

**Effekte von chronischem Cannabiskonsum mit frühem
„age of onset“ auf okulomotorische Kontrolle und visuelle
Informationsverarbeitung**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor rer. nat.
Fakultät für Psychologie und Sportwissenschaft
Universität Bielefeld

vorgelegt von
Lynn Huestegge

Bielefeld
Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
1. Einführung	3
1.1 Cannabis und seine Wirksamkeit	3
1.2 Effekte von Cannabis auf das Erleben und Verhalten	5
1.2.1 Kurzzeiteffekte von Cannabis	6
1.2.2 Langzeiteffekte von Cannabis	10
1.2.2.1 Ältere Untersuchungen	11
1.2.2.2 Neuere Untersuchungen	12
1.2.2.3 Langzeiteffekte auf visuelle Verarbeitung und die Rolle des „age of onset“	13
1.3 Offene Fragen und Gliederung der Untersuchung	15
1.4 Blickbewegungen: Grundlagen	16
2. Experiment 1: Blickbewegungen bei der visuellen Suche	18
2.1 Theoretischer Hintergrund: Blickbewegungen & Visuelle Suche	18
2.2 Methode	22
2.2.1 Probanden	22
2.2.2 Aufgabe und Durchführung	24
2.2.3 Apparatur	25
2.3 Ergebnisse	26
2.3.1 allgemeine Parameter	26
2.3.2 maximale Sakkadengeschwindigkeiten	28
2.3.3 Verhältnis von Sakkadenamplitude und Fixationsdauer	30
2.3.4 Analysen zum Suchpfad	31
2.4 Diskussion	40
3. Visuelle Informationsverarbeitung und die Steuerung von Blickbewegungen	44
3.1 Okulomotorische Theorien & experimentelle Paradigmen basaler okulomotorischer Teilleistungen	44
3.1.1 Funktionale Ebenen des Modells von Findlay & Walker (1999)	45
3.1.2 Neurophysiologische Grundlagen der Blicksteuerung	49
3.2 Experiment 2: Visuell geführte Prosakkaden	58
3.3 Methode	59
3.4 Ergebnisse	62
3.5 Diskussion	66
4. Experiment 3: Das Antisakkaden-Paradigma: Mentale Transformation und Inhibition	69
4.1 Antisakkaden: Theorie und Forschungsstand	69
4.2 Methode	72
4.3 Ergebnisse	74
4.4 Diskussion	78
5. Experiment 4: Das „Memory guided“-Sakkaden-Paradigma: Die Rolle des Gedächtnisses	82
5.1 Memory guided-Sakkaden: Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand	82
5.2 Methode	84
5.3 Ergebnisse	86
5.4 Diskussion	89

6. Experiment 5: Das “Double step”-Paradigma: Reprogrammierfähigkeit	91
6.1 „Double step“-Sakkaden: Theoretischer Hintergrund & Forschungsstand	91
6.2 Methode	94
6.3 Ergebnisse	96
6.4 Diskussion	105
7. Experiment 6: Visuelle Spanne	108
7.1 Periphere Buchstabenerkennung: Theoretischer Hintergrund	109
7.2 Methode	111
7.3 Ergebnisse	114
7.4 Diskussion	120
8. Experiment 7: Ein Leseexperiment	123
8.1 Grundlagen der Blickbewegungen beim Lesen	123
8.1.1 Blickbewegungen beim Lesen	124
8.1.2 Räumliche Aspekte der Steuerung von Blickbewegungen beim Lesen	126
8.1.2.1 Selektion von Wörtern als Fixationsziele	127
8.1.2.2 Determinanten der Fixationspositionen innerhalb eines Wortes	128
8.1.2.3 Die mittlere initiale Fixationsposition (<i>preferred viewing position</i>)	130
8.1.3 Zeitliche Aspekte der Steuerung von Blickbewegungen beim Lesen	132
8.1.3.1 Der Worthäufigkeitseffekt	134
8.1.3.2 Probleme des Konzeptes der Worthäufigkeit	135
8.1.4 Hypothesen zum Gruppenvergleich	135
8.2 Methode	136
8.2.1 Versuchsdurchführung	136
8.2.2 Zielwortmaterial	138
8.2.3 Rating der subjektiven Vertrautheit der Zielwörter	140
8.3 Ergebnisse	141
8.3.1 Ausreißerkriterien	141
8.3.2 Gesamtdatenmenge (alle Wörter)	142
8.3.2.1 Zeitliche Parameter	143
8.3.2.2 Räumliche Parameter	143
8.3.3 Zielwörter	144
8.3.3.1 Zeitliche Parameter	144
8.3.3.2 Fixationshäufigkeiten	147
8.3.3.3 Die initiale Landeposition im Wort als räumlicher Parameter	149
8.3.3.4 Der Wortlängen- und Wortfrequenzeffekt im Gruppenvergleich	151
8.4 Diskussion	153
9. Zusammenfassung und Fazit	156
10. Literatur	164
11. Anhang	

Effekte von chronischem Cannabiskonsum mit frühem „age of onset“ auf okulomotorische Kontrolle und visuelle Informationsverarbeitung

- Übersicht zur Dissertation von Lynn Huestegge -

Hintergrund

Während akute Effekte von Cannabis hinreichend bekannt sind, führte die bisherige Forschung zu Langzeiteffekten chronischen Cannabiskonsums auf kognitive Funktionen wie Aufmerksamkeit und Gedächtnis zu eher heterogenen Ergebnissen. So ist bislang nicht eindeutig geklärt, inwieweit lang anhaltende Effekte bestehen und welche Subsysteme der Informationsverarbeitung betroffen sein könnten.

In einer Untersuchung von Ehrenreich et al. (1999) wurden Langzeiteffekte von Cannabis mithilfe einer umfassenden neuropsychologischen Testbatterie an einer großen Anzahl von Probanden untersucht. Dabei wurden nachteilige Effekte nur für User gefunden, die bereits in der Pubertät mit einem regelmäßigen Konsum begonnen haben. Außerdem waren Defizite ausschließlich in einer visuellen Suchaufgabe auffällig, die sich von allen anderen Aufgaben dadurch unterschied, dass eine erfolgreiche Bearbeitung Blickbewegungen notwendig macht. Ausgehend von diesem Befund sollten in der vorliegenden Studie mögliche Langzeiteffekte von THC-Konsum auf die Blicksteuerung und visuelle Informationsverarbeitung bei Usern untersucht werden, die entsprechend früh mit einem regelmäßigem Konsum begonnen haben.

Probanden

Im vorliegenden Projekt wurden 20 Cannabisuser mit 20 Kontrollprobanden in sieben Experimenten verglichen. Die User durften zur Sicherstellung der Messung von Langzeiteffekten keine akute Intoxikation aufweisen sowie möglichst keine anderen Drogen konsumiert haben (gesichert durch Interview, Blut- und Urinscreenings). Sie sollten vor dem 17. Lebensjahr mit regelmäßigem Cannabiskonsum (mindestens etwa 1 Konsum pro Tag) begonnen haben. Durch ein psychiatrisches Interview sowie einem Intelligenzscreening wurde gesichert, dass es sich um erfolgreiche, gesunde Probanden handelt (überwiegend Studenten).

Experimente & Ergebnisse

Experiment 1 des Projektes konnte die o.g. Ergebnisse in der „visuellen Suche“ von Ehrenreich et al. (s.o.) an neuen Probanden replizieren und zusätzlich unterschiedliche Blickbewegungsmuster beim Lösen dieser Aufgabe feststellen. Anhand des Suchpfades sowie grundlegender Parameter konnten Unterschiede in der Strategie der Aufgabenbewältigung sowie Hinweise auf Beeinträchtigungen des Arbeitsgedächtnisses gefunden werden.

Experimente 2 bis 5 beschäftigen sich systematisch mit basalen Teilkomponenten der Blicksteuerung, basierend auf der theoretischen Konzeption von Findlay & Walker (1999):

Experiment 2 beinhaltet die Analyse zeitlicher und räumlicher Parameter von einfachen *Prosakkaden* (Blicke zu in der Peripherie erscheinenden Zielreizen). In einer Bedingung verschwand das zentrale Fixationskreuz 200 ms vor Erscheinen des Zielreizes (Gap-Bedingung), während in einer anderen das zentrale Fixationskreuz sichtbar blieb (Overlap-Bedingung). In der Cannabisgruppe waren in diesem Experiment signifikant längere Reaktionszeiten zu verzeichnen.

Experiment 3 beinhaltet dasselbe Versuchsdesign wie Experiment 2. Die Probanden sollten hier jedoch *Antisakkaden* ausführen, was eine Unterdrückung von reflexiven Sakkaden und die Generierung von Sakkaden gleicher Amplitude in entgegengesetzter Richtung beinhaltet. Diese Aufgabe dient zur Einschätzung der willentlichen Steuerungsfähigkeit der Okulomotorik. Es fanden sich neben verlängerten Reaktionszeiten zusätzlich verlängerte Sakkadenamplituden bei Cannabiskonsumenten gegenüber der Kontrollgruppe.

Experiment 4 untersucht sogenannte „*memory-guided*“-Sakkaden, das sind Sakkaden zu Zielen, deren Position über einen bestimmten Zeitraum behalten werden muss. Dies dient der Einschätzung der für die Okulomotorik spezifischen räumlichen Arbeitsgedächtnisprozesse. In diesem Experiment fanden sich wiederum verlängerte Sakkadenamplituden für die Cannabisprobanden im Vergleich zu den Kontrollprobanden.

Experiment 5 untersucht sogenannte „*double step*“-Sakkaden, dies sind Sakkaden zu in kurzer Folge nacheinander erscheinenden Zielreizen. Bei diesem Experiment ist das Intervall zwischen erstem und zweitem Zielreiz variabel und z.T. so kurz, dass ein Sakkadenprogramm kurzfristig abgebrochen und „reprogrammiert“ werden muss. Dieses Experiment schätzt somit die Reprogrammierungsfähigkeit des okulomotorischen Systems ein. Die Gruppen unterschieden sich hierin nicht voneinander.

Experiment 6 geht von der Überlegung aus, dass die schlechtere Leistung der THC-Gruppe in der visuellen Suche aus einer begrenzteren visuellen Spanne resultieren könnte, dass also der räumliche Bereich der Informationsaufnahme innerhalb einer Fixation geringer sein könnte. Um dies direkt zu testen, wurden in unterschiedlicher Exzentrizität für kurze Zeit Buchstaben dargeboten, die erkannt werden sollten (*periphere Buchstabenerkennung*). Die Gruppen unterschieden sich in dieser Aufgabe nicht voneinander.

Experiment 7 untersucht eine alltagsrelevante Aufgabe, in der eine funktionierende Blicksteuerung besonders wichtig ist, nämlich das *Lesen*. Die Probanden mussten 96 Sätze lesen, in die bezüglich der Wortlänge und Worthäufigkeit variierte Zielwörter eingebettet waren. Außerdem wurde das Leseverständnis miterhoben. Die Cannabisgruppe zeigte hier eine deutlich verringerte Lesegeschwindigkeit von bis zu 30% sowie ein geringeres Textverständnis im Vergleich mit der Kontrollgruppe.

Zusammenfassung & Diskussion

Die Latenzverlängerungen aus den Experimenten 2 und 3 lassen auf Defizite in der Aufmerksamkeits-verschiebung und/oder der Parametrisierung der Sakkadenprogramme schließen. Neben diesen Defiziten der temporalen Blickbewegungssteuerung traten auch selektive Beeinträchtigungen der räumlichen Kontrolle auf: Bei der Ausführung von nicht visuell geführten Sakkaden in der Anti- und memory-guided-Sakkadenaufgabe konnten im Vergleich zur Kontrollgruppe hypermetrische Sakkaden nachgewiesen werden. Die Amplituden in der Prosakkadenaufgabe waren hingegen nicht signifikant verschieden. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Resultaten einer Studie zu Kurzzeiteffekten von Cannabis auf die Blickbewegungssteuerung (Ploner et al., *Cereb Cortex*, 2002). Da die neurophysiologischen Grundlagen des okulomotorischen Systems relativ gut bekannt sind, lassen sich Rückschlüsse auf möglicherweise beeinträchtigte Hirnregionen ziehen. Insgesamt deuten diese Ergebnisse auf mögliche dauerhafte Beeinträchtigungen des präfrontalen assoziativen Cortex, der Substantia Nigra pars reticulata in den Basalganglien, des dorsolateralen Präfrontalcortex sowie des Parietalcortex, da diese Regionen einerseits an den beeinträchtigten Funktionen beteiligt sind und andererseits eine hohe CB1-Rezeptordichte des körpereigenen Cannabinoid-Rezeptorsystems aufweisen. Die Ergebnisse aus den Experimenten 1 und 7 lassen darauf schließen, dass die Beeinträchtigungen durchaus auch für alltäglich relevante Aufgaben nachweisbar sind.

1. Einführung

Cannabis ist die am häufigsten konsumierte illegale Droge. Vor allem junge Menschen verwenden immer öfter *cannabis sativa*, mit dem wichtigsten Bestandteil Δ 9-Tetrahydrocannabinol (THC). Das meistens durch Rauchen zugeführte Marijuana¹ interagiert mit einem endogenen Cannabinoid-Rezeptorsystem im menschlichen Gehirn. Die Dichte der Verteilung dieses in hoher Anzahl und in vielen Bereichen zu findenden Rezeptortyps variiert in Abhängigkeit von den verschiedenen Gehirnregionen. Detaillierte Kartographierungen der Verteilung bei Säugetieren wurden beispielsweise von Herkenham (1991, 1992) vorgelegt. Einige der Regionen mit überdurchschnittlich hoher Cannabinoidrezeptoren-Dichte sind mit motorischen Funktionen assoziiert, wie z.B. die Basalganglien, der Hippocampus oder das Cerebellum. Jedoch sind die spezifischen Funktionen dieses Rezeptorsystems noch weitgehend unbekannt.

In diesem Kapitel wird eine Einführung zur Wirksamkeit und den Effekten von Cannabis gegeben, wobei der Schwerpunkt auf den für die vorliegende Untersuchungsreihe wesentlichen neuropsychologischen Langzeiteffekten liegen wird. Dabei wird auch die Motivation dieser Untersuchungen verdeutlicht. Am Schluss wird noch eine kurze Einführung in Grundbegriffe der Blickbewegungen erfolgen, so dass die Basis für das Verständnis der Experimente in den nachfolgenden Kapiteln gelegt ist.

1.1 Cannabis und seine Wirksamkeit

Auch wenn Δ 9-Tetrahydrocannabinol der wichtigste psychoaktive Bestandteil in Marijuana ist, sollten dessen Effekte eher als ein Zusammenspiel diverser weiterer Komponenten verstanden werden. Diese Bestandteile lassen sich Gruppen eng verwandter Cannabinoide zuordnen, die zum größten Teil Nebenprodukte bzw. Vorgänger oder Nachfolger in den jeweiligen biochemischen Pfaden darstellen. In Abhängigkeit von der zugrundeliegenden Pflanze ist der vorherrschende Bestandteil entweder Δ 9-Tetrahydrocannabinol oder Cannabidiol. Zusammen mit dem in geringerer Menge auftretenden Δ 8-Tetrahydrocannabinol ist Δ 9-THC allerdings der einzige psychoaktive Wirkstoff in Marijuana (Joy et al., 1999).

¹ Die Begriffe Cannabis und Marijuana werden im Folgenden synonym verwendet. Bisweilen wird die Pflanze bzw. die Pflanzengattung Cannabis von Marijuana als für den Konsum aufbereitete Substanz unterschieden.

In den letzten zwanzig Jahren ist das Verständnis für die Interaktion von Cannabinoiden mit verschiedenen Zellstrukturen im Gehirn immer mehr gestiegen. Der erste schlüssige Nachweis spezifischer Cannabinoidrezeptoren findet sich 1988 (Devane et al.). Vor dieser Zeit war es eine ungelöste Frage, ob THC eher unspezifisch wirkt, bspw. durch eine Beeinflussung der Durchlässigkeit der Zellmembran, oder durch eine Interaktion mit spezifischen Rezeptoren auf der Zelloberfläche. Herkenham et al. (1990) sowie Matsuda (1990) haben zuerst die Existenz des Cannabinoidrezeptorsystems CB₁ nachgewiesen, das eine wichtige Rolle bei den Effekten von THC auf das Verhalten spielt. Dieses System gehört zur Familie der G-Protein-gekoppelten Rezeptoren und stellt eines der am prominentesten verteilten Rezeptorsysteme im Gehirn überhaupt dar. Kartographierungen der Dichteverteilung, wie sie von Herkenham (1995), Pertwee (1997) und Glass et al. (1997) vorgelegt wurden, zeigen eine Anatomie, die mit den bekannten Effekten von THC auf das Verhalten (s.u.) gut vereinbar ist. CB₁ ist besonders im Cerebellum und den Basalganglien, dort vor allem in der Substantia Nigra Pars Reticulata, im Putamen, Globus Pallidus sowie Nucleus Entopeduncular zu finden. Diese Regionen spielen eine große Rolle in der Bewegungskontrolle und -koordination. Zusätzlich gibt es eine hohe Verteilungsdichte im Hippocampus, die vermutlich mit den bekannten Effekten auf Lernen und Gedächtnis assoziiert ist (Sullivan, 2000). Darüber hinaus befinden sich die Rezeptoren vermehrt im cerebralen Cortex, dort vor allem im Cingulum und in den frontalen und parietalen Regionen, die eine wichtige Rolle bei höheren kognitiven Funktionen spielen, sowie im Nucleus Accumbens, der als Belohnungszentrum bekannt ist. Eine mittlere Konzentration dieser Rezeptoren ist außerdem im mediodorsalen Thalamus, dem Hypothalamus, der Amygdala und dem Rückenmark zu finden. Auch im Hirnstamm wird eine mittlere Konzentration angenommen, hier vor allem in den zentralen grauen und intermediären Schichten der Colliculi superiores und weniger in den okulomotorischen Nuclei (Herkenham, 1991). Ebenso wurde im dorsolateralen Präfrontalkortex (DLPFC) eine erhöhte Konzentration gefunden. Hierbei handelt es sich um eine Region, die an Funktionen des räumlichen Arbeitsgedächtnisses beteiligt ist.

In jüngster Zeit nimmt die Anzahl der Studien mittels funktioneller bildgebender Verfahren zu, die sich mit der direkten Wirkung von THC auf das Gehirn befassen. Der Einsatz dieser Methoden zur Untersuchung von THC-Effekten ist leider mit Problemen behaftet, da direkte Veränderungen des Blutflusses und metabolische Veränderungen, die durch CB₁-Rezeptor-Aktivitäten verursacht werden, schwer zu trennen sind von Veränderungen, die indirekt durch kognitive und psychedelische Effekte wie Halluzinationen und Stimmungsänderungen hervorgerufen werden.

