierfür nur spekuliert werden kann, da die verwendeten Aufgaben (Paradigmen) sehr unterschiedliche sind. Der kleinste gemeinsame Nenner ist vermutlich, dass in beiden Paradigmen Reaktionskonflikte auftreten und je nach Versuchsbedingung unterschiedliche Ressourcenanforderungen bestehen, die ein unterschiedliches Maß an Aufmerksamkeits- und anderen kognitiven Ressourcen mobilisieren.

Frontale Areale sind in einer Vielzahl von Prozessen involviert, die zentral für Entscheidungsfindung sind: Updating und Manipulation von Information, kognitive Flexibilität, Reaktionshemmung, Aufmerksamkeitsmodulation, Emotionsverarbeitung u.a. (Diener et al., 2010). Daher ist es nicht verwunderlich, dass diese sowohl in der vorliegenden Studie als auch in jener von Diener et al. (2010) am stärksten aktiviert waren.

In den Grand Averages waren keine Bedingungs-Unterschiede in Bezug auf die schnellen EKPs (z.B. N2, P3) erkennbar, nur in den langsamen Potentialen (SCPs) zeigten sich Unterschiede. Über den gesamten Zeitbereich (700 bis 2200 ms post-stimulus) zeigte sich eine stärkere Negativierung bei kurz verzögerten Belohnungen relativ zu lange verzögerten

Belohnungen. Eine stärkere Negativierung bei niedriger relativ zu hoher Belohnungshöhe zeigte sich hingegen nur im letzten Zeitintervall, 1700 bis 2200 ms, post-stimulus.

Der SCP-Unterschied in Abhängigkeit von der Belohnungshöhe ist möglicherweise auf die schnelleren mittleren Reaktionszeiten in dieser Bedingung zurückzuführen, die bei 1695 ms (*hoch_kurz*) und 1883 ms (*hoch_lang*) lagen, also am Beginn bzw. der Mitte des 3. Zeitintervalles. Nach erfolgter Reaktion ist der Entscheidungsfindungsprozess abgeschlossen und ein Rückgang der mit Aufgabenschwierigkeit assoziierten SCP-Amplitude nahe liegend. Auf der anderen Seite ist es fragwürdig, ob der Belohnungs-Evaluationsprozess wirklich exakt mit der Reaktion abgeschlossen ist, und ob nicht auch Nachentscheidungs-Evaluations-Prozesse stattfinden.

Der SCP-Unterschied in Abhängigkeit von der Verzögerungsdauer ist hingegen zweifelsfrei nicht von den Reaktionszeiten beeinflusst (der Haupteffekt Verzögerungsdauer für die AV Reaktionszeit war nicht signifikant), sondern auf eine unterschiedliche neuronale Verarbeitung. Ballard und Knutson (2009) fanden bei kurz verzögerten Belohnungen eine erhöhte DLPFC-Aktivität, was sie dahingehend interpretierten, dass bei lang verzögerten Belohnungen die Kontroll- und Antizipationsressourcen überlastet seien, es somit zu einer De-Aktivierung käme, eine Interpretation die weiter gestützt wurde durch eine besonders hohe De-Aktivierung bei hoch-impulsiven Personen, deren Kontrollressourcen generell reduziert seien.

Möglicherweise ist auch in der vorliegenden Studie die größere SCP-Amplitude bei kurz verzögerten Belohnungen auf diesen Umstand zurückzuführen, wobei auch eine erhöhte Aufgabenschwierigkeit ins Spiel kommt. Eine erhöhte Aufgabenschwierigkeit besteht, wenn beide Belohnungen eine ähnliche Höhe und Verzögerung aufweisen (Bedingung *niedrig_kurz*; Abb. 11). Ist die verzögerte Belohnung wesentlich höher und nur etwas stärker verzögert als die unmittelbare Belohnung (Bedingung *hoch_kurz*), sollte die Schwierigkeit nur für die hoch-impulsiven Versuchspersonen erhöht sein, da diese generell zur unmittelbaren Belohnung tendieren, durch die hohe, verzögerte Belohnung jedoch in einen Entscheidungskonflikt kommen. Sie wählten nur in dieser Bedingung mehrheitlich die verzögerte Belohnung, bei durchschnittlichen RTs. Die niedrig-impulsiven hingegen zeigen ganz klar schnellere RTs bei hohen Belohnungen.

Tatsächlich zeigt sich der Höhe-Effekt auf die SCP-Amplitude tendenziell nur bei **niedrig-impulsiven** Personen, mit einer Deaktivierung (schwächeren Negativierung) bei hohen Belohnungen, indikativ für geringere Aufgabenschwierigkeit. Die schwächere Diskontie-

rung drückt sich also auch in der SCP-Amplitude aus, dahingehend, dass große, verzögerte Belohnungen im subjektiven Wert weit über der unmittelbaren Belohnung liegen und damit wesentlich attraktiver sind. Daher erfordert es für niedrig-impulsive Personen weniger Ressourcen sich für die verzögerte Belohnung zu entscheiden.

Tendenziell bestätigt sich die Hypothese, dass die SCPs **hoch-impulsiver**, stark diskontierender Personen weniger sensibel für die Höhe der verzögerten Belohnung sind, was mit den Ergebnissen von Ballard und Knutson (2009) korrespondiert. Hoch-impulsive zeigten hier eine schwächere Sensitivität des NAcc für die Höhe der verzögerten Belohnung.

Der SCP-Unterschied zwischen Wahl der verzögerten Belohnung relativ zur Wahl der unmittelbaren Belohnung ist nicht-signifikant, visuell zeigt sich eine Tendenz in Richtung stärkerer Aktivierung bei Wahl der verzögerten Belohnung.

Die stärkere Aktivierung (Negativierung) bei kurzen Verzögerungen ist vermutlich auf die erhöhte Aufgabenschwierigkeit zurück zu führen, da hoch-impulsiven bei langer Verzögerung die Ablehnung der verzögerten Belohnung leichter fällt. Die gleichermaßen erhöhte Aktivierung bei kleinen, kurz verzögerten und großen, kurz verzögerten Belohnungen im Zeitintervall 700 bis 2200 ms (post-stimulus) bedeutet, dass diese nicht einfach erhöhter Selbstkontrolle zu schreiben ist, da bei kleinen, kurz verzögerten Belohnungen v.a. impulsiv entschieden wurde. Vermutlich beanspruchen Trials, in denen kleine, kurz verzögerte Belohnungen verfügbar sind, letztendlich die meisten Ressourcen, da hier die verzögerte Belohnung hinsichtlich Höhe und Verzögerung der unmittelbaren am ähnlichsten ist (€ 10 Heute verglichen mit € 11 bis € 15 in 1 bis 5 Wochen) und somit der größte Entscheidungs-Konflikt resultiert.