Zwei Jahre nach der Entdeckung der CB₁-Rezeptoren wurde die Substanz Anandamid entdeckt (Devane et al., 1992), ein natürlich vorkommender Stoff, der mit den THC-Rezeptoren auf dieselbe Weise interagiert wie das extern zugeführte THC. Alle körpereigenen Substanzen, die die Cannabinoidrezeptoren aktivieren, werden Endocannabinoide genannt und regeln u.a. kardiovaskuläre, verdauungsbezogene, endokrine, immunologische, reproduktions- und respiratorische Prozesse. Die Verteilung von Anandamid ist in den Teilen des Gehirns besonders hoch, wo die CB₁-Verteilung maximal ist, also im Hippocampus, im Striatum und im Cerebellum. Auch im Thalamus ist diese Substanz hoch konzentriert, obwohl dort nur wenige Rezeptoren zu finden sind. Leider fehlen bis heute detailliertere Dichteverteilungen zur neuroanatomischen Lokation von Anandamid, um die Funktionalität dieser Substanz genauer zu spezifizieren. Nach der Entdeckung von Anandamid wurden zusätzlich einige weitere endogen bindende Substanzen gefunden, vor allem das verwandte Arachidonylglycerol gilt als wichtige Entdeckung (2-AG; Mechoulam et al., 1995). Aber auch dessen hirnpfysiologische Funktion ist bis dato noch unbekannt. Munro et al. (1993) entdeckten darüber hinaus noch einen weiteren Rezeptortyp, CB₂, der sich außerhalb des Gehirns befindet und mit dem Immunsystem in Zusammenhang steht.

Die ersten wirksamen synthetischen THC-Agonisten, also die Rezeptoren aktivierende Substanzen, wurden von Johnson & Melvin bereits 1986 entwickelt. Die Möglichkeit einer selektiven Blockierung von CB₁ und CB₂ mit spezifischen Antagonisten, die die Rezeptorfunktion unterdrücken, wurde erst später eröffnet (Rinaldi-Carmona et al., 1994; 1998). Diese Entdeckung ermöglichte eine deutlich detailliertere Analyse der funktionellen Interaktion zwischen THC und seinen Rezeptoren.

Derzeit ist noch ungeklärt, welchen Anteil einzelne molekulare Mechanismen an einem möglicherweise schädlichen Input exogener Cannabinoide während der Entwicklung kognitiver Systeme und Subsysteme haben könnten. Cannabinoide sind generell an der komplexen interzellulären Kommunikation beteiligt, und ihnen wird auch eine wichtige Bedeutung für synaptische Plastizitätsprozesse zugesprochen (Derkinderen et al., 1996).

1.2 Effekte von Cannabis auf das Erleben und Verhalten

Studien zu den Effekten von Cannabis auf das Erleben und Verhalten lassen sich unterteilen in Untersuchungen zu Kurz- oder Langzeiteffekten einerseits und Human- gegenüber Tierstudien andererseits. In diesem Abschnitt soll kurz auf die für die vorliegende Studie relevanten

Untersuchungen an Tieren eingegangen werden. In den nachfolgenden Kapiteln sollen zunächst knapp Kurzzeiteffekte beim Menschen behandelt werden, um schließlich zu den für die vorliegende Experimentalreihe relevanten Langzeiteffekten überzuleiten².

Aus den mannigfaltigen Studien zu Effekten chronischen Cannabiskonsums auf das Verhalten und die Anatomie von Tieren sind vor allem zwei bedeutsame Forschungsergebnisse hervorzuheben. McLaughlin & Abood (1993) konnten zeigen, dass bei Ratten, die über einen längeren Zeitraum einer sehr hohen THC-Dosis ausgesetzt wurden, die Anzahl der THC-Rezeptoren im Gehirn deutlich abnahm. Dieses Ergebnis deutet somit auf eine direkte Beeinflussung des endogenen Rezeptorsystems durch exogen zugeführtes THC hin. In einer Studie von Stiglick & Kalant (1985) wurden sowohl hirnmorphologische wie auch behaviorale Parameter, nämlich die Orientierungsleistung in einem Wasserlabyrinth, untersucht. Hierzu wurden zwei Gruppen von Ratten, eine vor und eine nach ihrer Geschlechtsreife, einer chronischen THC-Begasung ausgesetzt. Während die gemessenen Beeinträchtigungen sich in der älteren Population zurückbildeten, waren in der Gruppe der vorgeschlechtsreifen Tiere irreversible hirnmorphologische Veränderungen zu beobachten, die sich ebenfalls im Verhalten manifestierten. Diese Studie ist von besonderer Bedeutung, da sie die Existenz einer vulnerablen Phase für Langzeiteffekte von THC-Konsum nahe legt, für die sich auch beim Menschen Hinweise finden lassen (vgl. Kapitel 1.2.2.3). Eine weitere Studie zur Entwicklung des Singverhaltens von Zebrafinken weist ebenso eine vulnerable Phase nach, in der eine intakte Ausformung des CB₁-Systems notwendig ist, um erfolgreich singen zu lernen (Soderstrom & Johnson, 2003). Diese Tierstudien lassen allerdings keine direkten Schlüsse auf die Auswirkungen beim Menschen zu, da – neben dem Unterschied der Spezies – die relative Dosierung von THC in den beschriebenen Untersuchungen unverhältnismäßig höher ausfiel als bei den intensivsten menschlichen Usern.

1.2.1 Kurzzeiteffekte von Cannabis

Effekte von Cannabis auf kognitive Funktionen und Verhalten, die bis einige Stunden nach Einnahme der Droge zu verzeichnen sind, werden allgemein als Kurzzeiteffekte bezeichnet. Darunter fallen Veränderungen bezüglich Emotion, Wahrnehmung, Informationsverarbeitung sowie Motorik (für eine neuere Diskussion vgl. Ashton, 2001). Cannabis führt allgemein zu

² Generell beschränkt sich die Ausführung von Studien nur auf solche, die methodologischen Mindestansprüchen genügen, vgl. hierzu auch Kapitel 1.2.2.1.

euphorischen und entspannten Zuständen, sowie zu Veränderungen oder Intensivierungen der sensorischen und der Zeitwahrnehmung. Unerwünschte Effekte sind vor allem das Erleben von Angst sowie Panikreaktionen. Die auffälligste körperliche Veränderung betrifft eine Zunahme der Herzrate um bis zu 50% (siehe Hall & Solowij, 1998). Weitere Untersuchungen zu Kurzzeiteffekten beschäftigen sich mit basalen neuropsychologischen Prozessen. Der über alle bekannten Studien konsistenteste Befund ist die negative Beeinflussung von Gedächtnisfunktionen, vor allem des Kurzzeitgedächtnisses, was sich durch geringere Leistungen in der Merkspanne für Ziffernfolgen nachweisen lässt. Doch auch beim Wiedererkennen und freien Reproduzieren gelernter Wortlisten über einen längeren Zeitraum sind Beeinträchtigungen festzustellen (vgl. Solowij, 1998, für einen Überblick). Außerdem wurden Beeinträchtigungen mentaler und psychomotorischer Funktionen in Bezug auf Handtremor, Körperschwankungen, Verfolgen von Drehbewegungen, geteilter und Dauer-Aufmerksamkeit, Zahlen-Symbol-Ersetzungstests bis hin zu komplexeren Aufgaben wie in Fahr- und Flugsimulationen als Folge akuten Cannabiskonsums untersucht (Chait & Pierri, 1992). Obwohl viele nachteilige Einflüsse von Cannabis unbestritten sind, findet sich kein eindeutiger Konsens bezüglich der Gewichtung von positiven und negativen Effekten.

Interessant in diesem Zusammenhang sind z.B. Untersuchungen zu den Auswirkungen von THC auf das Führen von Kraftfahrzeugen. So sind seit langem negative Effekte auf fahrrelevante psychomotorische Parameter bekannt, wie z.B. Defizite in Tracking-Aufgaben, bezüglich der Auge-Hand-Koordination sowie Aufmerksamkeitsausfälle (z.B. Moskowitz, 1973). Dennoch gibt es Hinweise, die nahe legen, dass diese Defizite bis zu einem gewissen Grad durch eine Verringerung der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit kompensiert werden können. Das vorsichtige Fahrverhalten ist somit eine Folge der subjektiven Wahrnehmung der eigenen Beeinträchtigung. Daher kann man von zwei Quellen einer Verlangsamung ausgehen, nämlich einerseits einer direkten Verlangsamung der Reaktionszeiten als Folge der Droge und andererseits eine indirekte Verlangsamung als Folge der wahrgenommenen Beeinträchtigungen. Diese Kompensationstendenz bei Cannabis steht im Kontrast zu den bekannten Auswirkungen von Alkohol, der eine Überschätzung der eigenen fahrtechnischen Fähigkeiten nach sich zu ziehen scheint (Robbe, 1994; Chesher, 1995; Berghaus & Krüger, 1998).

Obwohl die Analyse von Blickbewegungen in der Erforschung der Effekte von Drogen eine gewisse Rolle gespielt hat, existieren nur wenige Untersuchungen zu den Kurzzeiteffekten von Cannabis auf die Blicksteuerung. So untersuchten Fant et al. (1998) Effekte des Rauchens einer einzigen Marijuana-Zigarette auf zehn Freiwillige, die angaben, gelegentlich Cannabis zu

konsumieren. Zusammen mit anderen physiologischen Parametern wird u.a. eine Leistungsminderung bei Blickfolgebewegungen berichtet. Dabei war nach zwei Stunden das Maximum des Leistungsdefizits erreicht. Alle berichteten Beeinträchtigungen verschwanden allerdings nach spätestens 24 Stunden. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die residualen Effekte des Rauchens einer einzigen Marijuana-Zigarette nur minimal sind. In einer älteren Untersuchung von Baloh et al. (1979) konnten keine Effekte akuter THC-Intoxikation (100 µg/kg Körpergewicht) auf Latenzen, Maximalgeschwindigkeiten und Amplituden von Sakkaden nachgewiesen werden. Eine Forschungsgruppe um M. Flom fand Mitte der 70er Jahre keine negativen Effekte von THC auf okulomotorisches Tracking (Flom et al., 1976) sowie auf die visuelle Sehschärfe (Adams et al., 1975). Dieselbe Arbeitsgruppe konnte allerdings Veränderungen der Pupillengröße bei geringen Lichtmengen (Brown et al., 1977), eine verzögerte Fähigkeit zur Dunkeladaptation (Adams et al., 1978) sowie eine Veränderung des Druckes im Auge feststellen, wobei letzteres eher als Epiphänomen der Entspannungswirkung von THC interpretiert wurde (Flom et al., 1975).

Die bisher umfassendste Studie zur akuten Wirksamkeit von Cannabis auf die Okulomotorik wurde von Ploner et al. (2002) durchgeführt. Zwölf Probanden mit zuvor unregelmäßigem Cannabiskonsumverhalten wurde oral 10 mg THC verabreicht. Zwei Stunden später wurden sie gebeten, je 30 Pro-, Anti- sowie memory guided-Sakkaden mit einer Amplitude von 10° bis 20° auszuführen³. Diese Ergebnisse wurden mit den Leistungen derselben Personen am Vortag verglichen⁴, bis zu dem die Pbn mindestens vier Wochen THC-Abstinenz bewahrt haben mussten. Bei den Prosakkaden fanden die Autoren signifikant höhere Latenzen in der THC-Bedingung (214 ms gegenüber 200 ms). Definiert wurde die Latenz als die Zeit zwischen Erscheinen des Reizes und dem Beginn der Blickbewegung. Hingegen waren keine Unterschiede bezüglich der maximalen Sakkadengeschwindigkeit und der Amplitude festzustellen. Auch die „main sequence“, also die Relation von Sakkadenamplitude und -geschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.3.2), war in beiden Bedingungen vergleichbar. In der memory-guided-Sakkadenbedingung konnten keine Unterschiede in den Latenzen festgestellt werden. Allerdings zeigte sich in diesem Paradigma ein signifikanter Unterschied in der Sakkadenamplitude. In der THC-Bedingung waren die Sakkadenamplituden signifikant länger, was zu einem um etwa 5% weniger hypometrischen Verhalten in Bezug auf das jeweilige Sakkadenziel führte. Ebenso war die

³ Prosakkaden sind Blickbewegungen zu einem in der Peripherie erscheinenden Zielreiz. Antisakkaden sind Blicke, die sich willentlich von einem erscheinenden Reiz wegbewegen müssen. Gedächtnisgesteuerte (memory guided-) Sakkaden bewegen sich zu Positionen, wo eine definierte Zeit zuvor ein Reiz erschienen ist. Für eine ausführliche Beschreibung dieser auch in der vorliegenden Studie verwendeten Aufgaben siehe die entsprechenden Kapitel 3, 4 und 5. Definitionen grundlegender Begriffe wie Fixationen und Sakkaden werden in Kapitel 1.4 gegeben.

⁴ Diese festgelegte Untersuchungsreihenfolge kann dabei zu Sequenzeffekten führen, die von den Autoren nicht kritisch diskutiert werden.

Varianz der Amplituden in der THC-Bedingung signifikant erhöht. Die Anzahl antizipatorischer Blickbewegungen – also falscher reflexhafter Bewegungen bei Erscheinen des Zielreizes – in dieser Aufgabe stieg signifikant von ca. 5% in der Kontrollbedingung auf etwa 12% in der THC-Bedingung. Diese Beobachtung fand ihre Entsprechung in einer signifikant höheren Fehlerrate in der Antisakkadenaufgabe in etwa derselben Größenordnung. Die Probanden waren in der Antisakkadenaufgabe nicht instruiert, Sakkaden einer bestimmten Länge auszuführen, weshalb die Amplituden in diesem Paradigma nicht ausgewertet werden konnten⁵. Da die Latenzdefizite nur auftraten, wenn eine direkte Reaktion auf einen Reiz erforderlich war, also in der Pro- und Antisakkadenaufgabe, und nicht in der Gedächtnisaufgabe, in der eine verzögerte Reaktion gefordert wurde, interpretierten die Autoren die Latenzeffekte im Sinne einer Verzögerung, die zeitlich vor der eigentlichen motorischen Ausführung der Sakkade ihre Ursache haben muss⁶. Aufgrund der bekannten neurophysiologischen Grundlagen der genannten Paradigmen⁷ stellen Ploner et al. Hypothesen zu kortikalen Beeinträchtigungen auf. Sie vermuten aufgrund der Latenzdifferenzen eine Beeinträchtigung der Funktionalität des präfrontalen und parietalen assoziativen Cortex und/oder der Basalganglien. Letztere werden auch für die beobachtete systematische Verlängerung der Sakkadenamplituden in der THC-Bedingung verantwortlich gemacht, und zwar speziell die Substantia Nigra pars reticulata (SNpr), eine Region, in der besonders viele CB-1-Rezeptoren zu finden sind. Für den vergrößerten variablen Amplitudenfehler in der Gedächtnisaufgabe wird eine Beteiligung des dorsolateralen Präfrontalkortex (DLPFC) diskutiert, der primär am räumlichen Arbeitsgedächtnis bei der memory guided-Sakkadenaufgabe beteiligt ist. Eine Beeinträchtigung des DLPFC sowie der SNpr sollten darüber hinaus auch zu den fehlerhaften Sakkaden zu den peripheren Reizen geführt haben, da sie über ihre inhibierenden Verbindungen zu den Colliculi Superiores an der Unterdrückung von reflexiven Sakkaden beteiligt sind. Die normale Beziehung von Sakkadenamplitude und -geschwindigkeit spricht den Autoren zufolge für ein intaktes basales Sakkadengenerierungssystem im Bereich des Mittelhirns und des Cerebellums, auch wenn gerade im Cerebellum eine hohe CB₁-Dichte anzutreffen ist.

⁵ In der vorliegenden Untersuchung wurden die Probanden dazu angehalten, eine Sakkade in der gleichen Länge auszuführen, wie der Zielreiz entfernt war (vgl. Kap. 4).

⁶ Vgl. Kapitel 3.1.2 für eine Darstellung der hier zugrundeliegenden neuronalen Verarbeitungswege.

⁷ Vgl. Kapitel 3.1 für eine Übersicht. In Kapitel 9 wird hierauf in Bezug auf die hier berichteten Ergebnisse wiederholt eingegangen.

1.2.2 Langzeiteffekte von Cannabis

Verglichen mit dem enormen Umfang der Forschungsbemühungen zu den Kurzzeiteffekten ist die Forschung zu längerfristigen Folgen ab mindestens zwölf Stunden nach dem letzten THC-Konsum eher übersichtlich. Dies liegt möglicherweise daran, dass die Kenntnisse über die beteiligten Metaboliten und ihre Funktionsweise weitgehend gering bleiben mussten (s. Kapitel 1.1). Eine instruktive Übersichtsarbeit zur Entwicklung des Forschungsstandes bis etwa Mitte der neunziger Jahre lieferten Pope et al. (1995). Gemäß diesen Autoren ist zu unterscheiden zwischen experimentellen Studien, in denen den Probanden unter kontrollierten Bedingungen Cannabis verabreicht wird, und quasiexperimentellen Studien, in denen Probanden mit einer spezifischen Vorgeschichte bezüglich ihres Cannabiskonsums untersucht werden. Ein entscheidender Vorteil des experimentellen Vorgehens ist die Möglichkeit der Kontrolle potentiell konfundierender Variablen wie z.B. des sozio-demographischen Status, der Sozialisations- und Familiengeschichte oder der Intelligenz. Leider werden in den meisten dieser Untersuchungen Probanden mit moderater THC-Vorerfahrung untersucht, und oft wurde die Abstinenzperiode zwischen dem letzten Konsum und dem Zeitpunkt der experimentellen Erhebung nicht kontrolliert. Daher sind Verhaltensänderungen nicht mit Sicherheit auf die verabreichte Dosis Cannabis zurückzuführen. Vor allem jedoch, und das ist ein größeres und fundamentaleres Problem, muss aus ethischen Gründen eine Erforschung von Effekten höherer Dosen sowie längerer Verabreichungszeiträume unterbleiben. Damit ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das reale Konsumverhalten und dessen Folgen stets eingeschränkt. Allgemein wird angenommen, dass eine einmalige Gabe von THC keine langfristigen Folgen zeitigt (z.B. Ploner et al., 2002). Immerhin konnten z.B. in einem Experiment von Leirer et al. (1991) mithilfe eines solchen Untersuchungsdesigns signifikante Einschränkungen der Performanz in einer Flugsimulationsaufgabe noch 48 Stunden nach der Verabreichung von THC nachgewiesen werden.

Der Mehrzahl der Studien zu Langzeiteffekten von Cannabis liegt ein quasiexperimenteller Versuchsplan zugrunde. Hierbei werden regelmäßige Konsumenten ohne psychiatrische Auffälligkeiten zu diversen neuropsychologischen Maßen (z.B. Gedächtnis, Konzentration oder Aufmerksamkeit) getestet, nachdem die oben beschriebenen akuten Effekte nicht mehr zu erwarten sind. Interessanterweise werden in über der Hälfte dieser Studien keine Unterschiede zwischen Usern und Kontrollprobanden bezüglich aller untersuchter Variablen berichtet (vgl. Pope et al., 1995). Diese Tatsache deutet darauf hin, dass einerseits weniger offensichtliche

Effekte wie z.B. bei langjährigem Alkoholmissbrauch zu erwarten sind und andererseits Methoden erforderlich sind, die möglichst sensibel potentielle Veränderungen abbilden.

1.2.2.1 Ältere Untersuchungen

Im Folgenden soll ein Überblick über Studien bis Mitte der neunziger Jahre gegeben werden, bei denen sich Unterschiede zwischen User- und Kontrollgruppen gezeigt haben. Die Darstellung orientiert sich vor allem an der bereits erwähnten Überblicksarbeit von Pope et al. (1995) und soll einen Eindruck über die methodische Herangehensweise vermitteln. Varma et al. (1988) konnten negative Effekte von siebenjährigem Cannabiskonsum nachweisen. In einer Reihe von verschiedenen perzeptomotorischen Aufgaben fanden sie erhöhte Reaktionszeiten nach zwölfstündiger Abstinenz, während zu diesem Zeitpunkt keine Unterschiede in der Gedächtnis- und Intelligenzleistung mehr festzustellen waren. In Untersuchungen von Block et al. (1990) sowie Block & Ghoneim (1993) zeigten sich ebenfalls erhöhte Reaktionszeiten sowie zusätzlich Verschlechterungen in visuomotorischen und Gedächtnisaufgaben nach zwölfstündiger Abstinenz. Langzeiteffekte für größere Abstinenzspannen wurden ebenfalls untersucht. So berichten Mendhiratta et al. (1988) Defizite nach über 12 Jahren, und Millsaps et al. (1994) wiesen eine leichte Beeinträchtigung des Gedächtnisses nach einem Zeitraum von einem Monat nach. Auch in einer Studie von Schwartz et al. (1989) zeigte sich noch nach sechs Wochen eine Leistungsminderung in einer visuellen Behaltensaufgabe sowie in der Wechsler-Gedächtnisskala für Prosapassagen bei acht Usern gegenüber neun Kontrollpersonen.

Insgesamt haben die Untersuchungen aus dieser Zeit zu sehr heterogenen Ergebnissen geführt, und sowohl methodische Unzulänglichkeiten wie auch eine fehlende theoretische Fundierung sind bei fast allen genannten Studien zu beklagen. Beispiele für methodische Probleme sind fehlende Kontrollgruppen, eine mangelhafte Kontrolle des sozio-ökonomischen Status oder der Intelligenzunterschiede, unbekannte oder kurze Abstinenzperioden, eine ungeklärte Vorgeschichte mit anderen Drogen, unzureichendes Matching der Gruppen sowie zu kleine Stichproben (siehe Pope et al., 1995 sowie Gonzalez et al., 2002 für ausführliche Diskussionen). Die ausgewählten abhängigen Variablen wirken zumeist willkürlich gewählt und wurden nicht aus theoretischen Überlegungen abgeleitet⁸. Insgesamt ist somit bis Mitte der neunziger Jahre ein Mangel an fundiertem Wissen zu persistierenden Effekten von Cannabis zu konstatieren.

⁸ Gonzalez et al. (2002) nennen insgesamt 7 Minimalkriterien für methodisch ausreichende Versuchsdesigns : 1. Die Einbeziehung einer Gruppe mit mindestens „vorwiegendem“ THC-Konsum, 2. eine Kontrollgruppe mit möglichst

1.2.2.2 Neuere Untersuchungen

In letzter Zeit wurden Untersuchungen zu neuropsychologischen Langzeiteffekten von THC-Konsum methodisch immer fundierter. Studien, die den zuvor genannten Kriterien genügen, sollen in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Im Zuge dieser Verbesserungen hat sich gleichzeitig eine neue Fragestellung entwickelt, nämlich ob die beobachteten Effekte eher auf Residuen der Droge im Gehirn oder auf irreversible Veränderungen des Zentralnervensystems zurückzuführen sind. Vor allem bei chronischen Usern ist zu erwarten, dass im Körperfett gespeicherte THC-Metaboliten langsam wieder in die Blutbahn abgegeben werden. Dieser Prozess kann unter Umständen mehrere Tage innerhalb der Abstinenzperiode in Anspruch nehmen (Pope et al., 2001). Aus diesem Grund erscheint es notwendig, zwischen Residualeffekten und irreversiblen Effekten streng zu unterscheiden.

Pope & Yurgelun-Todd (1996) konnten Leistungseinbußen bei Tests zum Wortlistengedächtnis und zur mentalen Flexibilität nach einem ganzen Tag Abstinenz bei 65 stark konsumierenden THC-Rauchern im Vergleich zu Gelegenheitskonsumenten nachweisen. Fletcher et al. (1996) fanden sogar noch nach drei Tagen Beeinträchtigungen des Wortlistengedächtnisses als auch Einschränkungen selektiver und geteilter Aufmerksamkeit. Sie fanden diese Unterschiede jedoch nur bei einer Gruppe alter User und nicht bei jüngeren Probanden. In Kontrast zu diesen Studien steht eine Untersuchung von Lyketsos et al. (1999), in der keine Unterschiede im Ausmaß der Beeinträchtigung kognitiver Funktionen zwischen stark, wenig und nicht konsumierenden Usern in einer zwölfjährigen Längsschnittuntersuchung gefunden wurden. In einer bemerkenswerten jüngsten Studie von Pope et al. (2001) wurden 108 Probanden (aktuelle, ehemalige und Nicht-User) über einen Beobachtungszeitraum von 28 Tagen untersucht. Insgesamt wurden nur in der Gruppe aktueller User Defizite in Aufgaben zum visuellen Behalten (nur zu Beginn der Untersuchung), zum Wortlistengedächtnis (bis sieben Tage) und beim Kartensortieren (bis 24 Tage nach Beginn der Untersuchung) gefunden. Ehemalige User zeigten gegenüber der Kontrollgruppe gar keine Unterschiede. Pope et al. (2001) interpretieren ihre Ergebnisse dahingehend, dass die berichteten Effekte ausschließlich auf Residualeffekte zurückzuführen sind und keine irreversiblen neurotoxischen Schädigungen darstellen.

keinem oder minimalem Konsum, 3. die Verwendung valider neuropsychologischer abhängiger Variablen, 4. die Sicherung und 5. die Erwähnung einer ausreichenden Abstinenzperiode, 6. die Erhebung möglicher anderer Substanzen, die die Experimentalgruppe eingenommen haben könnte, und 7. die Erhebung der Konsumentenhistorie bezüglich neurologischer und/oder psychiatrischer Probleme.

Von Interesse für die vorliegende Untersuchung sind außerdem Studien, die mittels EEG Defizite von THC-Konsumenten nachweisen konnten (Struve et al., 1999; Patrick & Struve, 2000). Noch nach einem Tag Abstinenz konnten sie bei THC-Konsumenten Auffälligkeiten in verschiedenen EEG-Maßen nachweisen, die zudem mit der bisherigen Konsumdauer der Probanden korreliert waren. Solowij (1998) führte ein Experiment durch, bei dem Probanden komplexe auditorische Signalpatterns diskriminieren mussten, während ereigniskorrelierte Potentiale abgeleitet wurden. Insbesondere untersuchte sie die P300-Komponente sowie die PN (*processing negativity*) nach einer Abstinenz von über zwölf Stunden. Die PN ist ein EEG-Muster, das typischerweise bei der Wahrnehmung von nicht zusammengehörigen Reizen wie z.B. Tonhöhen auftritt. User waren in dieser Untersuchung nicht nur weniger erfolgreich in der Diskriminationsaufgabe, sondern zeigten auch eine größere PN in Reaktion auf die Verarbeitung komplexer irrelevanter Stimuli. Überraschenderweise konnte in einem Nachfolgeexperiment gezeigt werden, dass dieser Unterschied nach einer Abstinenzperiode von im Mittel zwei Jahren erhalten blieb, wobei die Effektgrößen im Vergleich zum Vorexperiment etwa halbiert waren. Dieses Experiment kann damit als Hinweis auf langfristige Schädigungen interpretiert werden, bei denen sich die Prüfung einer möglichen Irreversibilität lohnt. Pope et al. (2001) diskutieren die Ergebnisse von Solowij (1998) in ähnlicher Weise und merken an, dass „die Möglichkeit besteht, dass verfeinerte neuropsychologische Messverfahren wie das EEG oder fMRI Defizite bei Langzeitusern von Cannabis unterhalb der Schwelle von neuropsychologischen Testbatterien enthüllen“ (S. 915; eigene Übersetzung). An genau diesem Punkt setzt die vorliegende Untersuchung an, da auch Blickbewegungen, die Indikatoren für die visuelle Informationsverarbeitung sind, abhängige Variablen zur Verfügung stellen, die potentiell „unterhalb der Schwelle von neuropsychologischen Testbatterien“ (s.o.) Verarbeitungsprobleme aufzudecken vermögen. Im nächsten Kapitel soll nun auf Forschungsergebnisse eingegangen werden, die die Analyse von Blickbewegungen bei Cannabis-Usern unmittelbar motivieren.

1.2.2.3 Langzeiteffekte auf visuelle Verarbeitung und die Rolle des „age of onset“

Einen entscheidenden Hinweis auf eine spezifische Beeinträchtigung der visuellen Informationsverarbeitung liefert eine Untersuchung von Ehrenreich et al. (1999), die an der Universität Göttingen durchgeführt wurde. Die Autoren verwandten eine computergestützte Batterie zur Testung neuropsychologischer Funktionen bei 99 Cannabisusern, bei denen der Konsum anderer Drogen mittels eines Urin- und Blutscreenings ausgeschlossen wurde, sowie bei 50 Kontrollprobanden. Der letzte Cannabiskonsum lag im Mittel 30 Stunden vor dem

Untersuchungszeitpunkt. Die Gruppen wurden gematcht bezüglich Alter, Geschlecht, Ausbildung, sozio-demographischem Status und Intelligenz. Personen mit psychiatrischen Auffälligkeiten oder vormaligen Kopfverletzungen wurden aus der Stichprobe ausgeschlossen.

Die angesprochene Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP; Zimmermann & Fimm, 1993) ist ein in deutschen Kliniken routinemäßig angewendetes neuropsychologisches Untersuchungsinstrument und deckt ein breites Spektrum kognitiver und aufmerksamkeitsbezogener Funktionen ab. Es besteht aus folgenden Aufgaben: Alertness (Reaktionszeiten mit vs. ohne akustischem Warnsignal), geteilte Aufmerksamkeit (eine „dual task“ zur Entdeckung visueller und akustischer Reize), Flexibilität (Probanden müssen entweder auf einen Buchstaben oder auf eine Ziffer reagieren), Arbeitsgedächtnis (nacheinander dargebotene Ziffern müssen mit einer zuvor gezeigten Ziffer verglichen werden) und einer visuellen Suchaufgabe. In der visuellen Suchaufgabe werden die Probanden gebeten, mittels Tastendruck die An- bzw. Abwesenheit eines bestimmten kritischen Items (ein in eine bestimmte Richtung geöffnetes Quadrat) innerhalb einer 5x5-Matrix aus Distraktoren (in andere Richtungen geöffnete Quadrate) zu entscheiden (s. Abbildung 2.1). Insgesamt entspricht diese Studie den genannten methodischen Standards von Gonzales et al. (2002, siehe Kapitel 1.2.2.1).

Die Autoren fanden in keiner der genannten Aufgaben Unterschiede zwischen Usern und Kontrollprobanden, außer in der visuellen Suchaufgabe. Probanden, die relativ spät mit dem regelmäßigen Konsum von THC begonnen haben (ab dem 17. Lebensjahr, $n = 50$), zeigten auch hier keine Unterschiede zur Kontrollgruppe. Probanden mit einem früheren *age of onset* (16. Lebensjahr oder darunter, $n = 49$) hingegen zeigten signifikant verlangsamte Reaktionszeiten in dieser Aufgabe, und zwar sowohl in den Bedingungen, in denen der Zielreiz anwesend war als auch in den reinen Distraktorbedingungen. Darüber hinaus wird das Problem der Differenzierung von Residual- vs. irreversiblen Effekten thematisiert. Mittels einer schrittweisen Regressionsanalyse über alle 99 User konnte gezeigt werden, dass *age of onset* ein guter Prädiktor der Performanz war, während dies auf Indikatoren der akuten und kumulativen Intoxikation nicht zutraf. In zusätzlichen Varianzanalysen wurden auch Alter (das in der *early onset*-Gruppe geringer war), Geschlecht, THC-Konzentration im Blut sowie die geschätzte Lebenszeitdosis als Kovariaten eingeführt, ohne dass sich jedoch an den beschriebenen Unterschieden etwas änderte.

1.3 Offene Fragen und Gliederung der Untersuchung

Die in der Studie von Ehrenreich et al. (1999; s.o.) berichteten Resultate bilden den zentralen Ausgangspunkt für die vorliegende Experimentalreihe. Bemerkenswerterweise sind die User mit frühem *age of onset* nur in einem der vielen Untertests aus der TAP auffällig. Daher liegt es nahe, nach einem charakteristischen Merkmal dieses Subtests zu suchen, das die Reaktionszeitunterschiede in dieser Aufgabe verursachen könnte. Eine nähere Betrachtung der Aufgaben zeigt, dass sich die visuelle Suche gegenüber allen anderen Aufgaben dadurch auszeichnet, dass zu ihrer Bearbeitung ein visuelles Durchmustern des Reizmaterials notwendig ist. Aus dieser Überlegung heraus wird als Arbeitshypothese eine Beeinträchtigung der Blicksteuerung oder der damit im Zusammenhang stehenden visuellen Informationsverarbeitung angenommen. Um diese Hypothese systematisch zu untersuchen, sind verschiedene Vorüberlegungen notwendig.

Zunächst ist es wichtig, die Ergebnisse von Ehrenreich et al. (1999) zu replizieren, um zu gewährleisten, dass es sich dabei um ein stabiles Phänomen handelt. Darüber hinaus ist es vor dem Hintergrund des Gesagten notwendig, das Blickverhalten der Cannabiskonsumenten bei genau dieser Aufgabe detailliert zu analysieren, um gezieltere Hypothesen über gestörte Teilleistungen treffen zu können. Die visuelle Informationsverarbeitung in Zusammenhang mit der Steuerung der Blickbewegungen ist ein sehr komplexer Prozess, der die Zusammenarbeit verschiedener Regionen im Gehirn voraussetzt, um erfolgreich vonstatten gehen zu können (vgl. Kapitel 3.1.2).

Die Untersuchung der Blickbewegungen von THC-Konsumenten mit frühem *age of onset* bei der visuellen Suche stellt das erste in dieser Arbeit berichtete Experiment dar. Auf der Basis der gewonnenen Ergebnisse können dann gezielt Teilleistungen der visuellen Verarbeitung und Blicksteuerung untersucht werden, und zwar anhand von Paradigmen, die eine selektive Untersuchung von Teilkomponenten erlauben und deren neurophysiologische Grundlagen wohlbekannt sind. Auf die gezielte Untersuchung dieser Teilprozesse wird in den Experimenten 2 bis 6 eingegangen (Kapitel 3-7). In einem abschließenden Experiment wird auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse untersucht, wie sich mögliche Defizite in der Blicksteuerung auswirken auf eine im Alltag hochrelevante Aufgabe, die eine funktionierende Blicksteuerung und Informationsverarbeitung voraussetzt, nämlich das Lesen. Dieses 7. Experiment stellt den Abschluss der hier berichteten experimentellen Reihe dar (Kapitel 8).

1.4 Blickbewegungen: Grundlagen

Bevor in dieser Arbeit die einzelnen Experimente vorgestellt werden, soll zunächst ein Einblick in die Grundlagen und Terminologie der Blickbewegungsforschung gegeben werden. Es soll allerdings vermieden werden, auf nähere Details einzugehen, da diese in einschlägigen Übersichtsarbeiten nachzulesen sind (z.B. Inhoff & Radach, 1998; Liversedge & Findlay, 2000; Findlay & Gilchrist, 2003). Eine Systematisierung der für die vorliegende Untersuchungsreihe relevanten Blickbewegungen wird im Zuge der Darstellung eines theoretischen Rahmens in Kapitel 3.1.1 vorgenommen.

Das *visuelle Feld*, also der Bereich, in dem bei relativ konstant ruhendem Auge visuelle Information aufgenommen werden kann, wird allgemein in drei Bereiche gegliedert: In der *Fovea* (die zentralen 2° des Sehfeldes) ist die Sehschärfe maximal, in der *Parafovea* (bis zu 5°) schon bedeutend schlechter und in der *Peripherie* (>5°) bereits stark eingeschränkt. In der Leseforschung bezeichnet man das aktuell fixierte Wort konventionell als foveal, während die umliegenden Wörter der Parafovea zugeordnet werden (vgl. z.B. Rayner & Pollatsek, 1989)⁹.

Beim Betrachten eines Bildes oder einer Landschaft bewegen sich unsere Augen meist nicht kontinuierlich, sondern eher ruckartig. Diese ruckartigen Sprünge des Auges nennt man *Sakkaden*. Diese Sakkaden erreichen Geschwindigkeiten von bis zu 600° pro Sekunde. Durch die Schnelligkeit dieser Bewegung kann während einer Sakkade fast keine neue Information aufgenommen werden. Diese reduzierte Aufnahmebereitschaft für visuelle Informationen bezeichnet man als *saccadic suppression* (Matin, 1974). Der dynamische Verlauf einer Sakkade verhält sich wie folgt: Zunächst steigt die Geschwindigkeit bis zu ihrem Maximum kurz vor dem Mittelpunkt der Bewegung an und fällt dann etwas weniger steil bis zu ihrem Ende wieder ab. Eine Sakkade von etwa 2° dauert etwa 30 ms, während eine etwas längere Sakkade von ca. 5° etwa 40-50 ms benötigt (Abrams, Meyer & Kornblum, 1989; Becker, 1989).