In Trials, in denen eine große, kurz verzögerte Belohnung verfügbar ist (€ 10 Heute verglichen mit € 25 bis € 30 in 1 bis 5 Wochen), wählten die hoch-impulsiven v.a. die verzögerte Belohnung. Die höhere Aktivierung in diesen Trials könnte auf einen erhöhten Bedarf an Selbst-Kontroll-Ressourcen zurückzuführen sein. Der geringere subjektive Wert der verzögerten Belohnung in dieser stark diskontierenden Gruppe erfordert mehr Kontrollressourcen, um sich dennoch dafür zu entscheiden, da der subjektive Wert der verzögerten Belohnung dem subjektiven Wert der unmittelbaren Belohnung ähnlicher ist, als es bei den niedrig-impulsiven der Fall ist, die eine wesentlich schwächere Zeitdiskontierung zeigen. Stark verzögerte Belohnungen werden von hoch-impulsiven Personen massiv entwertet und dementsprechend meistens abgelehnt, der Entscheidungskonflikt ist niedrig, was sich in einer kleineren SCP-Amplitude (also in einer schwächeren Aktivierung) aus-

drückt. Je nach Versuchsbedingung und Impulsivitätsgruppe wurden unterschiedliche kognitive Ressourcen beansprucht, deren neuronale Korrelate in dieser Studie nicht getrennt werden konnten.

Die Höhe der SCP-Amplitude in der vorliegenden Studie kann mit Vorbehalt (s. Kapitel 5) als Indikator für Aufgabenschwierigkeit (Khader et al., 2008), Reaktions-Konflikt (Diener et al., 2010) bzw. Ressourcen-Allokation (Rösler et al., 1997) interpretiert werden. Auch die emotionale Antizipation der verzögerten Belohnung (Belohnungserwartung), die bewirkt, dass auch eine zeitlich verzögerte Belohnung Belohnungscharakter aufweist, fließt möglicherweise in die SCP-Amplitude ein, wobei die Aufgabenschwierigkeit vermutlich einen größeren Einfluss hat, da sie mehrere Prozesse beeinflusst.

Die höchste Aufgabenschwierigkeit besteht wenn beide Belohnungen eine ähnliche Höhe und Verzögerung aufweisen, und dementsprechend werden die meisten Ressourcen mobilisiert, was sich in einer größeren negativen SCP-Amplitude äußert. Auch Diener et al. (2010) fanden bei höherer Reaktions-Unsicherheit eine größere PINV. Das entspricht auch den fMRT-Ergebnissen von Ballard und Knutson (2009) wo die DLPFC-Aktivität bei kurzen Verzögerungen am stärksten war, und jenen von McClure et al. (2004a) wo die DLPFC-Aktivität bei höherer Aufgabenschwierigkeit stärker war.

Im Zeitbereich 700 bis 1700 ms (poststimulus) erzeugen v.a. niedrige Belohnungsverzögerungen eine starke Aktivierung, im Zeitintervall 1700 bis 2200 ms führen höhere Beträge zu einer reduzierten Aktivierung, wobei hier, wie oben angemerkt, die Möglichkeit besteht, dass dieser Unterschied nur auf die schnelleren Reaktionszeiten bei höheren Beträgen zurückzuführen ist. Möglicherweise ist der späte Effekt der Belohnungshöhe zwischen 1700 und 2200 ms (poststimulus) auf die SCP-Amplitude auf eine geringere Nachentscheidungs-Evaluation zurückzuführen, wenn sich niedrig-impulsive zwischen einer kleinen unmittelbaren und einer hohen, verzögerten Belohnung entscheiden mussten.

Problematisch ist, dass in die gemessene EKP-Amplitude Aktivität aus dem gesamten Gehirn eingeht, insbesondere laterale, mediale, dorsale und ventrale Aktivität im Frontal-cortex nicht getrennt werden können, somit in die Messung kognitive Kontrolle, Aufgabenschwierigkeit, Konflikt und Bewertungsprozesse einfließen. Die Amplituden-Höhe kann somit am ehesten als Höhe der erforderlichen bzw. mobilisierten kognitiven Ressourcen (Wertevaluation- und Vergleich, Belohnungs-Antizipation, Selbst-Kontrolle, Aufmerksamkeit) interpretiert werden. Insbesondere zwei Prozesse sind erkennbar, lassen sich je-

doch in ihrer Wirkung auf die SCP-Amplitude nicht trennen. Das ist zum einen die Aufgabenschwierigkeit, die eine erhöhte Aktivierung bei Ähnlichkeit des subjektiven Wertes der beiden Entscheidungsoptionen bewirkt, und zum anderen Selbstkontrolle und Zukunftsplanung bzw. Antizipation der verzögerten Belohnung (DLPFC), welche v.a. bei kurzen Verzögerungen zu einer größeren SCP-Amplitude führen, da hier die Antizipation der verzögerten Belohnung noch eher möglich ist.

Die Höhe des subjektiven Wertes der Belohnung ist nicht in der Aktivierung zu erkennen. Vermutlich ist der Beitrag tiefer gelegener medialer frontaler Areale (MPFC), die konsistent mit Wertkodierung assoziiert werden (Ballard & Knutson, 2009; Kable & Glimcher, 2007), zu den an der Schädeloberfläche gemessenen Potentialschwankungen eher als gering einzustufen. Insbesondere im Vergleich zum Beitrag lateraler frontaler Areale die direkt unter den Elektroden liegen. Darüber hinaus finden eine Vielzahl kognitiver Prozesse (Aufmerksamkeit, Konfliktverarbeitung, kognitive Kontrolle) statt, die eine erhöhte Aktivierung bewirken und damit die SCP-Amplitude beeinflussen.

Quellenlokalisierung

Sämtliche mittels sLORETA (Pascual-Marqui, 2002) analysierten neuronalen Aktivierungs-Unterschiede in Abhängigkeit von der Höhe und der Verzögerung der verzögerten Belohnung, sowie in Abhängigkeit vom Wahl-Verhalten waren nicht signifikant, es war somit nicht möglich, die Ergebnisse von Ballard und Knutson (2009) und McClure et al. (2004a) mittels sLORETA zu replizieren.

Zwischen niedrig- und hoch-impulsiven Personen wurden Unterschiede in der Bedingung *niedrig_lang* (niedrige Höhe, lange Verzögerung) gefunden, mit einer stärkeren Aktivierung bei niedrig-impulsiven Personen im Temporallappen (BA 22) und der Insula (BA 13), wobei kritisch anzumerken ist, dass diese Areale in allen Bedingungen, zu allen Zeitbereichen nicht zu den am stärksten aktivierten Arealen zählten, und die Zuverlässigkeit von sLORETA bei der Erkennung schwächer aktivierter oder tiefer Quellen fragwürdig ist, wenn stärker aktivierte oder oberflächliche Quellen vorhanden sind (Wagner, Fuchs & Kastner, 2004). Unter diesem Vorbehalt sollen die sLORETA-Ergebnisse diskutiert werden.

Die Insula wird oft in Verbindung gebracht mit dem Erleben und der Antizipation aversiver Ereignisse (Paulus, Rogalsky, Simmons, Feinstein & Stein, 2003; Simmons, Matthews, Stein & Paulus, 2004). Erstaunlich ist, dass die Unterschiede in den Reaktionszeiten

zwischen den beiden Gruppen in der Bedingung *niedrig_lang* am höchsten waren, niedrig-impulsive hier deutlich länger brauchten als im Durchschnitt. Möglicherweise hängt die erhöhte Insula-Aktivität bei niedrig-impulsiven Personen damit zusammen, dass diese Bedingung als aversiv erlebt wurde, da sich selbst diese Personen angesichts der hohen Verzögerungen und niedrigen Beträge genötigt fühlten, von ihrer generellen Strategie vernünftig zu handeln ab zukommen und die unerwünschte kleinere, unmittelbare Belohnung zu wählen.

Im Folgenden sollen einige problematische Aspekte der vorliegenden Studie und Implikationen für zukünftige Experimente diskutiert werden. Die Reaktionszeiten der Versuchspersonen schwankten stark, daher waren die EKPs eventuell konfundiert mit motorischen Potentialen, der analysierte Zeitbereich nicht ausschließlich der Zeitdiskontierung und Entscheidungsfindung zuzuordnen (wobei die durchschnittliche Reaktionszeit am Ende des Zeitbereichs lag, und die Konfundierung daher gering ausfallen sollte).

Zukünftige EEG-Studien könnten ein fixes Intervall der Belohnungsevaluation vorgeben, innerhalb dessen noch keine Wahl zu treffen ist (Marco-Pallarés et al., 2010), was jedoch andere Probleme birgt, etwa, dass die Personen früh die Entscheidung treffen und dann gedanklich abschweifen bzw. warten, bis sie sich entscheiden können. Somit wäre dieses fixe Intervall nicht alleine der Entscheidungsfindung zuzuordnen.

Da die Studie mit realen Belohnungen durchgeführt wurde, war die Belohnungshöhe entsprechend begrenzt. Zukünftige Studien sollten sowohl die Belohnungshöhe-Stufen, als auch die Belohnungsverzögerungs-Stufen äquivalent vergrößern, um eine höhere intra-individuelle Variation im Verhalten zu bewirken (etwa wie bei Kable & Glimcher, 2007). So hat die im vorliegenden Experiment verwendete maximale Verzögerung von 16 Wochen auf niedrig-impulsive Versuchspersonen nur einen geringfügig größeren Einfluss als 5 Wochen. Eine größere Streuung von Verzögerungsdauer und Belohnungshöhe würde auch die Aufgabenschwierigkeit erhöhen und damit eventuell längere Reaktionszeiten bewirken.

Die Instruktion, auf das Fixationskreuz zu fokussieren und nur vorsichtige Augenbewegungen zu machen (um Augenbewegungs-Artefakte und Verunreinigung der Daten zu vermeiden) könnte einen Einfluss auf die Verarbeitungstiefe der präsentierten Information gehabt haben. Diese Problematik wäre nur durch eine Aufgabe wie bei Kable und Glimcher (2007) zu umgehen, wo die variierte Belohnung allein, in der Mitte präsentiert wird. Folgestudien könnten dies ins Auge fassen, wobei hier die Problematik entsteht, dass die nicht-variierte Option im Gedächtnis gehalten werden muss. Ein belastetes Arbeitsgedächtnis

wirkt sich auf Zeitdiskontierung aus (Hinson et al., 2003), wobei die Arbeitsgedächtnis-Anforderungen eher gering sind und möglicherweise vernachlässigt werden können.

Des Weiteren sollte versucht werden, die beteiligten Variablen so gut wie möglich zu trennen. Beispielsweise könnte man den Abstand bzw. das Verhältnis im Wert der unmittelbaren Belohnung und verzögerten Belohnung konstant halten, jedoch den Gesamtwert der Belohnungen variieren, um so EKPs zu identifizieren, die sensibel auf die Belohnungshöhe reagieren.

Folgestudien zu Zeitdiskontierung und Impulsivität könnten die Stärke der individuellen Diskontierung erheben und in Bezug setzen zu schnellen EKPs, wie der ERN ('Error Related Negativity'; (Miltner, Braun & Coles, 1997)) oder P3 (Sutton, Braren & Zubin, 1965) in anderen Untersuchungsparadigmen.

Ruchow, Spitzer, Grön, Grothe und Kiefer (2005) zeigten, dass die ERN bei Personen, die vermehrt impulsiv, übereilt reagieren ('rasche, übereilte Impulsivität' - mangelnde Impulskontrolle) eine reduzierte ERN bei Fehlern aufweisen. Die FRN ('Feedback Related Negativity'), welche auf Feedback folgt, ist bei negativem Feedback ebenfalls reduziert bei hoch-impulsiven Personen, als Ausdruck einer reduzierten Bestrafungssensitivität (Potts, George, Martin & Barratt 2005). Umgekehrt könnte bei positivem monetärem Feedback bzw. Gewinn die FRN bei impulsiven Personen erhöht sein, analog zum erhöhten 'reward prediction error' (Hariri et al., 2006). Würde man die Höhe der individuellen Zeitdiskontierung mit der ERN-Amplitude bei impulsiven Fehlern und der FRN-Amplitude bei positivem monetärem Feedback korrelieren, könnte damit Einblick in die Beteiligung der beiden Impulsivitätsfaktoren, Belohnungssensitivität (gemessen über die FRN) und hastiger, übereilter Impulsivität (gemessen an der ERN) an der Zeitdiskontierung gewonnen werden.

Auch wenn VMPFC, VS/NAcc, PCC konsistent mit Wertkodierung unmittelbarer und verzögerter Belohnung assoziiert werden konnten, ist deren individuelle Bedeutung speziell im Kontext der Zeitdiskontierung noch wenig erforscht. Zukünftige fMRT-Studien könnten etwa der Frage nachgehen, welche Rolle das VS/NAcc in der Zeitdiskontierung spielt, z.B. in dem nur Durchgänge analysiert werden, wo sich der subjektive Wert, die Belohnungshöhe oder Belohnungsverzögerung verändern. Wenn die VS/NAcc-Aktivität im Rahmen der Zeitdiskontierung tatsächlich einem 'reward prediction error' (Hare et al., 2008) entspricht, müsste sie ähnlich sein für Durchgänge bei denen sich nichts verändert, unabhängig vom Wert der Optionen. Bei Erhöhung beispielsweise der Belohnungsverzöge-

rung, verglichen mit Durchgängen, bei denen die Belohnungsverzögerung hoch ist und sich nicht verändert, müsste sich eine De-Aktivierung im VS/NAcc zeigen.

Um die verschiedenen Ansätze (Kapitel 4) zu testen könnte man Entscheidungs-Paare bilden mit identischem subjektivem Gesamtwert, jedoch in einem Paar mit höherer unmittelbarer Belohnung und im anderen Paar mit höherer verzögerter Belohnung. Der Single-Valuation-Ansatz (Kable & Glimcher, 2007) würde eine identische Aktivität in beiden Paaren im MPFC postulieren, der Selbstkontroll- und Dual-Valuation-Ansatz hingegen eine erhöhte DLPFC-Aktivität und reduzierte MPFC bei höherer verzögerter Belohnung, sowie reduzierte DLPFC-Aktivität und erhöhte MPFC bei höherer unmittelbarer Belohnung (Figner et al., 2010), in Abhängigkeit von der Impulsivität der Personen (Ballard & Knutson, 2009).