Die Ruhephasen des Auges zwischen den Sakkaden nennt man *Fixationen*. Während einer Fixation kann visuelle Information aufgenommen werden. Im Durchschnitt dauern Fixationen etwa 200-300 ms. Die Fixationen machen also den zeitlichen Aspekt von Blickbewegungen aus, während die Sakkaden für den „Transport“ der Fovea durch den visuellen Raum verantwortlich sind. Während der Fixationen steht das Auge allerdings nicht völlig still, auch wenn es uns im

⁹ Vgl. Kapitel 7.1 zu Definitionen von visueller Spanne und dem funktionalen visuellen Feld.

Alltag so erscheint. Vielmehr gibt es eine Reihe von sehr kleinen Bewegungen, die zur visuellen Wahrnehmung notwendig sind. Während der Fixationen kommt es zu einem ständigen Zittern der Augen, das als *Fixationstremor* bezeichnet wird. Seine Ursache ist bis heute unklar. Größere Bewegungen während einer Fixation sind sogenannte *Driftbewegungen*, die vermutlich aufgrund einer mangelhaften Kontrolle der Augen durch das Nervensystem zustande kommen. Neben diesen vergleichsweise langsamen Driftbewegungen kommt es auch zu schnellen *Mikrosakkaden*. Diese Mikrosakkaden bilden das untere Ende einer Verteilung der Sakkadenamplituden und kennzeichnen damit besonders kurze Sakkaden. Neuere Forschungsergebnisse legen nahe, dass diese Sakkaden funktionale Bedeutung besitzen und Aufmerksamkeitsprozesse widerspiegeln (Engbert & Kliegl, 2003a).

Zusätzlich gibt es noch andere Typen von großen Augenbewegungen. Beim Verfolgen eines beweglichen Objekts können wir unsere Augen im Gegensatz zu den Sakkaden auch relativ langsam über größere Strecken bewegen. Solche Bewegungen nennt man *Blickfolgebewegungen*. Wenn wir unsere Augen zum Fokussieren eines Objektes aufeinander zu (konvergent) oder nach außen (divergent) bewegen, sind dies *Vergenzbewegungen*. Außerdem sei noch auf *vestibuläre Augenbewegungen* hingewiesen. Sie sollen sicherstellen, dass unsere Augen zur Kompensation von Körper- oder Kopfbewegungen weiterhin in die gleiche Richtung schauen (White, 1976).

Nachdem anhand dieses kurzen Überblicks einige grundlegende Definitionen gegeben worden sind, wird im nächsten Kapitel das erste Experiment beschrieben, das sich mit den Blickbewegungen bei der visuellen Suche beschäftigt.

2. Experiment 1: Blickbewegungen bei der visuellen Suche

In diesem Experiment soll genauer analysiert werden, inwiefern langjährige Cannabiskonsumenten mit frühem *age of onset* Auffälligkeiten in der Blicksteuerung bei einer visuellen Suchaufgabe zeigen. Das Experiment ist motiviert durch eine Studie von Ehrenreich et al. (1999), bei der sich in genau dieser Aufgabe Reaktionszeitunterschiede zwischen der THC- und der Kontrollgruppe ergeben haben (s. Kapitel 1.2.2.3). Da in dieser Studie die visuelle Suche die einzige Aufgabe war, die ein Durchmustern des Suchfeldes mit den Augen notwendig machte, und die einzige, in der die THC-Gruppe mit frühem *age of onset* Auffälligkeiten zeigte, liegt die Hypothese nahe, dass bei dieser Gruppe Schwierigkeiten in der Blicksteuerung vorhanden sein könnten. Um diese eher allgemeine Vermutung zu spezifizieren, wird in diesem Experiment anhand einer neuen Stichprobe dieselbe Aufgabe durchgeführt, wobei gleichzeitig die Blickbewegungen gemessen werden. Dadurch können einerseits die Ergebnisse von Ehrenreich et al. repliziert und andererseits nach Auffälligkeiten im Suchmuster gesucht werden, die Hinweise auf mögliche Ursachen für die Reaktionszeitdefizite liefern können. Bevor das Experiment selbst im Detail beschrieben wird, soll zunächst auf den bisherigen Forschungsstand zur okulomotorischen Steuerung bei der visuellen Suche eingegangen werden.

2.1 Theoretischer Hintergrund: Blickbewegungen bei der visuellen Suche

Eine der grundlegendsten Resultate der okulomotorischen Forschung ist die Tatsache, dass sich beim Betrachten von Bildern Fixationen nicht gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilen (Buswell, 1935; Yarbus, 1967; Henderson, 2003). Stattdessen ist die räumliche Verteilung der Fixationspositionen abhängig vom Informationsgehalt spezifischer Regionen, was sich bereits in den ersten Sekunden des Scannings eines Bildes nachweisen lässt (Mackworth & Morandi, 1967). Sogar beim Betrachten von homogenen Bildflächen sind die Fixationen weder gleichmäßig noch zufällig verteilt. Nach einer Untersuchung von Ford et al. (1959) sind Fixationen in der Mitte und an den Rändern eines Suchraumes eher unterrepräsentiert. Charakteristische Systematiken beim Mustern von Gesichtern unter degradierten Reizbedingungen wurden von Noton & Stark (1971 a,b) untersucht. Sie fanden bei ihren Probanden eine Tendenz zu stereotypen und idiosynkratischen Blickpfaden¹. Ein eher theoriegeleiteter und quantitativer Ansatz wurde von Groner et al. (1984) sowie Groner & Menz (1985) entwickelt. Sie führten eine Unterscheidung

¹ Für eine Untersuchung zu idiosynkratischen Blickbewegungsmustern in *verschiedenen* Aufgaben vgl. Andrews & Coppola (1999).

zwischen einem lokalen Blickpfad, der eher aus einer datengesteuerten bottom-up-Verarbeitung resultiert, und einem eher strategisch und top-down gesteuerten globalen Blickpfadmuster ein. Dieser Ansatz erlaubt die Ableitung quantitativer Hypothesen über das Scanning-Verhalten bei der Betrachtung von Bildern oder natürlichen Umgebungen, während die Übertragung auf Aufgaben mit eher homogenen Suchräumen mit Schwierigkeiten verbunden ist.

Mittels einer Aufgabe, in der ein bestimmter Buchstabe unter anderen gesucht werden sollte, konnte Gordon (1969) eine systematische Beziehung zwischen Aufgabenschwierigkeit und der Sakkadenamplitude nachweisen. Eine höhere Schwierigkeit der Aufgabe führt demnach global zu kürzeren Sakkadenamplituden. In einem Modell von Jacobs (1986) wurden Zusammenhänge dieser Art systematisiert. Demzufolge führt eine Zunahme der zu verarbeitenden visuellen Information zu einer allgemeinen Reduktion der Sakkadenamplitude, zu einer Zunahme der Fixationsdauern oder zu beidem. Hooge & Erkelens (1996) konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass bereits die Erwartung einer geringen Diskriminierbarkeit von Zielreizen bei der visuellen Suche strategisch verlängerte Fixationsdauern nach sich zieht. Darüber hinaus konnte in dieser Studie anhand einer Analyse der Reinspektionen (d.i. die erneute Fixierung eines bereits zuvor fixierten Objekts) nachgewiesen werden, dass das Ergebnis der aktuellen fovealen Zielreize zur Vorbereitung der direkt nachfolgenden Sakkade nicht verwendet wird. Dieser Sachverhalt legt die Idee einer Vorprogrammierung der Fixationsdauern auf Basis der zur Analyse der vorigen Zielreize benötigten Fixationsdauern nahe (vgl. auch Hooge & Erkelens, 1998).

Die Leistungsfähigkeit in einer visuellen Suchaufgabe hängt zudem ab von der Sehschärfe und der Diskriminationsfähigkeit in der Peripherie (Bloomfield, 1975). Der Bereich, innerhalb dessen ein bestimmter Grad visueller Diskrimination geleistet werden kann, wird gewöhnlich visuelle Spanne genannt². Allgemein gesprochen ist der Zweck einer Blickbewegung, Regionen oder Objekte von besonderem Interesse außerhalb des funktionalen visuellen Feldes in die Nähe der Fovea zu bringen. Daraus folgt, dass die individuelle Effektivität der extrafovealen Verarbeitung die Performanz bei einer visuellen Suchaufgabe direkt mitbestimmen sollte. Diese Vorhersage wurde von Nies et al. (1999) getestet, die Blickbewegungen bei Novizen und Experten beim Suchen extrem kleiner Zielreize vor homogenem Hintergrund untersuchten. Ausgewertet wurden hierzu speziell die Durchgänge, in denen ein Zielreiz anwesend war. Innerhalb dieser Durchgänge wurden Fixationen in der Nähe des Zielreizes betrachtet, die entweder zu einer nachfolgenden Entdeckung oder einer Nicht-Entdeckung führten. Aufgrund dieser Daten konnten Ellipsen

² Für eine Diskussion hierzu siehe Findlay & Gilchrist (1998) sowie eine ausführlichere Darstellung in Kapitel 7.1.

konstruiert werden, die einer 70% Entdeckungswahrscheinlichkeit rund um den Zielreiz entsprechen. Diese Schätzungen des nutzbaren Blickfeldes variierten interindividuell in ihrer Größe sowie in ihrer horizontalen und vertikalen Ausdehnung. Die Validität dieser Methode wurde in einem zusätzlichen psychophysischen Entdeckungsexperiment bestätigt. Als wichtigstes Ergebnis zeigte sich innerhalb einer Stichprobe von 15 Probanden eine Korrelation der Größe des nutzbaren Blickfeldes mit der Suchleistung von $r = .73$. Demzufolge ist die extrafoveale visuelle Diskriminationsfähigkeit ein guter Prädiktor für eine effektive Suchleistung. Eine direkte Untersuchung hierzu im Zusammenhang mit den Effekten von Cannabis wird in Kapitel 7 berichtet.

Andererseits ist es denkbar, dass die Menge der aus der Peripherie extrahierten Information abhängig von der Fixationsdauer ist. In einem Experiment von Hooge & Erkelens (1999) waren Probanden allerdings nicht in der Lage, ihre Fixationsdauern in Abhängigkeit von der Menge zu verarbeitender peripherer Information strategisch zu variieren³. Diese Beobachtung korrespondiert mit Ergebnissen aus einer Analyse der Blickbewegungen beim Lesen von Radach & Heller (2000). Eine höhere Fixationsdauer, die, so könnte argumentiert werden, zu einer vermehrten parafovealen Verarbeitung führen könnte, resultierte jedoch nicht in einer längeren darauffolgenden Sakkade. Diese Beobachtungen machen die Annahme einer Zunahme der extrafovealen Verarbeitung bei steigender Fixationsdauer unwahrscheinlich.

Selbstverständlich beeinflussen auch die Eigenschaften einer visuellen Suchaufgabe selbst das Blickverhalten. Neben etablierten Effekten wie dem Einfluss von Distraktorheterogenität und Zielreiz-Distraktor-Ähnlichkeit (u.a. Duncan & Humphreys, 1989) konnten neuere Experimente auch einen spezifischen Einfluss des Suchtyps („parallel“ vs. „seriell“) auf das Blickverhalten zeigen. Gilchrist et al. (1999) fanden ein eher stereotypes Scanning-Verhalten bei einer seriellen Suchaufgabe im Vergleich zu einer parallelen Suche, in der ein „Pop Out“ des Zielreizes gegeben ist. In einer Reihe von Experimenten, bei denen parallele und serielle Suchaufgaben integriert waren, wiesen Zelinsky & Sheinberg (1997) eine hohe Korrelation zwischen der Sakkadenanzahl und der Reaktionszeit, aber nur eine schwache Korrelation zwischen durchschnittlicher Fixationsdauer und Reaktionszeit nach. Dieser Befund legt nahe, dass Fixationszeiten eher weniger vom Suchtyp („parallel“ vs. „seriell“) oder der Aufgabenschwierigkeit abhängen. Heute wird die Unterscheidung zwischen paralleler und serieller Verarbeitung bei der visuellen Suche im

³ Im Gegensatz zum zuvor berichteten Experiment von Hooge & Erkelens (1996) handelt es sich hier nicht um eine Manipulation der Erwartung, wie schwer Zielreize während der nächsten Fixationen zu diskriminieren sind, sondern um die Variation der Menge der zu verarbeitenden peripheren Information.

Sinne einer strikten Dichotomie eher als eine nützliche, aber fiktive Heuristik betrachtet (Wolfe, 1996).

In der gegenwärtigen Literatur zur visuellen Suche ist eine lebendige Diskussion über die Rolle von Gedächtnisprozessen zu verzeichnen. Als Antwort auf eine provokative Studie von Horowitz & Wolfe (1998), in der die Rolle des Gedächtnisses bei der visuellen Suche grundsätzlich in Frage gestellt wurde, untersuchten Gilchrist & Harvey (2000) Blickbewegungen, während die Probanden in einem Suchfeld mit Buchstaben einen bestimmten Zielreiz finden sollten. Eine Analyse der Reinspektionen ergab, dass die Blicke zwar oft zu bereits angeblickten Objekten zurückgelenkt wurden, was im Sinne von Horowitz & Wolfe für eine „gedächtnislose“ Suche spräche. Jedoch geschah dies nicht im Sinne einer Zufallsverteilung, wie es ein speicherfreies Modell vorhersagen würde. In einer vergleichbaren Studie von Peterson et al. (2001), in der auch Blickbewegungen bei einer visuellen Suchaufgabe gemessen wurden, zeigte sich ebenfalls, dass die auftretenden Reinspektionen inkompatibel mit der Annahme eines „gedächtnislosen“ Suchens sind. Ein hoher Anteil der Reinspektionen galt dem Zielreiz, was darauf hinweist, dass die Probanden sich gemerkt haben, welche Reize noch nicht adäquat verarbeitet worden sind. In einem dual task-Paradigma fanden Woodman et al. (2001) andererseits, dass unabhängig von der Belastung des visuellen Arbeitsgedächtnisses (2 vs. 4 Items) die visuelle Suche effizient bleibt, was entweder gegen eine Beteiligung des Gedächtnisses spricht oder dafür, dass die Belastung in diesem Experiment nicht hinreichend operationalisiert wurde. Vermutlich liegt die Lösung dieser Debatte in einem komplexeren Modell des Gedächtnisses, das zwischen verschiedenen Informationstypen unterscheidet.

Eine experimentelle Manifestation eines low level-Kurzzeitgedächtnisses für bereits fixierte Regionen findet sich bei Hooge & Frens (2000), die einen „inhibition of saccadic return“-Effekt berichten. Der Effekt beruht auf dem bekannten „inhibition of return“-Phänomen aus der Forschung zur räumlichen Aufmerksamkeit (Posner & Cohen, 1984; vgl. Klein, 2000, für eine jüngere Diskussion). In ihrem Experiment mussten die Probanden eine Anzahl von Punkten nach einer zuvor bestimmten Reihenfolge mustern. In diesem Paradigma sind Reinspektionen Teil dieser vorgegebenen Reihenfolge. Interessanterweise ist die Dauer der Fixationen vor einer solchen Reinspektion um bis zu 40% erhöht. Dieser Befund kann als Beleg für den genannten Inhibitionseffekt gelten. Diese Beobachtung lässt sich allerdings nicht für das Lesen reproduzieren, wo die Fixationsdauern vor rückwärtsgerichteten Sakkaden verringert sind im Vergleich zu Fixationsdauern vor in Leserichtung gerichteten Sakkaden (Radach & Heller, 2000; vgl. Rayner et al., 2003).

2.2 Methode

Im Folgenden soll die für dieses Experiment zugrundeliegende Methodik beschrieben werden. Generell orientiert sich die Durchführung der Aufgabe eng an dem Vorgehen von Ehrenreich et al. (1999; s. Kapitel 1.2.2.3). Verwendet wird also dieselbe visuelle Suchaufgabe aus der „Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung“ (TAP, Zimmermann & Fimm, 1993)⁴. Allerdings sind zwei gewichtige Unterschiede zu verzeichnen: Erstens besteht in der vorliegenden Untersuchung die THC-Gruppe ausschließlich aus Konsumenten mit frühem *age of onset*. Zweitens werden in der vorliegenden Untersuchung die Blickbewegungen beim Lösen der Aufgabe registriert und ausgewertet. Basierend auf den oben berichteten Erkenntnissen zur visuellen Suche (vgl. Kapitel 2.1) können Irregularitäten des okulomotorischen Verhaltens der Cannabisuser in vielerlei Hinsichten vermutet werden. Gemäß dem einflussreichen Modell der Sakkadensteuerung von Findlay & Walker (1999) ist die neuronale Kontrolle der Blickbewegungssteuerung in einer Hierarchie von mehreren Kontrollebenen organisiert, von elementaren, rein automatischen über auf Lernerfahrungen beruhenden Scanningroutinen bis hin zu eher *top down*-kontrollierten strategischen Kontrollmechanismen. Dieses Modell wird in Kapitel 3.1.1 im Zusammenhang mit der Darstellung einzelner Teilleistungen des okulomotorischen Systems ausführlich diskutiert. An dieser Stelle soll daher nur darauf hingewiesen werden, dass in der visuellen Suchaufgabe alle Ebenen dieser Hierarchie von Bedeutung sein können, um adäquates okulomotorisches Verhalten zu generieren. Dadurch kann eine Analyse der Blickbewegungen in der Lage sein, erste Hinweise auf spezifische Schädigungen durch THC zu geben, die in nachfolgenden Experimenten direkt überprüft werden können.

2.2.1 Probanden

Das folgende Profil der Probanden betrifft alle in dieser Arbeit berichteten Untersuchungen. 20 gesunde Cannabis-User, bei denen der Konsum anderer Drogen mittels Blut- und Urinscreenings sowie einem Interview ausgeschlossen wurde, nahmen an der Untersuchung teil. Die Rekrutierung erfolgte mittels einer Zeitungsannonce sowie Mund-zu-Mund-Propaganda. Das mittlere Alter in dieser Gruppe betrug 24;9 Jahre (SD = 7;8), mit einem Minimum von 19 Jahren und einem Maximum von 45 Jahren. Die Minimalkriterien zur Einstufung als Langzeitkonsument

⁴ Vgl. Kapitel 1.2.2.3 für eine ausführlichere Beschreibung der TAP.

waren eine vierjährige Konsumperiode mit mindestens einem Joint alle drei Tage. Die mittlere Konsumdauer beträgt 9,3 Jahre (SD = 7,4; Minimum 4, Maximum 28 Jahre). Durchschnittlich konsumierten die Teilnehmer 10,5 Joints pro Woche (SD = 9,0; Minimum 2, Maximum 28) und wiesen eine mittlere akkumulierte Lebenszeitdosis von geschätzten 3526 Joints auf (SD = 2210,8; Minimum 728, Maximum 7280). Das *age of onset* war niedrig und relativ homogen, zwischen dem 14. und 16. Lebensjahr (M = 15,4, SD = 0,7).

An jedem User wurde im Aachener Universitätsklinikum die folgenden Analysen durchgeführt: a) ein Urinscreening zum Nachweis von Drogenrückständen (Benzodiazepin, Barbiturate, Amphetamine, Alkohol, Kokain und Opiate), b) die Bestimmung der Blutkonzentration von Δ^9 -THC sowie dessen hauptsächlichen Metaboliten, THCOH und THCCOOH via Gaschromatographie und Massenspektrometrie und c) die Bestimmung der Absolutwerte von THC-Metaboliten im Urin mittels FPIA („fluorescent polarization immunoassay“, vgl Moeller et al., 1992). Darüber hinaus nahmen die User an einem halbstrukturierten psychiatrischen Interview und einem psychopathometrischen Test (MMPI) teil, um Probanden mit Depressionen oder anderen psychiatrischen Auffälligkeiten, die die Testresultate beeinträchtigen könnten, auszuschließen. Außerdem wurden die Cannabis-User einem IQ-Screening (Subskala LPS-4: abstraktes logisches Denken von Horn, 1983) unterzogen. Im Mittel erreichten die Probanden einen IQ von 118,1 (SD = 9,9), mit einem Range von 107 bis 137 Punkten. Somit wurde sichergestellt, dass keine Probanden mit intellektuellen Defiziten, sondern intelligente Studenten an der Studie teilnehmen.

Die Kontrollgruppe bestand aus 20 gesunden Teilnehmern ohne bisherige Erfahrung mit Drogen inklusive Cannabis (Interview). Beide Gruppen bestanden fast ausschließlich aus Universitätsstudenten, alle waren in ihr soziales Umfeld normal integrierte, erfolgreiche Individuen mit vergleichbarem sozio-demographischem Status. Der Alkoholkonsum wurde im Vorfeld in beiden Gruppen auf eine Menge von maximal ca. vier Bieren pro Woche (bzw. äquivalent) limitiert. Alle Probanden nahmen zudem an standardisierten optometrischen Tests teil (Titmus Vision Tester), um Teilnehmer mit nicht-korrigierter, eingeschränkter Sehschärfe ausschließen zu können.

2.2.2 Aufgabe und Durchführung

Die visuelle Suchaufgabe wurde von Zimmermann & Fimm (1993) als Teil einer computergestützten neuropsychologischen Testbatterie entwickelt. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, die An- bzw. Abwesenheit eines vorher spezifizierten Zielreizes zu beurteilen, der an zufälliger Position innerhalb einer Matrix aus 5x5 Items erscheinen konnte. Der Zielreiz war ein zu einer bestimmten Seite geöffnetes Quadrat, das unter zu anderen Seiten hin geöffneten Quadraten ausfindig gemacht werden musste (vgl. Abbildung 2.5). Die Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Distraktoren war dabei so hoch, dass nicht von einer „Pop Out“-Suche gesprochen werden kann. Insgesamt wurden jedem Probanden 50 Matrizen mit und 50 ohne Zielreiz präsentiert, die in zufälliger Reihenfolge angeordnet waren. Gemäß der originalen Instruktion von Zimmermann & Fimm, die ebenso auch von Ehrenreich et al. (1999) genutzt wurde, wurden die Probanden explizit aufgefordert, jede Matrix in einer lesehaften Weise, d.h. Zeile für Zeile von links nach rechts, zu durchmustern, bis sie entweder den Zielreiz entdecken oder am Ende der Matrix angelangt sind. Ausdrücklich wurde in einer Instruktion am Bildschirm darauf hingewiesen, dass diese Musterung so schnell und genau wie möglich geschehen soll⁵.

Visuelle Suche:

Screenshot (Beispiel)

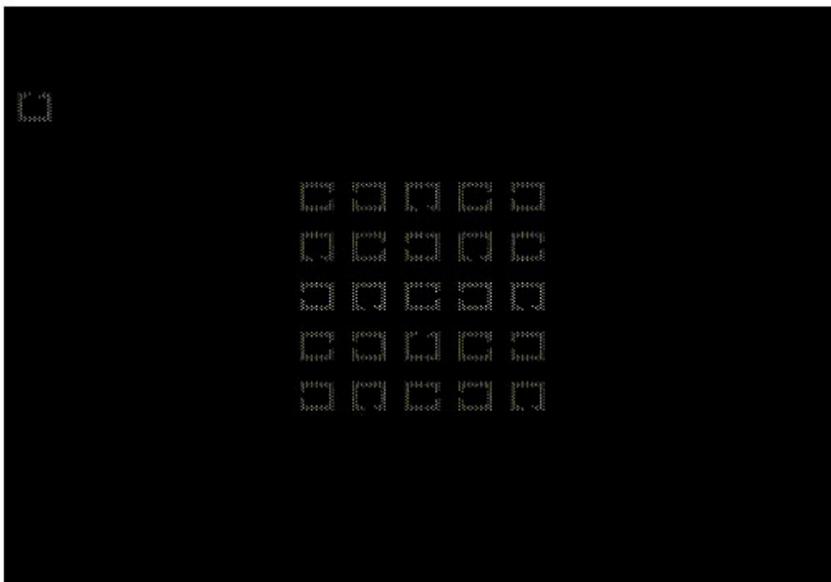


Abbildung 2.1: Beispiel für ein Suchfeld *mit* Zielreiz im Paradigma der „Visuellen Suche“ aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP, Zimmermann & Fimm, 1993). Der Zielreiz bleibt über alle Durchgänge identisch.

⁵ Für den Wortlaut der Instruktion vgl. Anhang A.

2.2.3 Apparatur

Die Blickbewegungen wurden aufgezeichnet mithilfe eines SR Research Ltd. EyeLink Infrarot Eye Tracking-Systems mit einer Samplingrate von 250 Hz (entspricht 4 ms zeitlicher Auflösung). Die relative Genauigkeit des Systems ist in der Größenordnung weniger Bogenminuten. Die Auflösung der Pupille liegt bei 0.1%, so dass Bewegungen der Pupille ab 0.01 mm zuverlässig erkannt werden. Die absolute Genauigkeit bezüglich des Vergleichs von unmittelbar wiederholten Fixationspositionen (McConkie, 1981) wurde in unabhängigen Testdurchgängen bestimmt und beträgt abhängig vom Kalibrationsaufwand etwa $0,5^\circ$ für ein zweidimensionales Stimulusfeld. Der Messapparat besteht aus einem Kopfband, an dem zwei kleine Hochgeschwindigkeitskameras gleichzeitig von beiden Augen 250 Bilder pro Sekunde aufnehmen können. Eine dritte Kamera vorne am Kopf ist auf 4 Infrarot-Lichtquellen am Monitor ausgerichtet und soll zur Kompensation von Kopfbewegungen und zur Feststellung der tatsächlichen Blickposition am Darbietungsmonitor dienen (siehe Abbildung 2.2).

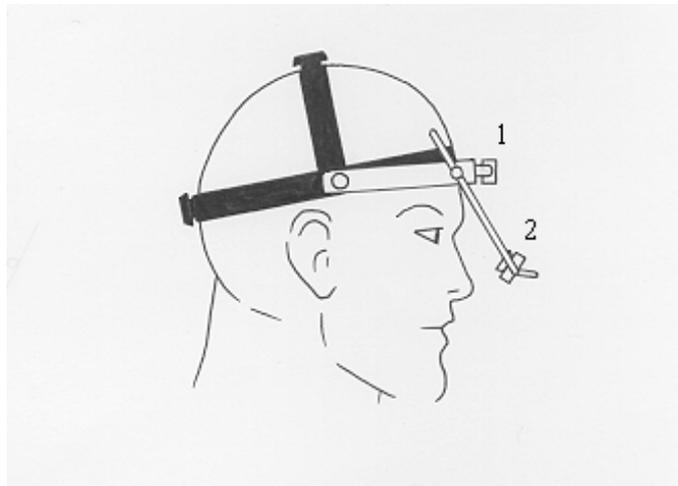


Abbildung 2.2: Kopfgestell des EyeLink Systems (1 = Kopfkamera; 2 = Augenkameras)

Das EyeLink System besteht aus zwei Computern, einem Messrechner (Operator-PC) und einem zweiten Rechner, welcher zur Darbietung der visuellen Reize dient (Subject-PC). Die in beiden Rechnern installierten Ethernet-Karten sind zum gegenseitigen Datenaustausch miteinander verbunden. Die Messkamera ist etwa 4-7 cm vom Auge entfernt und enthält Infrarot-LEDs, die die Augen mit Licht der Wellenlänge 940 nm bestrahlen. Die durchschnittliche Bestrahlung der Augen beträgt 0.8 mW/cm^2 , bei einem Maximum von 1.2 mW/cm^2 . Die Reflexion dieser

Strahlung durch die Pupille bildet die Grundlage für das gemessene Signal. Bei allen berichteten Experimenten wurde nur das rechte Auge gemessen.

Die Stimuli wurden auf einem 21-Zoll-Monitor der Marke EyeQ präsentiert und nahmen einen Sehwinkel von 34° horizontal und 25° vertikal bei einem Sehabstand von 67 cm ein. Jedes Stimulusquadrat war 16,5 mm breit, woraus sich ein Sehwinkel von 1,4° ergibt. Die gesamte abzusuchende Matrix mit 5 x 5 Items bemaß sich auf 9,6° x 9,6°. Verwendet wurde eine Grafikkarte der Firma „Matrix Millennium“ mit einer Bildwiederholfrequenz von 100 Hz.

Die Datengewinnung und -reduktion erfolgte mit Hilfe eines Online-Sakkaden-Parsers, der zum Lieferumfang des EyeLink-Systems gehört. Dabei wurde zur Erkennung von Sakkaden und zur Berechnung ihres Beginns und Endes eine Kombination von Sakkadengeschwindigkeit (30°/Sek), Sakkadenbeschleunigung (8000°/s²) und Minimalamplitude (0.15°) verwendet. Diese Voreinstellungen haben sich u.a. in den Labors von Reingold (Toronto) und Hyönä (Turku) bewährt und wurden deshalb auch in der vorliegenden Arbeit beibehalten. Der Output des Sakkaden-Parsers wurde mit Hilfe eines am Lehrstuhl I des Instituts für Psychologie der RWTH Aachen entwickelten PERL-Programms in eine Datenmatrix transformiert, die für jede Kombination einer ankommenden Sakkade und der zugehörigen Fixation eine Zeile mit allen wichtigen Parametern enthält. Durch Kombination dieser Daten mit der relevanten Information über die Stimuli entstand eine Datenmatrix, die mit Hilfe der Statistik-Software SPSS weiterverarbeitet werden konnte.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Allgemeine Parameter

Das Drogenscreening auf Basis der Urinproben ergab, dass bei keinem der Cannabisuser die Einnahme weiterer Drogen zu verzeichnen war. Die Blutkonzentration für THC und THCOH betrug 1,7 ng/ml Plasma (SD = 1,7; Minimum = 0, Maximum = 7,6). Dieser Wert ist niedrig und vergleichbar mit dem Wert 1,9 ng/ml Plasma, der in der Studie von Ehrenreich et al. (1999) gefunden wurde. Insgesamt konnte für alle Probanden ein THC-Konsum 24 Stunden vor Untersuchungsbeginn ausgeschlossen werden, was auch den mündlichen Angaben der Probanden entsprach.

In der Analyse der Reaktionszeiten sowie der mittleren Fixationsanzahl wurden Ausreißer von über drei Standardabweichungen aus der Auswertung ausgeschlossen. Die Probanden aus der Gruppe der Cannabis-User mit frühem *age of onset* waren in ihrer Reaktionszeit signifikant verlangsamt, verglichen mit den Leistungen der Kontrollgruppe. Der Unterschied betrug 477 ms in der Bedingung „Zielreiz anwesend“ ($t(38) = 3,17$; $p < 0,01$) und 886 ms in der Bedingung „Zielreiz abwesend“ ($t(38) = 3,13$; $p < 0,01$; vgl. Abbildung 2.3).

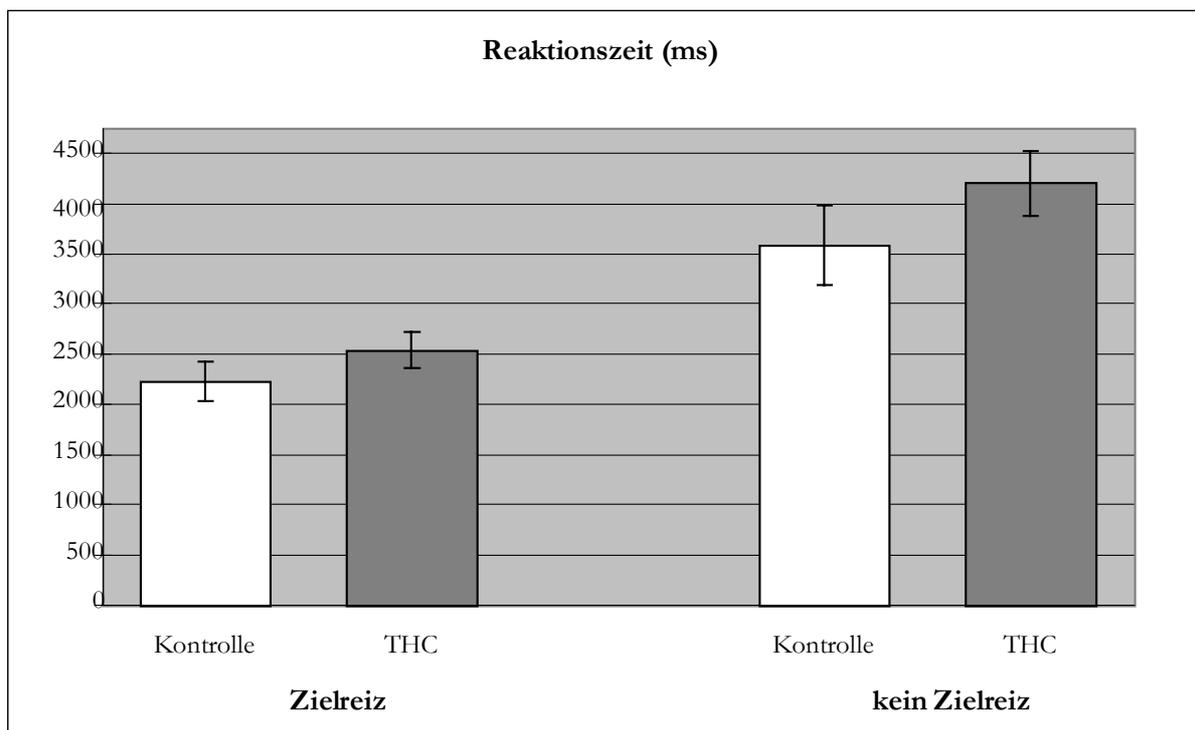


Abbildung 2.3: Mittlere Reaktionszeiten mit Standardabweichungen von Cannabis-Usern (dunkle Balken) im Vergleich mit Kontrollprobanden (helle Balken) in Durchgängen mit anwesenden (linke Balken) und abwesenden Zielreizen (rechte Balken).

Es gab keinen Unterschied in der Anzahl richtiger Reaktionen zwischen den Gruppen (beide 90%; $t(38) = 0,02$). Auch die mittleren Fixationsdauern unterschieden sich nicht voneinander (THC 222 ms, Kontrollgruppe 231 ms; $t(38) = 0,95$), die Sakkadenamplituden waren jedoch signifikant größer in der THC-Gruppe ($3,8^\circ$) als in der Kontrollgruppe ($3,4^\circ$, $t(38) = 2,22$; $p < 0,05$). Ein signifikanter Unterschied ergab sich ebenso bezüglich der mittleren Fixationszahl pro Suchfeld. Während die Kontrollgruppe jedes Item im Mittel mit 13,1 Fixationen bearbeitete, betrug dieser Wert in der THC-Gruppe 15,0 (gemittelt über alle Items; $t(38) = 2,52$; $p < 0,05$). Tabelle 2.1 gibt einen Überblick zu den allgemeinen Performanz- und Blickbewegungsparametern.

Tabelle 2.1: Ergebnisse für Probanden der Kontroll- & THC-Gruppe in der visuellen Suche. Dargestellt sind die Reaktionszeiten und mittleren Fixationsanzahlen für Matrizen mit und ohne Zielreiz sowie die Rate korrekter Antworten und die mittleren Fixationsdauern und Sakkadenamplituden. Gruppenmittelwerte wurden auf der Basis der mittleren Werte jedes Probanden berechnet. Standardabweichungen (in Klammern) beziehen sich ebenfalls auf Probandenmittelwerte.

Bedingung / Parameter		Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38)
Zielreiz anwesend	RT (ms)	2239 (449)	2716 (500)	3,17*
	Fixationen pro Matrix (N)	10,04 (1,91)	11,23 (1,70)	2,08*
Zielreiz abwesend	RT (ms)	3658 (944)	4545 (847)	3,13*
	Fixationen pro Matrix (N)	16,11 (3,83)	18,81 (2,39)	2,68*
Sakkadenamplitude (°)		3,37 (0,43)	3,76 (0,65)	2,22*
Fixationsdauer (ms)		222 (28)	231 (32)	0,95
Korrekte Antworten (%)		90,40 (0,06)	90,36 (0,05)	0,02

2.3.2 Maximale Sakkadengeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit einer sakkadischen Blickbewegung im Verhältnis zu ihrer Amplitude wird oft als Indikator angesehen, um „die allgemeine neurologische Funktionstüchtigkeit des sakkadischen Blickbewegungssystems einschätzen zu können“ (Ciuffreda & Tannen, 1994; eigene Übersetzung). Diese Beziehung ist auch unter dem Namen „main sequence“ bekannt (Bahill et al., 1975) und reflektiert die Pulse-Komponente des Pulse-Step-Kontrollsignals für die Generierung von Sakkaden (für eine detaillierte Darstellung vgl. z.B. Munoz & Fecteau, 2002 sowie Kapitel 3.1). Mögliche Gründe für verringerte Maximalgeschwindigkeiten der Sakkaden könnten Alertness-reduzierende Drogen sein (z.B. Alkohol, Barbiturate, Diazepam). Die meisten Studien hierzu beschäftigen sich mit Effekten von akuter Alkoholintoxikation (Heller & Lücke, 1987; vgl. Moser et al., 1998, und Holdstock & deWit, 1999, für neuere Diskussionen zum Thema). In Abbildung 2.4 werden für beide Gruppen die Beziehung zwischen Sakkadenamplitude (bis 8°) und Maximalgeschwindigkeit über alle Sakkadenrichtungen innerhalb der 5 x 5 Suchmatrix als Scatterplots dargestellt.