Schließlich sollte der Frage nachgegangen werden was der MPFC kodiert, die Summe des Wertes zweier Belohnungen (Blair et al., 2006) oder die Differenz im Wert zweier Belohnungen (FitzGerald et al. 2009; Marco-Pallarés et al., 2010).

Die letztlich zentrale Frage, in welchen Gehirn-Arealen die Diskontierung des Belohnung-Wertes in Abhängigkeit von der zeitlichen Verzögerung stattfindet, ist bis Heute nur wenig geklärt. Der (dorso-)laterale Präfrontalkortex ist die Voraussetzung dafür, einen Blick in die Zukunft werfen zu können, um damit zukünftige Belohnungen erleben zu können, als wären sie unmittelbar gegenwärtig (Antizipation). Möglicherweise ist gerade dieser Zeithorizont dafür verantwortlich, wie stark die Diskontierung ausfällt. Eine starke Diskontierung würde somit nicht bedeuten, dass man die Belohnung um die entsprechende Verzögerung diskontiert, sondern, dass man nicht in der Lage ist die Belohnung als solche (emotional) zu erfassen, weil der subjektive Zeithorizont zu stark verkürzt ist, und das Wertsignal (in mesolimbischen Arealen) entsprechend reduziert ist.

10. Conclusio

Die vorliegende Studie liefert einen ersten Einblick in die mit Zeitdiskontierung assoziierten ereigniskorrelierten langsamen Potentiale (SCPs). Die SCPs zeigten sich sensibel für Belohnungsverzögerung und mit Vorbehalt auch sensibel für Belohnungshöhe.

Unterschiede zwischen hoch- und niedrig-impulsiven Versuchspersonen betreffen die elektrophysiologische Sensitivität für die Höhe der verzögerten Belohnung, bzw. für die sich daraus ergebenden Ressourcenanforderungen.

Niedrig-impulsive zeigen wie hoch-impulsive Personen eine Sensitivität für die Verzögerung, darüber hinaus jedoch auch tendenziell eine höherer Sensitivität für die Belohnungshöhe, mit einer schwächeren Aktivierung bei größeren Belohnungen, indikativ für einen hohen subjektiven Wert der verzögerten Belohnung und entsprechend niedrigen Entscheidungskonflikt (da die verzögerte Belohnung wesentlich attraktiver ist). Die von Hoch-Impulsiven gezeigte schwächere Aktivierung bei stark verzögerten Belohnungen ist indikativ für einen geringen subjektiven Wert der verzögerten Belohnung und entsprechend niedrigen Entscheidungskonflikt (da die unmittelbare Belohnung wesentlich attraktiver ist).

Bei hoch-impulsiven Personen sind die verbrauchten kognitiven Ressourcen erhöht (stärkere Negativierung), wenn sie sich für die verzögerte Belohnung entscheiden, bedürfnisaufschiebendes Verhalten zeigen, bei niedrig-impulsiven hingegen nicht, sobald die verzögerte Belohnung einen bestimmten Wert überschreitet (bei hoch-impulsiven liegt dieser Grenzwert vermutlich viel höher und konnte mit der vorliegenden Studie nicht erreicht werden). Niedrig- und hoch-impulsive Personen zeigten erhöhte Ressourcen-Belastung, wenn die beiden Belohnungsoptionen ähnlich sind.

Zukünftige Studien sollten versuchen, die speziell mit der Kodierung des subjektiven Belohnungs-Wertes, der Belohnungshöhe und -Verzögerung assoziierten EKPs zu isolieren.

11. Zusammenfassung/ Abstract

11.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde Zeitdiskontierung (die Entwertung zeitlich verzögerter Belohnungen) erstmals mittels EEG untersucht. Bisherige Studien zum Thema untersuchten das Phänomen mittels fMRT.

In der verwendeten Zeitdiskontierungsaufgabe mussten die Personen eine Wahl treffen zwischen einer konstanten unmittelbaren monetären Belohnung und einer variierten höheren, zeitlich verzögerten monetären Belohnung.

Analysiert wurde das Entscheidungsverhalten (Stärke der Zeitdiskontierung), die Reaktionszeiten und die *Langsamen Hirnpotentiale* (SCPs) in Abhängigkeit von den Attributen der variierten verzögerten Belohnung (kleine vs. große Belohnungen mit kurzer vs. langer Verzögerung), sowie in Abhängigkeit davon, ob die unmittelbare oder die verzögerte Belohnung gewählt worden war. Die SCP-Amplitude in der vorliegenden Studie kann als Indikator für die mobilisierten kognitiven Ressourcen (Aufmerksamkeit, Konfliktverarbeitung, kognitive Kontrolle usw.) interpretiert werden.

Die SCPs (700 bis 2200 ms post-stimulus) zeigten sich in Form einer Negativierung, die das Maximum an frontalen Elektroden erreichte, in Übereinstimmung mit McClure et al., 2004, die eine maximale Aktivierung im lateralen Frontalcortex fanden. Bei kurzer Belohnungsverzögerung war die Negativierung (Aktivierung) über den gesamten Zeitbereich stärker ausgeprägt, als bei langer Belohnungsverzögerung.

Zwischen 1700 und 2200 ms (post-stimulus) zeigte sich eine größere Negativierung bei kleineren verglichen mit größeren Belohnungsbeträgen, wobei kritisch anzumerken ist, dass die Reaktion bei größeren Belohnungen im Durchschnitt bei ca. 1789 ms erfolgte. Daher drückt der Unterschied keine unterschiedliche Belohnungs-Evaluation vor erfolgter Reaktion aus. Nichtsdestotrotz ist die Aktivierung und damit vermutlich die Ressourcenmobilisierung bei größeren Belohnungen insgesamt reduziert.

Entscheidungssituationen, in denen die Wahl zwischen einer unmittelbaren und einer in Höhe und Verzögerung ähnlichen Belohnung zu treffen war, erzeugten den größten Konflikt und damit die stärkste Aktivierung.

Die SCPs niedrig-impulsiver Personen reagierten tendenziell sensitiver auf unterschiedliche Belohnungshöhen, zeigten kleinere SCP-Amplituden (Deaktivierung) bei größeren Belohnungen. Die Entscheidung fiel ihnen hier leicht, was sich auch in den Reaktionszeiten zeigt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liefern neue Einblicke in Zeitverlauf und Form der SCPs im Kontext intertemporaler Entscheidungsfindung. Zukünftige Studien werden notwendig sein, um die Sensitivität der SCPs für den subjektiven Wert verzögerter Belohnungen zu erforschen..

11.2 Abstract

Delay discounting refers to the phenomenon that people often prefer smaller immediate rewards to larger delayed rewards, implicating that they discount the value of a reward depending on the delay of its delivery. The present study investigated delay discounting related brain potentials for the first time, following a series of fMRI-experiments.

Subjects were asked to choose between a fixed monetary reward, available immediately after the experiment, and a varied monetary reward, delayed by a few weeks, while their event-related brain potentials (ERPs) were recorded with electroencephalography (EEG).

Individual strength of discounting, reaction times and *slow cortical potentials* were analysed with regard to sensitivity for amount and delay of the later reward, and individual choice behavior. Individual difference analysis were conducted with strength of discounting (impulsivity) as between group-factor. Subjects who showed a weak discounting of delayed rewards were assigned to the low-impulsive group, subjects who showed a strong delay-discounting were assigned to the high-impulsive group.