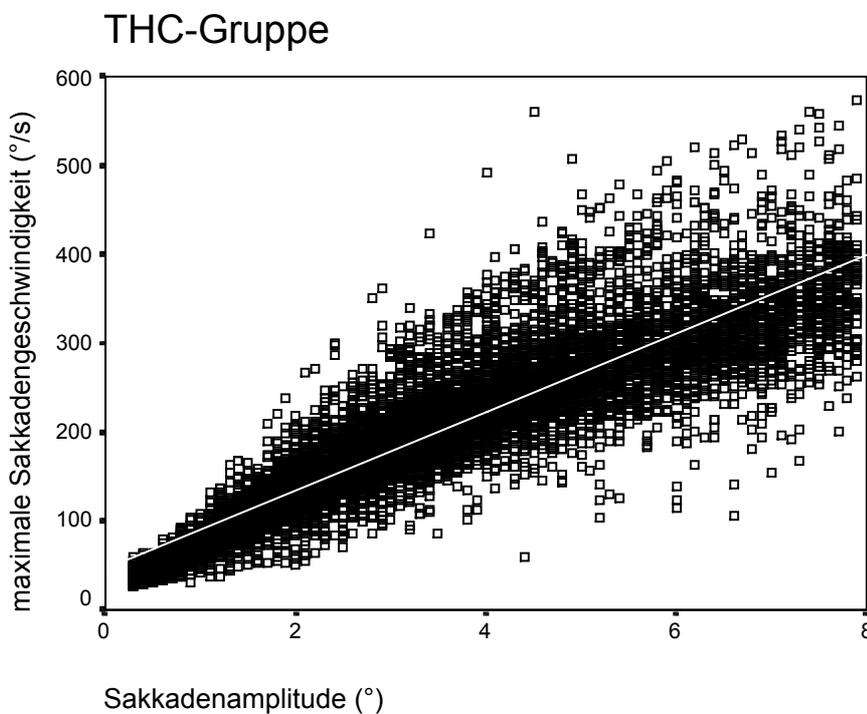
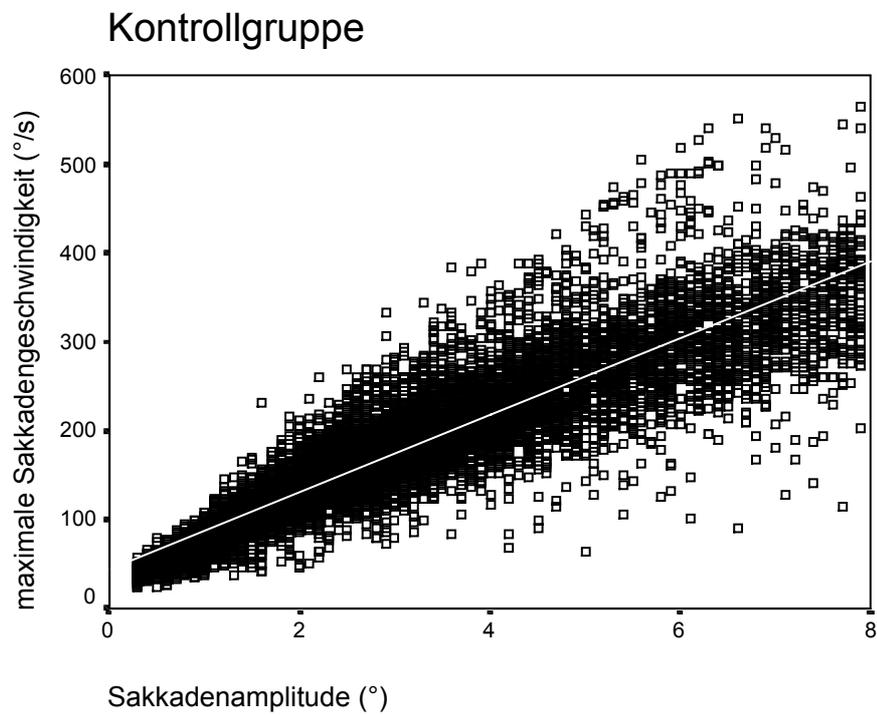


Abbildung 2.4: Scatterplots der “main sequence”-Beziehung zwischen Sakkadenamplitude und maximaler Sakkadengeschwindigkeit für Probanden der Kontrollgruppe (obere Graphik) und Cannabis-User (untere Graphik).

Aus der Abbildung wird deutlich, dass sowohl für die Kontrollgruppe (obere Graphik) als auch für die THC-Gruppe (untere Graphik) diese Beziehung linear beschreibbar ist. Die mittleren Steigungen der linearen Regression betragen 42,80 für die Kontrollgruppe und 42,16 für die Cannabis-Gruppe ($t(38) = 0,325$), der Schnittpunkt mit der y-Achse 47,40 bzw. 47,48 ($t(38) = 0,025$)⁶. Die mittlere Korrelation zwischen Sakkadenamplitude und maximaler Sakkadengeschwindigkeit beträgt $r = 0,92$ für die Kontroll- und $r = 0,91$ für die THC-Gruppe. Aus diesen Werten geht hervor, dass die „main sequence“-Beziehung für beide Gruppen identisch ist. Separate Analysen, die getrennt nach Sakkadenrichtungen durchgeführt wurden, führten zu denselben Ergebnissen. Somit kann diese Tatsache als Beleg für eine funktionierende basale neurophysiologische Sakkadengenerierung, insbesondere bezüglich des Pulse-Signals, bei langjährigen THC-Konsumenten mit frühem *age of onset* gelten.

2.3.3 Verhältnis von Sakkadenamplitude und Fixationsdauer

In einer detaillierten Analyse eines großen Korpus von Blickbewegungen beim Lesen eines in längere Textpassagen unterteilten Buchs untersuchten Radach & Heller (2000) Beziehungen zwischen zeitlichen und räumlichen Parametern. Als ein wesentliches Ergebnis fanden sie, dass Fixationsdauern generell kein Prädiktor für die Länge nachfolgender Sakkaden sind. Auf der anderen Seite gab es jedoch einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Amplitude einer Sakkade und der nachfolgenden Fixationsdauer. Dieses Resultat steht in Einklang mit vergleichbaren Daten zum Lesen von Sätzen (Heller & Müller, 1983; Pollatsek et al., 1986) und einer weiteren Studie mit einem ebenfalls großen Korpus von Lesedaten (Vitu et al., 2001). Die vorgeschlagene Interpretation von Radach & Heller (2000) lautet wie folgt: Von je weiter entfernt eine Sakkade ihr Ziel erreicht, desto weniger extrafoveale Verarbeitung für das Zielobjekt kann vorausgesetzt werden. In der vorliegenden Experimentalreihe kann dieses Verhältnis insofern als ein Maß zur Bestimmung der extrafovealen Verarbeitung gelten. Wenn Cannabis-User ein Defizit in der peripheren Verarbeitung haben sollten, z.B. Probleme in der Diskrimination von Target und Distraktoren, so sollte sich dies in längeren Fixationsdauern in Abhängigkeit von der eingehenden Sakkadenlänge zeigen. Abbildung 2.5 zeigt diese Beziehung für Sakkadenamplituden von 2° , 2° - 4° , 4° - 6° und 6° - 8° mit insgesamt über 50000 Beobachtungen.

⁶ Mitunter wird neben der linearen Annäherung zusätzlich der Versuch gemacht, die „main sequence“-Beziehung mittels Exponentialfunktionen zu modellieren (Becker, 1989; Ploner et al., 2002). Dieser Ansatz kann aufgrund der fehlenden Unterschiede zwischen den Gruppen jedoch an dieser Stelle vernachlässigt werden.

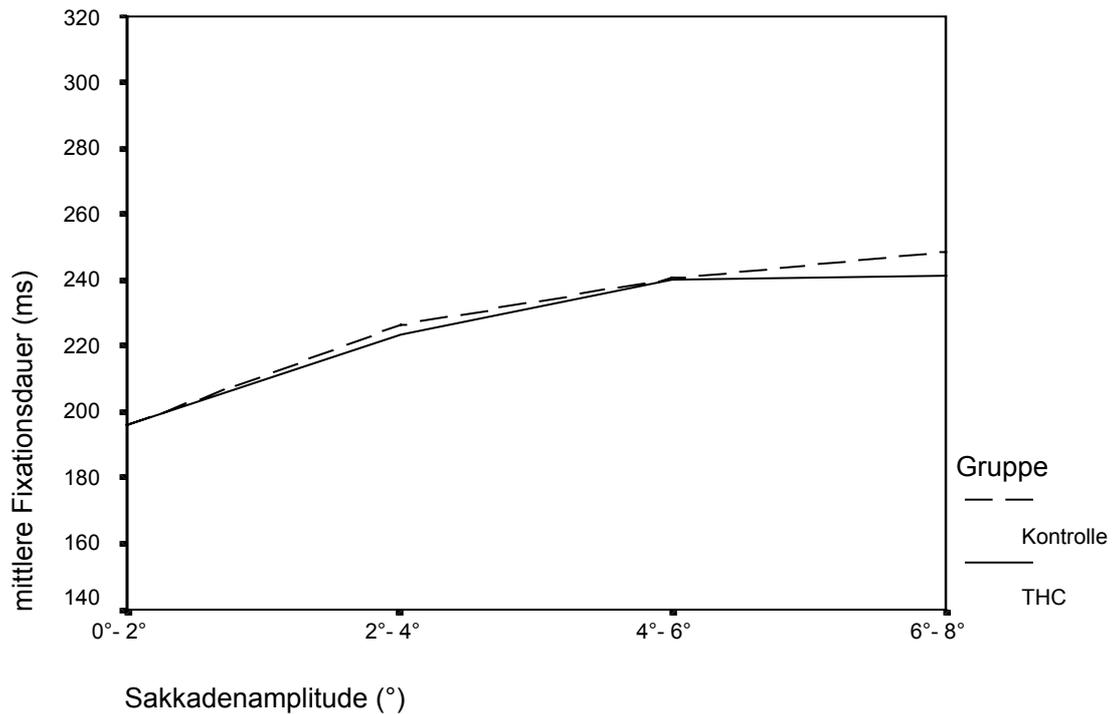


Abbildung 2.5: Beziehung zwischen Sakkadenamplitude und nachfolgender Fixationsdauer für die Kontroll- und THC-Gruppe. Gruppenmittelwerte sind auf der Basis der individuellen Mittelwerte berechnet. Ein Datenpunkt repräsentiert mindestens 5000 Beobachtungen, und jeder Proband steuert mindestens 50 Beobachtungen zum Gruppenmittel bei.

Wie aus der Abbildung ersichtlich sind Fixationsdauern nach längeren eingehenden Sakkaden erhöht, womit die Ergebnisse von Radach & Heller (2000) in der vorliegenden Aufgabe repliziert werden können ($F(3,117) = 113,24, p < 0,01$). Allerdings sind zwischen den Gruppen keine Unterschiede festzustellen ($t(38) = 0,148$ für den größten Unterschied bei der Amplitude von 6° bis 8°).

2.3.4 Analysen zum Suchpfad

In der visuellen Suchaufgabe werden die Probanden aufgefordert, eine 5 x 5 - Matrix mit potentiellen Zielreizen sequentiell in einer lesehaften Weise Zeile für Zeile zu durchmustern (vgl. Kapitel 2.2.2). Ein direkter und leicht zu berechnender Indikator für das Ausmaß, in dem das Blickverhalten sich dieser Instruktion angeschlossen hat, ist die Korrelation zwischen der ordinalen Nummer jeder Fixation mit der Zeile innerhalb der zu durchmusternden Matrix⁷.

⁷ Diese Vorgehensweise entspricht ungefähr auch dem Vorschlag von Zimmermann & Fimm (1993), eine Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Zeile, in der der Zielreiz sich befindet, zu berechnen.

Damit ist zudem ein erster Indikator für die Systematizität der Suche gewonnen. Diese Korrelation ist innerhalb der THC-Gruppe minimal größer als in der Kontrollgruppe ($r = 0,450$ gegenüber $r = 0,437$), auch wenn der Unterschied nicht signifikant ist.

Eine unabhängige Beurteilung der Suchpfade aller Probanden von zwei Experten⁸ ergab, dass die meisten Probanden sich über alle Durchgänge in ihrer Suchweise sehr konsistent verhalten haben. Diese individuellen Suchpfade aller Probanden konnten darüber hinaus grob zwei verschiedenen Gruppen zugeordnet werden. Die eine Gruppe musterte jede einzelne Zeile sequentiell mit mehreren Fixationen, während die andere Gruppe mit nur ein oder zwei Fixationen etwa in der Mitte jeder Zeile auskam. Letzteres kann als eine eher holistische oder parallele Suchstrategie bezeichnet werden. In dieser Gruppe fanden sich außerdem intraindividuell stabile Untergruppen von Suchpfaden, z.B. von dem Durchmustern jeder Zeile mit jeweils nur einer Fixation in der Mitte bis hin zu einem eher U-förmigen Suchmuster. Zwei prototypische Beispiele von Suchpfaden für diese beiden Untergruppen werden in Abbildung 2.6 dargestellt.

In der Kontrollgruppe waren beide Typen von Suchmustern gleichmäßig repräsentiert, neun Probanden wiesen ein sequentielles Suchverhalten auf, und ebenso viele verhielten sich gemäß dem holistischen Typ. Die übrigen Probanden konnten nicht eindeutig einem Suchtyp zugeordnet werden. In der Gruppe der Cannabis-User jedoch wurden 17 Probanden als „sequentielle“ Sucher klassifiziert, während die übrigen Probanden eher unsystematisch vorgehen. Diese Beobachtungen sind im Lichte der Tatsache, dass die Kontrollgruppe im Mittel weniger Fixationen pro Item aufwies, zu betrachten. Dies legt nahe, dass die Kontrollgruppe nicht notwendigerweise unsystematischer vorgegangen ist als die THC-Gruppe, sondern dass die meisten Kontrollprobanden ihre eigene, effektivere Strategie zur Lösung der Aufgabe entwickelt haben. Obwohl sie sich weitgehend an die Instruktion gehalten haben, den Suchraum wie beim Textlesen zu durchmustern, scheinen ihnen weniger Fixationen auf einer Zeile zur effizienten Informationsaufnahme zu genügen. Ein direkter Vergleich der Probanden mit sequentieller gegenüber holistischer Strategie in der Kontrollgruppe zeigte, dass die letzteren deutlich effektiver waren.

⁸ Neben dem Autor half hierbei Ralph Radach vom Institut für Psychologie der RWTH Aachen bei der Klassifizierung mit.

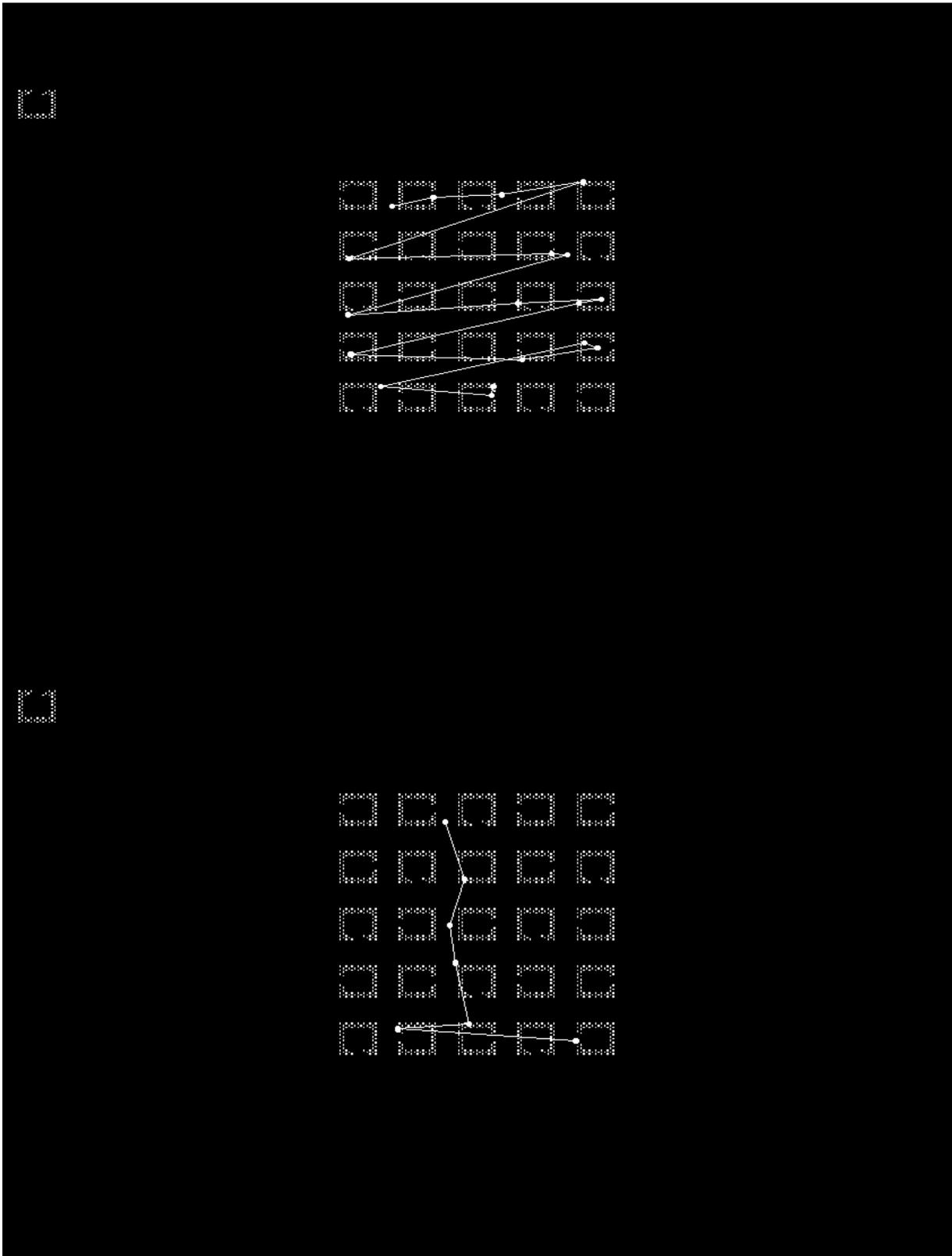


Abbildung 2.6: Typische Beispiele für individuelle Suchpfade in einer Matrix ohne kritischem Item. Die obere Abbildung zeigt ein eher sequentielles, leseartiges Suchverhalten während die untere Abbildung ein eher holistisches und “paralleles” Muster abbildet.