SCPs between 700 and 2200 ms (post-stimulus) showed a pronounced negativity (activation) above frontal electrode-sites, consistent with McClure et al. (2004) who reported a maximal discounting-related activation in lateral frontal areas.

SCP-amplitude was higher for short delays, between 700 and 2200 ms, and higher for low amounts, between 1700 and 2200 ms. Since the average RT for high amounts was 1789 ms, the amount-effect on the SCP-amplitude is not due to different reward-evaluation-processes prior to the response. Nevertheless it suggests that neural activation in general was lower for high amounts, and the amount-effect may reflect a reduced post-re-

response-reward-evaluation when subjects had chosen a high, delayed reward. Delayed rewards, in amount and delay similar to the immediate reward caused higher task-difficulty resulting in higher SCP-Amplitudes (higher activation).

Low-impulsive subjects' SCPs by trend appeared to be more sensitive to size of amount, with smaller amplitudes when confronted with high amounts, which shows that their lower discounting is reflected in their brain potentials. RTs are in line with the interpretation that high amounts were associated with lower task difficulty for low-impulsives.

Results of the study on hand give new insight in the time-course of reward evaluation, and provide further evidence for the SCPs to be sensitive to cognitive processes in decision making. However, SCP-amplitude was presumably mainly influenced by task-difficulty (decision conflict) and resource-allocation. Future research will be necessary to reveal the sensitivity of SCPs for subjective value of temporally delayed rewards and specific cognitive processes like cognitive control.

Anhang

A. Versuchspersonen-Instruktion

Liebe/r Teilnehmer/in,

Du wirst im Folgenden die Möglichkeit haben, zwischen zwei Belohnungsoptionen zu wählen:

zwischen 10 €, die unmittelbar nach dem Experiment ausbezahlt werden können, und einem höheren Betrag, der aber erst zu einem späteren Zeitpunkt ausbezahlt wird.

Bitte entscheide Dich mit den Tasten 1 und 3 für eine der zwei Belohnungen. Wenn dir 10 € (heute) lieber sind als etwa 12 € in zwei Wochen, so drücke die Taste 1. Du sollst dir also immer überlegen, welche der beiden Belohnungen du tatsächlich ausbezahlt bekommen möchtest.

Nach dem Experiment wird nämlich aus einem zufällig gezogenen Durchgang deine Wahl ermittelt. Der entsprechende Betrag wird dir entweder gleich nach dem Experiment ausgezahlt, sofern du die frühere Belohnung gewählt hast, oder erst nach einiger Zeit, sofern du die spätere Belohnung gewählt hast.

Auf der nächsten Seite werde ich dir noch etwas zur genauen Bearbeitung erzählen.

Weiter mit LEERTASTE

Du hast für jede Wahl solange Zeit, wie du möchtest. Wichtig ist aber, dass du mit deiner Aufmerksamkeit voll bei der Aufgabe bist, und mit den Augen auf das + in der Mitte des Bildschirms fokussierst, so wenig Augenbewegungen wie möglich machst. Solltest du dich in irgendeiner Form bewegen müssen, dann tue das bitte in den Pausen, die ca. alle 6 Minuten stattfinden. Deren Länge kannst du selbst bestimmen.

V.a. während du die Belohnungen auf dem Bildschirm siehst, sollte keinerlei Bewegung stattfinden. Du hilfst mir damit, saubere Daten zu bekommen und ein erfolgreiches Experiment zu bewerkstelligen.

Weiter mit LEERTASTE

Für die unmittelbare Belohnung drücke bitte die "1", für die spätere die "3". Sobald du gewählt hast, wird deine Wahl durch einen roten Pfeil markiert und es folgt wieder der leere Bildschirm mit einem + in der Mitte.

Zwischen den Wahlen fokussiere bitte auf das + in der Mitte, und versuche, sobald die Optionen kommen, beide zu erfassen, dabei aber so wenig wie möglich die Augen zu bewegen und so gut es geht auf dem + ruhen zu lassen. Priorität hat aber, dass du die beiden Wahloptionen schnell und gut erfasst.

Auf der nächsten Seite folgt ein BEISPIEL, damit du dich auf den Ablauf einstellen kannst (du musst hier nichts drücken).

Weiter mit LEERTASTE

Literatur

- Ainslie G, 1974. Impulse control in pigeons. *J. Exp. Anal. Behav.* 21: 485-489
- Ainslie G, 1975. Specious reward, a behavioral theory of impulsiveness and impulse control. *Psychol. Bull.* 82: 463–496
- Ainslie G, Herrnstein RJ. 1981. Preference Reversal and Delayed Reinforcement. *Animal Learning Behavior* 9(4): 476-82
- Alessi SM, Petry NM. 2003. Pathological gambling severity is associated with impulsivity in a delay discounting procedure. *Behav. Processes* 64 (3): 345–354
- Anderson AK, Christoff K, Stappen I, Panitz D, Ghahremani DG, Glover G, Gabrieli JD, Sobel N. 2003. Dissociated neural representations of intensity and valence in human olfaction. *Nat. Neurosci.* 6: 196 –202
- Baker F, Johnson MW, Bickel WK. 2003. Delay discounting in current and never-before cigarette smokers: Similarities and differences across commodity, sign, and magnitude. *J. Abnorm. Psychol.* 112 (3): 382–392
- Ballard K, Knutson B. 2009. Dissociable neural representations of future reward magnitude and delay during temporal discounting. *Neuroimage* 45: 143–150
- Barratt ES. 1985. Impulsiveness Subtraits: arousal and information processing. In Spence JT, Itard CE. (Eds.). *Motivation emotion and personality. North Holland: Elsevier* 137–146
- Bauer H, Pripfl J, Lamm C, Prainsack C, Taylor N. 2003. Functional neuroanatomy of learned helplessness. *NeuroImage* 20: 927–939

- Benzion U, Rapoport A, Yagil J. 1989. Discount rates inferred from decisions: an experimental study. *Management Sci.* 35: 270-84
- Berns GS, McClure SM, Pagnoni G, Montague PR. 2001. Predictability modulates human brain responses to reward. *Journal of Neuroscience* 21(8): 2739 -2798
- Berns GS, Chappelow J, Cekic M, Zink CF, Pagnoni G, Martin-Skurski ME. 2006. Neurobiological substrates of dread. *Science* 312 (5774): 754-758
- Bickel WK, Odum AL, Madden GJ. 1999. Impulsivity and cigarette smoking: delay discounting in current, never, and ex-smokers. *Psychopharmacology* 146: 447–454
- Bickel WK, Miller ML, Yi R, Kowal BP, Lindquist DM, Pitcock JA. 2007. Behavioral and neuroeconomics of drug addiction: Competing neural systems and temporal discounting processes. *Drug and Alcohol Dependence* 90: 85-91
- Blair K, Marsh AA, Morton J, Vythilingam M, Jones M, Mondillo K, Pine DC, Drevets WC, Blair JR. 2006. Choosing the Lesser of Two Evils, the Better of Two Goods: Specifying the Roles of Ventromedial Prefrontal Cortex and Dorsal Anterior Cingulate in Object Choice. *The Journal of Neuroscience* 26(44): 11379 –11386
- Botvinick MM, Braver TS, Barch DM, Carter CS, Cohen JD. 2001. Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol. Rev.* 108: 624–652
- Böhm-Bawerk EV. 1889. Capital and Interest. *South Holland: Libertarian Press.*
- Coffey SF, Gudleski GD, Saladin ME, Brady KT. 2003. Impulsivity and rapid discounting of delayed hypothetical rewards in cocaine-dependent individuals. *Exp. Clin. Psychopharmacol.* 11: 18–25
- Damasio AR. 1994. Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain. *New York: Putnam*

- Dawe S, Gullo MJ, Loxton NJ. 2004. Reward drive and rash impulsiveness as dimensions of impulsivity: Implications for substance misuse. *Addictive Behaviors* 29: 1389–1405
- Delorme A, Makeig S. 2004. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience* 134(1): 9-21
- De Wit H, Flory JD, Acheson A, McCloskey M, Manuck SB. 2007. IQ and nonplanning impulsivity are independently associated with delay discounting in middle-aged adults. *Personality and Individual Differences* 42: 111-121
- Diener C, Kuehner C, Flor H. 2010. Loss of control during instrumental learning: A source localization study. *Neuroimage* 50: 717-726
- Ertl J, Schafer E. 1969. Brain response correlates of psychometric intelligence. *Nature* 223: 421– 422
- Ferrer E, Moral MA, Bozzo J. 2007. Antiepileptic drugs in alcoholism: an update. *Drugs of the Future* 32(5): 429-440
- Figuer B, Knoch D, Johnson EJ, Krosch AAR, Lisanby SH, Fehr E, Weber EU. 2010. Lateral prefrontal cortex and self-control in intertemporal choice. *nature neuroscience. brief communications*
- Fisher I. 1930. *The Theory of Interest*. NY: Macmillan
- FitzGerald THB, Seymour B, Dolan RJ. 2009. The role of human orbitofrontal cortex in value comparison for incommensurable objects. *The Journal of Neuroscience* 29(26):8388–8395

- Frederick S. 2002. Time preference and personal identity. In *Time and Decision: Economic and Psychological Perspectives on Intertemporal Choice*. George Loewenstein, Daniel Read and Roy Baumeister. *NY: Russell Sage*
- Frederick S, Loewenstein G. 2002. The psychology of sequence preferences. work paper. *Sloan School, MIT*
- Frederick S, Read D. 2002. The empirical and normative status of hyperbolic discounting and other DU anomalies. work paper. *MIT and London School Econ.*
- Frederick S, Loewenstein G, O'Donoghue T. 2002. Time discounting and time preference: A critical review. *Journal of Economic Literature* XL: 351-401
- Fudenberg D, Levine DK. 2006. A dual-self model of impulse control. *American Economic Review* 96 (5): 1449-1476
- Gilbert DT, Gill MJ, Wilson TD. 2002. The future is now: Temporal correction in affective forecasting. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 88 (1): 430-44
- Glimcher PW, Kable J, Louie K. 2007. Neuroeconomic studies of impulsivity: now or just as soon as possible? *Am. Econ. Rev.* 97: 142-147
- Green L, Myerson J. 2004. A discounting framework for choice with delayed and probabilistic rewards. *Psychol. Bull.* 130: 769-792
- Green L, Fristoe N, Myerson J. 1994. Temporal discounting and preference reversals in choice between delayed outcomes. *Psychon. Bull. Rev.* 1: 383-389
- Green L, Myerson J, Holt DD. 2002. Discounting of delayed food rewards in pigeons and rats: Is there a magnitude effect? *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 81 (1): 39-50

- Green L, Fischer EB Jr, Perlow S, Sherman L. 1981. Preference reversal and self control: Choice as a function of reward amount and delay. *Behav. Anal. Letters* 1 (1): 43-51
- Grossbard CL, Mazur JE. 1986. A comparison of delays and ratio requirements in self-control choice. *J. Exp. Anal. Behav.* 45: 305–315
- Hare TA, Camerer CF, Rangel A. 2009. Self-control in decision-making involves modulation of the VMPFC valuation system. *Science* 324 (5927): 646-648
- Hare TA, O’Doherty J, Camerer CF, Schultz W, Rangel A. 2008. Dissociating the Role of the orbitofrontal cortex and the striatum in the computation of goal values and prediction errors. *The Journal of Neuroscience* 28 (22): 5623–5630
- Hariri AR, Brown SM, Williamson DE, Flory JD, de Wit H, Manuck SB. 2006. Preference for immediate over delayed rewards is associated with magnitude of ventral striatal activity. *The Journal of Neuroscience* 26(51): 13213–13217
- He BJ, Raichle ME. 2009. The fMRI signal, slow cortical potential and consciousness. *Trends in Cognitive Sciences* 13 (7): 302-309
- He BJ, Snyder AZ, Zempel JM, Smyth MD, Raichle ME. 2008. Electrophysiological correlates of the brain’s intrinsic large-scale functional architecture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 105: 16039–16044
- Hellwig S, Weisbrod M, Jochum V, Rentrop M, Unger J, Walther S, Haefner K, Roth A, Fiedler P, Bender S. 2008. Slow cortical potentials in human aversive trace conditioning. *International Journal of Psychophysiology* 69: 41–51
- Hinson JM, Jameson TL, Whitney P. 2003. Impulsive decision making and working memory. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 29 (2): 298–306
- Hodges CM, Wolf LL. 1981. Optimal foraging in bumblebees – why is nectar left behind in flowers. *BEHAVIORAL ECOLOGY AND SOCIOBIOLOGY* 9(1): 41-44

- Hyman SE. 2005. Addiction: A disease of learning and memory. *Am. J. Psychiatry* 162: 1414-1422
- Jevons WS. 1888. *The Theory of Political Economy*. London: Macmillan
- Kable JW, Glimcher PW. 2007. The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *nature neuroscience* 10 (12): 1625 - 1633
- Kagel JH, Battalio RC, Green L. 1995. *Economic choice theory: An experimental analysis of animal behavior*. Cambridge Univ. Press
- Kahneman D, Tversky A. 1979. Prospect Theory – Analysis of decision under risk. *ECONOMETRICA* 47 (2): 263-291
- Kalenscher T, Pennartz CMA. 2008. Is a bird in the hand worth two in the future? The neuroeconomics of intertemporal decision-making. *Progress in Neurobiology* 84: 284–315
- Kennerley SW, Lara AH, Wallis JD. 2005. Prefrontal neurons encode an abstract representation of value. Presented at Annu. Meet. Soc. Neurosci., Washington, DC
- Khader P, Schicke T, Röder B, Rösler F. (2008). On the relationship between slow cortical potentials and BOLD signal changes in humans. *International Journal of Psychophysiology* 67 (2008) 252–261
- Kirby KN. 1997. Bidding on the future: Evidence against normative discounting of delayed rewards. *J. Experiment. Psych.* 126: 54-70
- Kirby KN, Maraković NN. 1995. Modeling myopic decisions: evidence for hyperbolic delay-discounting within subjects and amounts. *Org. Behav. Human Decis. Process* 64: 22–30