Im Mittel reagierten sie auf die Durchgänge ohne Zielreiz 1231 ms schneller (3078 ms vs. 4309 ms für „sequentielle Sucher“; $t(16) = 3,33$; $p < 0,01$) und in Durchgängen mit Zielreiz um 652 ms schneller (1919 ms vs. 2571 ms für „sequentielle Sucher“; $t(16) = 4,10$; $p < 0,01$) als die „sequentiellen Sucher“. Bemerkenswerterweise wurde diese bessere Leistung bei vergleichbarer Fehlerrate in den Antworten erreicht (90% gegenüber 92% bei „sequentiellen Suchern“; $t(16) = 0,89$; $p > 0,05$).

In einem weiterführenden Ansatz, die Systematizität der Suche zu quantifizieren und die Unterschiede zwischen den Gruppen genauer untersuchen zu können, wurde auf eine Analysetechnik von Ponsoda et al. (1995) zurückgegriffen. In einem ersten Schritt wurde ein Wahrscheinlichkeitsvektor berechnet, der die relative Anzahl von Sakkaden bezüglich acht verschiedenen Richtungen in Anlehnung an eine Windrose bestimmt. Dadurch wird der relative Anteil von nach „Norden“, „Nordosten“, „Osten“ usw. gerichteten Sakkaden bestimmt, wobei „Norden“ für Sakkaden nach oben, „Westen“ für solche nach links etc. steht. In einem zweiten Schritt wurde für jede Fixation das Richtungsverhältnis der einkommenden und ausgehenden Sakkade bestimmt. Dadurch erhält man eine sogenannte „Transitionsmatrix“, die konditionale Richtungsvektoren enthält. Jeder Eintrag dieser Matrix enthält das Verhältnis der Richtungen der ausgehenden Sakkaden relativ zu einer bestimmten Richtung eingehender Sakkaden. Diese relativ einfache Technik erlaubt eine effektive Quantifizierung der Suchpfadsystematik für jeden einzelnen Probanden. Wenn z.B. das Suchverhalten systematisch im Sinne eines lesehaften, Zeile-für-Zeile absuchenden Verhaltens sein sollte, müssten die meisten Sakkaden, die aus „Westrichtung“ kommen, von Sakkaden gefolgt werden, die in Richtung „Osten“ oder im Falle von Zeilenrücksprüngen nach „Westen“ fortgesetzt werden. Wenn hingegen ein Proband die Suchmatrix in einer U-förmigen Weise mit einem Startpunkt oben links durchmustert, sollten Sakkaden die von „Norden“ kommen vor allem von Sakkaden nach „Süden“ und „Osten“ gefolgt werden usw. Ein unsystematisches, zufälliges Suchverhalten hingegen würde eine gleichmäßige Verteilung der Richtungen der nachfolgenden Sakkaden für jede Richtung der eingehenden Sakkaden erwarten lassen. Diese gleichmäßige Verteilung würde dann auch für die oben erwähnte Berechnung der relativen Anzahl von unbedingten Richtungsvektoren unter den Sakkaden insgesamt gelten. Die Häufigkeitsverteilung der Sakkadenrichtungen sind in Abbildung 2.5 und Tabelle 2.2 dargestellt.

**Wahrscheinlichkeit der Richtungsvektoren
(% aller Sakkaden pro Gruppe)**

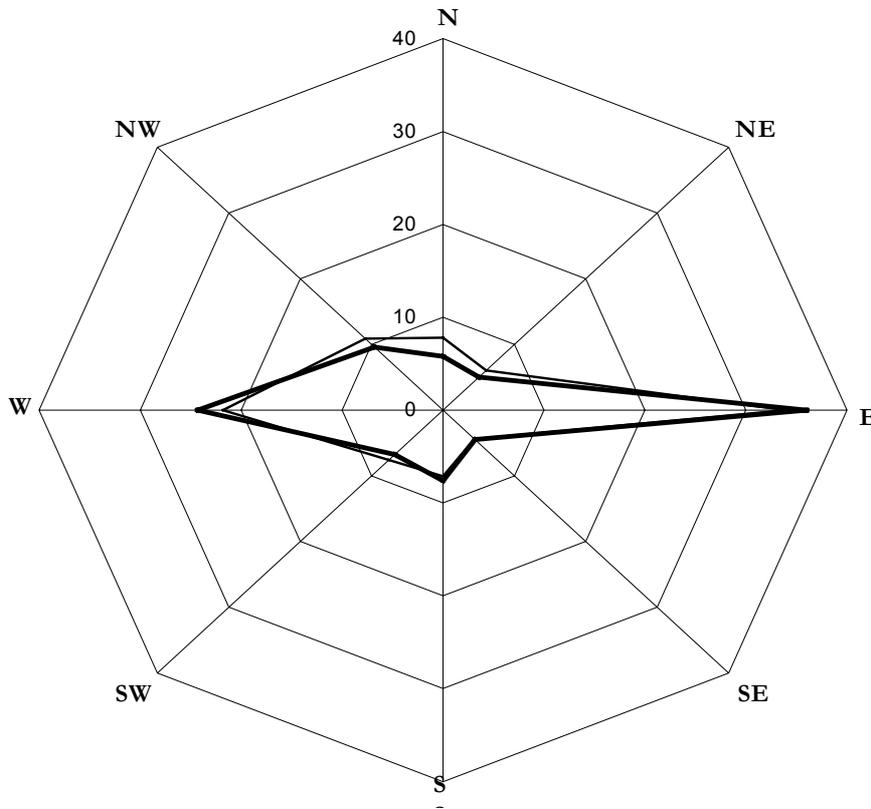


Abbildung 2.7: Relative Häufigkeit der Sakkadenrichtungsvektoren (%). Die dicke Linie repräsentiert die THC-Gruppe, die dünne die Kontrollgruppe.

Tabelle 2.2: Systematizitätsanalyse der visuellen Suche: Relative Verteilung der Sakkadenrichtungsvektoren (in Prozent) für beide Gruppen (vgl. Text für nähere Erläuterungen).

<i>Sakkadenrichtung</i>	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Nord	8% (5,3)	6% (3,2)
Nord-Ost	6% (3,9)	5% (2,6)
Ost	34% (11,4)	36% (7,1)
Süd-Ost	4% (1,7)	5% (1,6)
Süd	7% (3,4)	8% (3,2)
Süd-West	8% (1,6)	7% (1,4)
West	22% (4,4)	24% (4,2)
Nord-West	11% (4,1)	10% (2,8)

Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, zeigen beide Gruppen auf den ersten Blick ein relativ systematisches Suchverhalten. Die meisten Sakkaden sind „ostwärts“ gerichtet (Kontrollgruppe:

34,0%; THC: 36,0%). In der Abbildung täuscht dieser starke Ausschlag nach Osten ein wenig darüber hinweg, dass bezüglich der „ostwärts“ und der „südwestwärts“ gerichteten Sakkaden signifikante Gruppenunterschiede auftreten. Wenn die THC-Probanden sich tatsächlich leseähnlicher verhalten, so sollten Sakkaden auf der Horizontalen, also nach Osten oder Westen gerichtet, häufiger auftreten. Dies bestätigt sich in den Ergebnissen. Auch wenn nur der Unterschied in den „westwärts“ gerichteten Sakkaden signifikant ist (24,4% gegenüber 21,8% in der Kontrollgruppe; $t(38) = 1,90$; $p < 0,05$), sind tendenziell ebenso mehr „ostwärts“ gerichtete Sakkaden in der THC-Gruppe zu verzeichnen (s. Tabelle 2.2). Demgegenüber sind Sakkaden in Richtung Norden nicht mit einem Leseverhalten, wohl aber mit den oben beschriebenen „holistischen“ Strategien zu vereinbaren. Sowohl bezüglich der nach „Norden“ gerichteten als auch der „nordöstlichen“ und „nordwestlichen“ Sakkaden weist die Kontrollgruppe tendenziell höhere Werte auf, die allerdings nicht signifikant von der THC-Gruppe verschieden sind. Ein weiterer signifikanter Unterschied ist bezüglich der „südwestwärts“ gerichteten Sakkaden zu beobachten, die häufiger bei der Kontrollgruppe auftreten ($t(38) = 1,79$; $p < 0,05$). Der Unterschied ist allerdings relativ gering und beträgt nur 0,85 Prozentpunkte. Da Zeilenrücksprünge aufgrund des geringen Winkelunterschiedes zu den „westwärts“ gerichteten Sakkaden gezählt werden, ist auch diese Kategorie nicht mit leseähnlichem Verhalten erklärbar und bestätigt die Beobachtung, dass unter den Kontrollprobanden weniger sequentiell suchende Probanden zu finden sind (s.o.). Insgesamt bestätigt diese statistische Analyse somit, dass das Verhalten der THC-Gruppe eher mit einem lesehaften Suchverhalten korrespondiert, da beim Lesen mit „westwärts“, aber nicht mit „südwestwärts“ gerichteten Sakkaden zu rechnen ist.

In einem zweiten Analyseschritt wurde die oben beschriebene Transitionsmatrix konditionaler Richtungsvektoren berechnet, um die relative Häufigkeit eines spezifischen Richtungs-paares aufeinanderfolgender Sakkaden relativ zu jeder Richtung der ersten Sakkade jedes Paares zu bestimmen (s.o.). Von allen 64 möglichen Paaren wurde die Analyse auf die horizontalen Richtungen beschränkt, da sie erstens am häufigsten vorkommen und zweitens versprechen, den höchsten diagnostischen Wert zu haben, um den Gruppenunterschied bezüglich der „westwärts“ gerichteten Sakkaden genauer zu analysieren. Tabelle 2.3 sowie Abbildung 2.8 geben einen Überblick über die diesbezüglichen Resultate.

Tabelle 2.3: Transitionsmatrix zur visuellen Suche. Sie enthält eine Analyse je zwei aufeinanderfolgender Sakkaden. Eingetragen ist jeweils die relative Häufigkeit der Richtung der zweiten Sakkade eines Sakkadenpaares (in %) unter der Bedingung einer gegebenen Richtung der ersten Sakkade für beide Gruppen (vgl. Text für nähere Erläuterungen).

<i>konditionale Sakkadenrichtung</i>		Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
erste Sakkade ostwärts	zweite Sakkade: Nord	9% (7,0)	10% (7,0)
	zweite Sakkade: Ost	39% (14,1)	38% (13,1)
	zweite Sakkade: Süd	14% (11,1)	8% (6,9)
	zweite Sakkade: West	39% (6,8)	44% (12,2)
erste Sakkade westwärts	zweite Sakkade: Nord	16% (8,4)	11% (5,9)
	zweite Sakkade: Ost	54% (15,2)	62% (10,8)
	zweite Sakkade: Süd	13% (9,1)	10% (5,6)
	zweite Sakkade: West	17% (7,0)	17% (5,5)

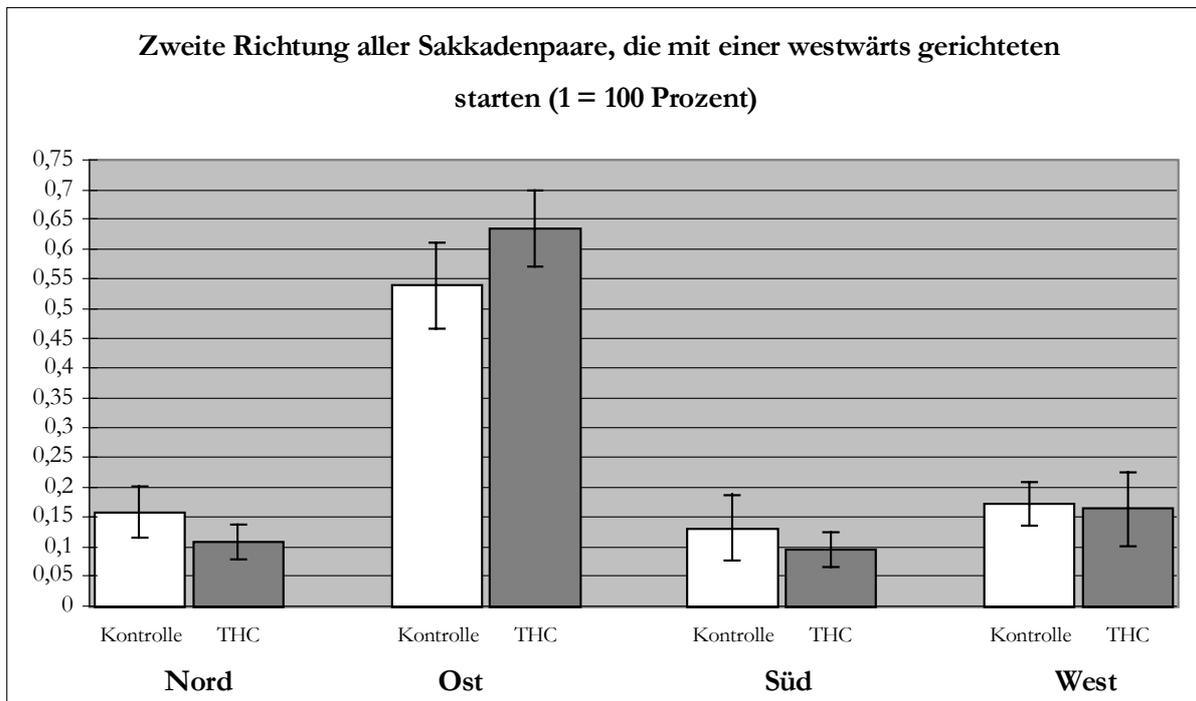
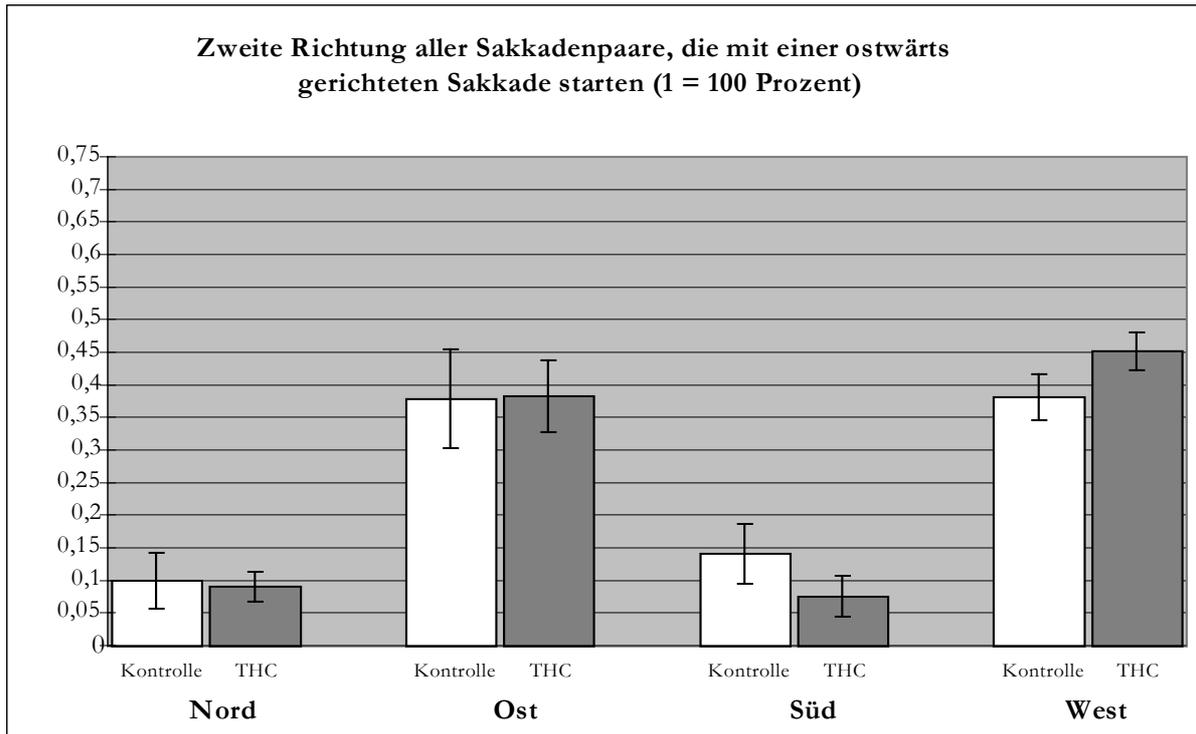


Abbildung 2.8: Analyse der Sakkadenpaare: Relative Häufigkeiten der Richtung der zweiten Sakkade zweier aufeinanderfolgender Sakkaden unter der Bedingung einer gegebenen Richtung der ersten Sakkade des Paares für beide Gruppen. In der oberen Abbildung beginnen die Paare mit einer ostwärts, in der unteren mit einer westwärts gerichteten Sakkade (vgl. Text für nähere Erläuterungen).

Unter der Annahme, dass die THC-Gruppe tendenziell ein sequentielles, leseähnliches Scanningmuster zeigt, ist zu erwarten, dass prinzipiell eine Sakkade auf der Zeile eher mit einer weiteren Sakkade auf der gleichen Zeile fortgesetzt wird, als mit einer Sakkade nach oben oder unten. Alle signifikanten Unterschiede bestätigen diese Hypothese. Werden die Sakkadenpaare betrachtet, die mit einer „ostwärts“ gerichteten Sakkade beginnen, also der Leserichtung entsprechen, so fällt auf, dass viele von ihnen von einer Sakkade in entgegengesetzter Richtung gefolgt werden (vgl. Abbildung 2.8). Dieser Effekt ist deutlich stärker in der THC-Gruppe (44%; Kontrollgruppe 39%; $t(38) = 1,75$; $p < 0,05$). Das bedeutet, dass nach einer ostwärts gerichteten Sakkade die Cannabisprobanden eher eine Sakkade in die entgegengesetzte Richtung ausführen, was an der Kürze der zu durchmusternden Zeilen liegen kann. Eine nachfolgende ostwärts gerichtete Sakkade ist weniger wahrscheinlich (zwischen 38% und 39% in beiden Gruppen; $t(38) = 0,12$). Ein zweiter signifikanter Gruppenunterschied betrifft die nach Süden abgehenden nachfolgenden Sakkaden (THC: 8%, Kontrollprobanden 14%; $t(38) = 1,96$; $p < 0,05$). Dies reflektiert die bereits erwähnte Beobachtung, dass die Kontrollgruppe im Vergleich zur THC-Gruppe ein „holistischeres“ Suchverhalten zeigt, bei dem oft nur ein bis zwei Fixationen pro Zeile auftreten. Sakkaden in Richtung „Norden“ unterschieden sich in ihrer relativen Anzahl nicht zwischen beiden Gruppen.