- Kirby KN, Petry NM, Bickel WK. 1999. Heroin addicts have higher discount rates for delayed rewards than non-drug-using controls. *J. Exp. Psychol. Gen.* 128: 78–87
- Koopmans TC. 1960. Stationary ordinal utility and impatience. *Econometrica* 28: 287-309
- Kringelbach ML. 2005. The human orbitofrontal cortex: linking reward to hedonic experience. *Nat Rev Neurosci* 6: 691–702
- Laibson D. 1997. Golden eggs and hyperbolic discounting. *Quart. J. Econ.* 112: 443–477
- Libet B, Alberts WW, Wright EW, Feinstein B. 1967. Responses of Human Somatosensory Cortex to Stimuli below Threshold for Conscious Sensation. *Science* 158: 1597-1600
- Libet B, Gleason CA, Wright EW, Pearls DK. 1983. Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain.* 106: 623-642
- Loewenstein GF. 1988. Frames of mind in intertemporal choice. *MANAGEMENT SCIENCE* 34 (2): 200-214
- Loewenstein G, Prelec D. 1991. Negative time preference. *Amer. Econ. Rev.* 81: 347-52
- Loewenstein G, Sicherman N. 1991. Do workers prefer increasing wage profiles? *J. Labor Econ.* 9 (1): 67-84
- Loewenstein GF, O'Donoghue T. 2004. Animal Spirits: Affective and deliberative processes in economic behavior. Working Paper. Cornell University, Center for Analytic Economics
- Luo S, Ainslie G, Giragosian L, Monterosso JR. 2009. Behavioral and neural evidence of incentive bias for immediate rewards relative to preference-matched delayed rewards. *The Journal of Neuroscience* 29 (47): 14820 –14827

- Madden GJ, Petry NM, Badger GJ, Bickel WK. 1997. Impulsive and self-control choices in opioid-dependent and non-drug-using control patients: Drug and monetary rewards. *Exp. Clinical. Psychopharmacol.* 5(3): 256–262
- Marco-Pallarés J, Mohammadi B, Samii A, Münte TF. 2010. Brain activations reflect individual discount rates in intertemporal choice. *Brain Research* 1320: 123–129
- Mazur JE. 1984. Tests of an equivalence rule for fixed and variable reinforcer delays. *J. Exp. Psychol. Anim. Behav. Process* 10: 426–436
- Mazur JE. 1987. An adjusting procedure for studying delayed reinforcement. In: Commons ML, Mazur JE, Nevin JA, Rachlin H. (Eds.). *Quantitative Analyses of Behavior 5. The Effect of Delay and of Intervening Events on Reinforcement Value.* Erlbaum, Hillsdale, NJ: 55–73.
- Mazur JE. 1988. Estimation of indifference points with an adjusting-delay procedure. *J. Exp. Anal. Behav.* 49: 37–47
- McClure SM, Berns GS, Montague PR. 2003. Temporal Prediction Errors in a Passive Learning Task Activate Human Striatum. *Neuron* 38: 339–346
- McClure SM, Laibson DI, Loewenstein G, Cohen JD. 2004a. Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science* 306: 503–507
- McClure SM, York MK, Montague PR. 2004b. The neural substrates of reward processing in humans: The modern role of fMRI. *The Neuroscientist* 10 (3): 260-268
- Miltner WHR, Braun CH, Coles MGH. 1997. Event-related potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: evidence for a ‘generic’ neural system for error detection. *J. Cogn. Neurosci.* 9: 788-798
- Mitchell SH. 1999. Measures of impulsivity in cigarette smokers and nonsmokers. *Psychopharmacology* 146: 455–464

- Nagai Y, Critchley HD, Featherstone E, Trimble MR, Dolan RJ. 2004. Brain activity relating to the contingent negative variation: an fMRI investigation. *NEUROIMAGE* 21(4): 1232-1241
- Nichols TE, Holmes AP. 2002. Nonparametric permutation tests for functional neuroimaging: a primer with examples. *Hum. Brain Mapp.* 15:1-25
- O'Doherty J, Kringelbach ML, Rolls ET, Hornak J, Andrews C. 2001. Abstract reward and punishment representations in the human orbitofrontal cortex. *nature neuroscience* 4:95–102.
- O'Donoghue T, Rabin M. 1999. Doing it now or later. *AMERICAN ECONOMIC REVIEW* 89 (1): 103-124
- Parfit D. 1971. Personal Identity. *Philosophical Rev.* 80 (1): 3-27
- Pascual-Marqui RD. 2002. Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): Technical details. *METHODS AND FINDINGS IN EXPERIMENTAL AND CLINICAL PHARMACOLOGY* 24: 5-12
- Paulus MP, Rogalsky C, Simmons A, Feinstein JS, Stein MB. 2003. Increased activation in the right insula during risk-taking decision making is related to harm avoidance and neuroticism. *NEUROIMAGE* 19(4): 1439-1448
- Peters J, Büchel C. 2009. Overlapping and distinct neural systems code for subjective value during intertemporal and risky decision making. *The Journal of Neuroscience* 29(50):15727–15734
- Petrides M, Pandya DN. 1994. Comparative architectonic analysis of the human and macaque frontal cortex. In Boller F, Grafman J. (Eds.). *Handbook of Neuropsychology. NewYork Elsevier:* 17–57

- Petry NM. 2001. Delay discounting of money and alcohol in actively using alcoholics, currently abstinent alcoholics, and controls. *Psychopharmacology* 154 (3): 243–250
- Petry NM. 2002. Discounting of delayed rewards in substance abusers: relationship to antisocial personality disorder. *Psychopharmacology* 162:425–432
- Petry NM, Casarella R, 1999. Excessive discounting of delayed rewards in substance abusers with gambling problems. *Drug Alcohol Depend* 56 (1): 25–32
- Pine A, Seymour B, Roiser JP, Bossaerts P, Friston KJ, Curran HV, Dolan RJ. (2009). Encoding of marginal utility across time in the human brain. *The Journal of Neuroscience* 29(30): 9575–9581
- Pins D, Ffytche D. (2003) The neural correlates of conscious vision. *Cereb. Cortex* 13: 461–474
- Plichta MM, Vasic N, Wolf RC, Lesch K, Brummer D, Jacob C, Fallgatter AJ, Grön G. 2009. Neural hyporesponsiveness and hyperresponsiveness during immediate and delayed reward processing in adult attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biol. Psychiatry* 65: 7-14
- Potts GF, George MRM, Martin LE, Barratt ES. 2005. Reduced punishment sensitivity in neural systems of behavior monitoring in impulsive individuals. *Neuroscience Letters* 397: 130–134
- Rachlin H. 1989. Judgment, Decision and Choice: A Cognitive/ Behavioral Synthesis. *Freeman, New York*, chap. 7
- Rae, John. 1834. The Sociological Theory of Capital (reprint 1834 ed.). *London: Macmillan*
- Read D. 2001. Is Time-discounting hyperbolic or subadditive? *J. Risk Uncertainty* 23: 5-32

- Richards JB, Zhang L, Mitchell SH, deWit H. 1999. Delay or probability discounting in a model of impulsive behavior: effect of alcohol. *J. Exp. Anal. Behav.* 71: 121–143
- Roesch MR, Olson CR. 2005. Neuronal activity in primate orbitofrontal cortex reflects the value of time. *J. Neurophysiol.* 94: 2457–71
- Rösler F, Heil M, Ridder B. 1997. Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology* 45: 109- 141
- Ruchow M, Spitzer M, Grön G, Grothe J, Kiefer M. 2005. Error processing and impulsiveness in normals: Evidence from event-related potentials. *Brain Research* 24: 317-325
- Rudebeck PH, Walton ME, Smyth AN, Bannerman DM, Rushworth MF. 2006. Separate neural pathways process different decision costs. *Nat. Neurosci.* 9: 1161–68
- Sabatinelli D, Lang PJ, Keil A, Bradley MM. 2007. Emotional Perception: Correlation of Functional MRI and Event-Related Potentials. *Cerebral Cortex* 17: 1085--1091
- Samuelson P. 1937. A note on measurement of utility. *Rev. Econ. Stud.* 4: 155-61
- Samuelson P. 1952. Probability, utility, and the independence axiom. *Econometrica* 20 (4): 670-78
- Senior NW. 1836. An Outline of the Science of Political Economy. *London: Clowes & Sons*
- Simmons A, Matthews SC, Stein MB, Paulus MP. 2004. Anticipation of emotionally aversive visual stimuli activates right insula. *NEUROREPORT* 15(14): 2261-2265
- Skinner BF. 1948. Superstition in the pigeon. *Journal of Experimental Psychology* 38: 168–172

- Soman D, Ainslie G, Frederick S, Li X, Lynch J, Moreau P, Mitchell A, Read D, Sawyer A, Trope Y, Wertenbroch K, Zauberman G. 2005. The psychology of intertemporal discounting: Why are distant events valued differently from proximal ones? *Springer Science + Business Media, Marketing Letters* 16 (3-4): 347–360
- Steinberg L, Graham S, O'Brien L, Woolard J, Cauffman E, Banich M. 2009. Age differences in future orientation and delay discounting. *CHILD DEVELOPMENT* 80(1): 28-44
- Sutton S, Braren M, Zubin J. 1965. Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science* 150 (3700): 1187-1188
- Talairach J, Tournoux P. 1988. Co-planar stereotaxic atlas of the human brain, three-dimensional system. *Thieme, Stuttgart*
- Thaler RH. 1981. Some empirical evidence on dynamic inconsistency. *Econ. Letters* 8: 201-07
- Thaler RH, Shefrin HM. 1981. An economic theory of self-control. *Journal of Political Economy* 89(2): 392-406
- Tobin H, Logue AW. 1994. Self-control across species (*Columba livia*, *Homo sapiens*, and *Rattus norvegicus*). *J. Comp. Psychol.* 108: 126–133
- Tversky A, Koehler DJ. 1994. Support theory: Nonextensional representation of Subjective probability. *Psych. Rev.* 101 (4): 547-67
- Varey CA, Kahneman D. 1992. Experiences extended across time: Evaluation of moments and episodes. *J. Behav. Decision Making* 5(3): 169-85
- Van den Bergh B, Dewitte S, Warlop L. 2008. Bikinis instigate generalized impatience in intertemporal choice. *JOURNAL OF CONSUMER RESEARCH* 35 (1): 85-97

- Von Neumann J, Morgenstern O. 1944. Theory of Games and Economic Behavior. *Princeton University Press*, Princeton, NJ
- Wagner M, Fuchs M, Kastner J. 2004. Evaluation of sLORETA in the Presence of Noise and Multiple Sources. *Brain Topography* 16 (4): 277-280
- Wallis JD. 2007. Orbitofrontal cortex and its contribution to decision-making. *Annu. Rev. Neurosci.* 30: 31–56
- Wang XT, Dvorak RD. 2010. Sweet future: Fluctuating blood glucose levels affect future discounting. *Psychological Science* XX(X): 1–6
- Wittmann M, Leland DS, Paulus MP. 2005. Time and decision making: differential contribution of the posterior insular cortex and the striatum during a delay discounting task. *Exp Brain Res* 179:643–653
- Xu L, Liang Z, Wang K, Li S, Jiang S. 2009. Neural mechanism of intertemporal choice: From discounting future gains to future losses. *BRAIN RESEARCH* 1261: 65 – 74

Lebenslauf

Angaben zur Person

Vor- und Zuname: Felix Oswald
Geburtsdatum: 30. Juli, 1982
Geburtsort: Wien
Wohnort: Hernalser-Hauptstr. 64 – 1170 Wien
E-Mail: felixoswald23@gmail.com
Staatsangehörigkeit: österreichisch
Familienstand: ledig

Schulbildung

1988-1992 Volksschule Halirschgasse, 1170 Wien
Volksschule Schloß Reintal, Graz
1992-2000 Bundesrealgymnasium, Auf der Schmelz, 1150 Wien;
Abschluss mit „gutem Gesamterfolg“

Universitäre Ausbildung

SS 2001 Beginn Diplomstudium Politikwissenschaft (nicht abgeschlossen)
SS 2004 Beginn Diplomstudium Psychologie

PC-Kenntnisse

Word, Excel, SPSS, EEG-Lab

Sprachkenntnisse

Englisch in Wort und Schrift

Berufserfahrung

2000 (Juli, August)	Bühnenarbeit bei den Salzburger Festspielen
2003/08 bis 2004/09	Zivildienst an der <i>Stiftung Topographie des Terrors</i> , Berlin (Betreuung des Online-Forums des Gedenkstättenreferats, Mitarbeit bei Forschungsprojekten)
2004 – 2007	Orchesterwart (Klangforum Wien)
2006 – 2009	Produktionsbetreuung, Buchhaltung (KAIROS Musikproduktion)
WS 2009/09-11	Praktikum Neuropsychiatrie des Kindes- und Jugendalters (AKH, Wien) im Ausmaß von 240 Stunden (Tätigkeiten umfassten psychologische Diagnostik: Testung, Auswertung und Gutachtenerstellung; Durchführung von Anamnesegesprächen und Gutachten-Rückmeldungen, Mitarbeit bei Forschungsprojekten)

Interessenschwerpunkte

Biologische Psychologie: methodische und inhaltliche Grundlagen der modernen Hirnforschung/Neurowissenschaft, mit den Schwerpunkten Entscheidungsfindung- und Verhalten, Belohnungsverarbeitung, moralisches Urteil, Verarbeitung von und Umgang mit Entscheidungskonflikten, Interaktion von Kognition und Emotion

Klinische Psychologie: Psychotherapie und Theorie psychischer Störungen auf emotionaler, kognitiver, verhaltensmäßiger und biologischer Ebene; Psychologie und Neurobiologie der Sucht

Forensische Psychologie: Risiko-Diagnostik, Begutachtung, Delinquenzentstehung (psychische Störungen und Gewalttätigkeit), Forschung zu Delinquenzformen, Tätertypologien etc.