Betrachtet man Sakkadenpaare, die mit einer „westwärts“ gerichteten Sakkade beginnen, finden sich ebenfalls signifikante Gruppenunterschiede in der erwarteten Richtung. Über der Hälfte dieser Sakkaden folgte eine ostwärts gerichtete Sakkade, was signifikant häufiger in der THC-Gruppe vorkam (62% vs. 54 % in der Kontrollgruppe; $t(38) = 2,06$; $p < 0,05$). Auf der anderen Seite setzten die Kontrollprobanden vermehrt mit einer „nordwärts“ gerichteten Sakkade fort (16% gegenüber 11% in der THC-Gruppe; $t(38) = 2,04$; $p < 0,05$). Nachfolgende Sakkaden in Richtung Westen unterschieden sich nicht zwischen den Gruppen, und „südwärts“ gerichtete Sakkaden traten erwartungsgemäß etwas häufiger in der Kontrollgruppe auf (13% gegenüber 10% in der THC-Gruppe; $F(1,38) = 1,40$), ohne dass diese Mittelwertunterschiede jedoch signifikant sind ($p > 0,05$).

Insgesamt spiegelt diese detaillierte quantitative Analyse das wider, was aufgrund der subjektiven Beurteilung und Klassifizierung bereits angedeutet wurde (s.o.). Erstens setzten Kontrollprobanden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eine horizontale Sakkade mit einer vertikalen Sakkade fort. Zweitens ist festzustellen, dass die THC-User eine horizontale Sakkade eher mit einer ebenfalls horizontalen Sakkade in die entgegengesetzte Richtung fortsetzen. Es ist wichtig, dabei zu bedenken, dass dies ebenso Reinspektionen wie auch Zeilenrücksprünge, die

vom Ende einer Zeile zum Anfang der nächsten Zeile dirigiert werden, reflektieren kann. Um das Ausmaß an Reinspektionen direkt einschätzen zu können, wurde die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der dasselbe Element innerhalb der Matrix erneut betrachtet wurde, nachdem die Augen dieses Element zum ersten Mal verlassen hatten. Da die Aufgabe aufgrund der nur vier zu unterscheidenden Alternativreizen (vgl. Kapitel 2.2.2) erlaubt, dass mehrere Elemente „auf einen Blick“ gleichzeitig verarbeitet werden, ist die Anzahl von Reinspektionen relativ gering. In der Kontrollgruppe betrug die relative Anzahl 4,5% gegenüber 6,4% (beide SD = 2,3) in der THC-Gruppe. Trotz des geringen Anteils an allen Fixationen ist dieser Unterschied signifikant ($t(38) = 2,52, p < 0,05$).

2.4 Diskussion

In Kapitel 1 wurde der Forschungsstand zu Langzeiteffekten von Cannabis auf das menschliche Verhalten referiert. Dabei konnte das Fazit gezogen werden, dass die meisten frühen Untersuchungen zu diesem Thema methodologische oder theoretische Mängel aufwiesen. Hingegen zeichnet sich die Forschung des letzten Jahrzehnts durch eine deutliche Verbesserung bezüglich dieser Defizite aus. Dennoch können auch diese Studien kein eindeutiges und homogenes Bild zu den Langzeiteffekte von THC entwickeln. Während einigen Studien ein Nachweis von Beeinträchtigungen nicht gelang, deuteten andere hingegen auf deutliche Performanzeinbußen hin (vgl. Kapitel 1.2.2.2).

Der für die vorliegende Untersuchung wichtige Ausgangspunkt war die Studie zu Langzeiteffekten von Ehrenreich et al. (1999). Sie entwickelten die bis dahin noch nicht formulierte Hypothese von der Abhängigkeit der Leistungseinbußen vom Drogeneinstiegsalter (*age of onset*) und konnten diesen Zusammenhang bei einer visuellen Suchaufgabe bestätigen (vgl. Kapitel 1.2.2.3). Demnach scheint eine höhere Vulnerabilität für den Einfluss exogener Cannabinoide im peripubertären Alter gegeben zu sein. Das hier berichtete Experiment konnte die von Ehrenreich et al. (1999) beschriebenen Ergebnisse anhand derselben Aufgabe mit einer neuen Stichprobe von 20 Usern gegenüber 20 Kontrollprobanden replizieren. Die Gruppe der Cannabisprobanden zeigte deutliche Einbußen in der Reaktionszeit in dieser Aufgabe bei einer vergleichbaren Fehlerrate. Diese Defizite traten sowohl in der Bedingung „Zielreiz abwesend“ als auch in der Bedingung „Zielreiz anwesend“ auf. Die Halbierung der Effektgröße in der letzteren Bedingung resultiert dabei aus der gleichmäßig verteilten Position des Zielreizes. Dieser konnte

sowohl in der ersten wie auch in der letzten Zeile erscheinen, und deshalb musste im Mittel die Hälfte der Suchmatrix bis zur Entdeckung durchmustert werden.

Bei der Analyse der Blickbewegungen bei dieser Aufgabe wurden verschiedene Parameter berücksichtigt. Zunächst wurde die *main sequence* untersucht, das Verhältnis von Sakkadengeschwindigkeit und -amplitude. In beiden Gruppen konnte ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen gefunden werden, mit praktisch identischen Steigungen und Achsabschnitten. Dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass die Step-Komponente des Pulse-Step-Signals bei der Sakkadengenerierung durch langjährigen Gebrauch von Cannabis nicht beeinträchtigt wird und die basalen Mechanismen der Sakkadensteuerung im Stammhirn (vgl. Munoz, 2002, sowie das nachfolgende Kapitel) intakt zu sein scheinen.

In einer zweiten Analysestufe wurde das Verhältnis zwischen Sakkadenamplitude und der nachfolgenden Fixationsdauer bestimmt. Gemäß den Erwartungen aus der Leseforschung (Radach & Heller, 2000) fanden sich auch hier substantiell erhöhte Fixationszeiten nach Sakkaden, die von einer weiter entfernten Position starteten. Vitu et al. (2001) konnten diesen Effekt beim Lesen unter dem Namen „Sakkadendistanzeffekt“ replizieren. Diese Beobachtungen werden des Weiteren gestützt durch vergleichbare Ergebnisse von Nies (1999), wo in einer visuellen Suchaufgabe sehr kleine Zielreize vor einem unstrukturierten Hintergrund gesucht werden mussten (vgl. Kapitel 2.1). Im vorliegenden Experiment waren bezüglich des Sakkadendistanzeffektes keine Unterschiede zwischen den Gruppen festzustellen. Gemäß der Argumentation aus Kapitel 2.1 (s.o.) kann dies als ein Indiz dafür angesehen werden, dass chronischer Cannabiskonsum keinen Einfluss auf die Fähigkeit zur extrafovealen Diskrimination zu haben scheint. Eine eher vorsichtigere Interpretation wäre, dass die Verwendung extrafovealer Diskriminationsinformation nicht soweit eingeschränkt sein kann, dass sie die nachfolgende Fixationsdauer zu modulieren in der Lage ist. Diese Interpretation lässt die Möglichkeit offen, dass die Resultate der extrafovealen Verarbeitung nicht unmittelbar ihren Niederschlag in der darauffolgenden Fixationsdauer finden. Alternativ könnten Informationen über die Sakkadenamplitude oder Startdistanz zu einer Voreinstellung einer Fixationsdauer führen, die eine erfolgreiche Suche wahrscheinlich macht. Diese Interpretation würde somit den in Kapitel 2.1 vorgeschlagenen theoretischen Überlegungen von Hooge & Erkelens (1998) folgen. Um die Fähigkeit der peripheren Diskriminationsleistung direkt zu testen, wurde ein weiteres Experiment in die Versuchreihe aufgenommen, das in Kapitel 7 berichtet wird.

Die Analyse des Blickpfades ging von der Feststellung aus, dass die Korrelation von ordinaler Fixationsnummer und Nummer der fixierten Zeile im Suchfeld in der THC-Gruppe nominell leicht höher ausfiel. Dies könnte ein systematischeres Suchverhalten dieser Probanden ausdrücken, dass zudem auch im Einklang mit dem instruierten Verhalten stünde. Eine darauffolgende Inspizierung der einzelnen Suchpfade aller Probanden hat ergeben, dass viele der Kontrollprobanden eine eher „holistische“, parallele Suchstrategie aufwiesen. Dieser Eindruck wurde durch nachfolgende detailliertere quantitative Analysemethoden bestätigt, besonders durch die Betrachtung der konditionalen sakkadischen Richtungsvektoren als Maß für die Systematizität der Suche. Vor allem konnte nachgewiesen werden, dass Cannabis-User mehr zu Reinspektionen im Suchfeld neigen als die Kontrollprobanden. Dieses Ergebnis wurde durch die direkte Berechnung der Häufigkeit des erneuten Musterns bereits betrachteter Items gewonnen, die in der THC-Gruppe deutlich höher ausfiel.

In vielen visuellen Suchaufgaben müssen Probanden mindestens zwei zu unterscheidende Gedächtnisleistungen erbringen. Einerseits muss das zu identifizierende Target memoriert werden, während andererseits beachtet werden muss, welche Items bzw. Regionen bereits abgesucht worden sind, um eine möglichst ökonomische Suche zu gewährleisten⁹. Die Aufgabe, sich den zu suchenden Zielreiz zu merken, ist in dem vorliegenden Experiment extrem leicht, da über alle Durchgänge nach demselben Objekt gesucht werden muss. Dies wird auch dadurch reflektiert, dass nahezu keiner der Probanden überhaupt das in der oberen linken Ecke in jedem Trial präsentierte Beispieltarget (vgl. Abbildung 2.4) angeblickt hat. Die zweite angesprochene Gedächtnisbelastung ist jedoch in dieser Aufgabe gefordert, und die Ergebnisse legen nahe, dass die langjährigen Cannabiskonsumenten hierbei vor größere Probleme gestellt werden als die Kontrollprobanden. Diese Annahme findet ihre Unterstützung in den Ergebnissen zur memory guided-Sakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 5). Ein hochinteressantes Ergebnis ist zudem der Unterschied in den Sakkadenamplituden zwischen den Gruppen. Hypermetrische Sakkaden, wie sie bei den Cannabisprobanden gegenüber den Kontrollprobanden zu beobachten sind, werden im Allgemeinen als typisch für cerebelläre Läsionen angesehen (Selhorst et al., 1976), eine Region, in der zudem eine hohe Cannabinoidrezeptordichte vorherrscht (vgl. Kapitel 1.1). Diese Interpretation würde jedoch hypermetrische Sakkaden auch z.B. in der Prosakkadenaufgabe

⁹ Eine Sonderform dieser Gedächtnisleistung ist das in Kapitel 2.1 besprochene Phänomen der „inhibition of saccade return“ (Rayner et al., 2003).

erwarten lassen, was im nächsten Kapitel thematisiert wird¹⁰. Eine ausführliche Analyse zur Sakkadenamplitude in einfachen Aufgaben wird in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Cannabis-User weniger effizient bei der visuellen Suche sind als Kontrollprobanden. Gemäß den Ergebnissen von Ehrenreich et al. (1999) ist anzunehmen, dass ein frühzeitiger regelmäßiger und langjähriger Konsum von Cannabis mit einem Einstiegsalter von bis ca. 16 Jahren sehr *spezifische* Beeinträchtigungen der visuellen Verarbeitung nach sich zieht. Diese Interpretation wird auch dadurch gestützt, dass z.B. in der Untersuchung der Beziehung von Sakkadenamplitude und Sakkadengeschwindigkeit keine Unterschiede zwischen den Gruppen zu verzeichnen sind.

Als zugrundeliegende Ursachen für die Leistungsminderung in dieser Aufgabe können aufgrund der Ergebnisse zwei Defizite vermutet werden: Zunächst besteht die Möglichkeit, dass auf der Ebene des visuellen Kurzzeitgedächtnisses Beeinträchtigungen bestehen. Darüber hinaus gilt dies vermutlich auch auf einer strategischen, *top down*-kontrollierten Ebene, was in der Verschiedenartigkeit der individuellen Suchpfade einen Ausdruck findet. Möglicherweise ist die „vorsichtiger“, scheinbar gewissenhaftere Suche der Cannabisprobanden die Folge einer Kompensationsbemühung bezüglich einer erschwerten visuellen Verarbeitung und/oder Blicksteuerung. Der letzteren Hypothese kann detaillierter in den nachfolgend beschriebenen Experimenten zu einfachen Pro- und Antisakkaden nachgegangen werden (Kapitel 3 und 4), während die Frage nach der blickrelevanten Verarbeitung visuell-räumlicher Gedächtnisinformation im memory guided-Paradigma (Kapitel 5) direkt thematisiert werden soll.

¹⁰ Weitere mögliche neurophysiologische Implikationen werden im Zusammenhang mit allen durchgeführten Experimenten in Kapitel 9 diskutiert.

3. Visuelle Informationsverarbeitung und die Steuerung von Blickbewegungen

Im vorangegangenen Kapitel ist ein Experiment dargestellt worden, bei dem sich Defizite der Blicksteuerung beim Langzeitkonsum von Cannabis in einer kognitiv komplexen Anforderung herausgestellt haben. Hiervon ausgehend soll in diesem Kapitel zweierlei geleistet werden. Erstens geht es um die Bereitstellung eines Modells für Teilkomponenten der Blicksteuerung und visuellen Informationsverarbeitung. Ein solches Modell integriert komplexe Tätigkeiten wie die in Kapitel 2 referierte visuelle Suche, zeichnet aber vor allem die relevanten Komponenten der Informationsverarbeitung in ihren Grundbestandteilen nach. Auf der Basis dieses Modells werden theoriegeleitet Paradigmen abgeleitet, die systematisch Teilprozesse der Blicksteuerung abbilden. Diese experimentellen Anordnungen können daraufhin verwendet werden, um gezielte Hypothesen bezüglich gestörter Teilleistungen bei den untersuchten Cannabiskonsumenten zu testen. Ein Experiment zur einfachsten Teilleistung des sakkadischen Systems, nämlich Blickbewegungen zu in der Peripherie erscheinenden Stimuli, wird dieses Kapitel beenden. In den nachfolgenden Kapiteln werden dann weitere Experimente vorgestellt, die ebenfalls direkt auf dem in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Modell fußen.

3.1 Okulomotorische Theorien und experimentelle Paradigmen basaler okulomotorischer Teilleistungen

Eine umfassende Rahmentheorie zur Integration der verschiedenen experimentellen Erkenntnisfortschritte in unterschiedlichen Teilbereichen innerhalb der Blickbewegungsforschung wurde von Findlay & Walker (1999) bereitgestellt. Ihr Modell zur Sakkadengenerierung zeichnet sich hauptsächlich durch die nachfolgend dargestellten Eigenschaften aus. Bei diesem Modell handelt es sich um ein Informationsflussmodell, das auf den Prinzipien der parallelen Verarbeitung sowie der kompetitiven Inhibition beruht. Das bedeutet, dass zwei separate Pfade für einerseits räumliche und andererseits zeitliche Informationsverarbeitung gleichzeitig durchlaufen werden. Bei der räumlichen Verarbeitung wird sowohl die Richtung als auch die Amplitude einer Sakkade berechnet, während bei der zeitlichen Verarbeitung die Latenz bis zur Ausführung einer Sakkade bestimmt wird. Die Unterscheidung dieser zwei Routen basiert auf neueren neurophysiologischen Forschungsergebnissen, die weiter unten genauer dargestellt werden. Dennoch sind diese Pfade nicht als vollständig voneinander unabhängig zu betrachten. Das Modell postuliert an mehreren Stellen einen direkten wechselseitigen Einfluss zwischen beiden Routen, die im Sinne der kompetitiven Hemmung miteinander kommunizieren. Insgesamt ist das Modell hierarchisch organisiert, und zwar von

einfachen reflexiv-automatischen Prozeduren bis hin zu willentlichen Einflussprozessen. Als Beispiel für experimentelle Paradigmen, die eher reflexive Verarbeitungsschritte erfordern, wären einfache visuell geführte Sakkaden zu abrupt erscheinenden peripheren Zielreizen zu nennen. Demgegenüber bilden Paradigmen wie Antisakkaden (Sakkaden, die in die entgegengesetzte Richtung eines dargebotenen Targets verlaufen sollen) oder *memory guided*-Sakkaden (Sakkaden, die zu einer erinnerten, aber nicht mehr visuell markierten Position auszuführen sind) eher intentionale Einflüsse ab (vgl. Kapitel 4 und 5).

Findlay & Walker (1999) haben ihre Rahmentheorie insgesamt in fünf Stufen gegliedert, die im folgenden bezüglich beider Verarbeitungspfade dargestellt werden sollen (vgl. Abbildung 3.1). Dabei beginnt die Darstellung – entgegen des dem Modell inhärenten Informationsflusses – auf der untersten Ebene der motorischen Kommandos und geht zuletzt auf *higher level*-Einflüsse ein.

3.1.1 Funktionale Ebenen des Modells von Findlay & Walker (1999)

Ebene 1, die von den Autoren als *motor command*-Ebene bezeichnet wird, repräsentiert die Aktivierung der drei okulomotorischen Muskelpaare. Der Aktivierungszeitpunkt dieser Muskeln wird durch das WHEN-System (d.i. die zeitliche Verarbeitungsrouten) gesteuert, während die räumliche Kodierung des motorischen Kommandos durch das WHERE-System (d.i. die räumliche Verarbeitungsrouten) gelenkt wird. Als neurophysiologische Grundlage zur Differenzierung der zwei Systeme auf dieser Stufe dient die z.B. von Moschovakis & Highstein (1994) beschriebene Unterscheidung von *omnipause*-Zellen, die durch einen allgemeinen Aktivationsrückgang während einer Sakkade charakterisiert sind, und den *burst*-Zellen, die als Träger der räumlichen Metrik fungieren. Diese Zellen dienen im Hirnstamm-Kreislauf unter anderem zur Sicherstellung der optimalen Geschwindigkeit und Effizienz der Sakkade. Als experimenteller Hinweis für die allgemeine Funktionalität des sakkadischen Systems auf dieser Ebene kann die von Ciuffreda & Tannen (1995) beschriebene *main sequence* betrachtet werden, bei der die maximale Sakkadengeschwindigkeit in Beziehung zur Sakkadenlänge betrachtet wird. Diese sollte bei gesunden Probanden einen monoton steigenden Verlauf aufweisen (s. Kap. 2.3.2).

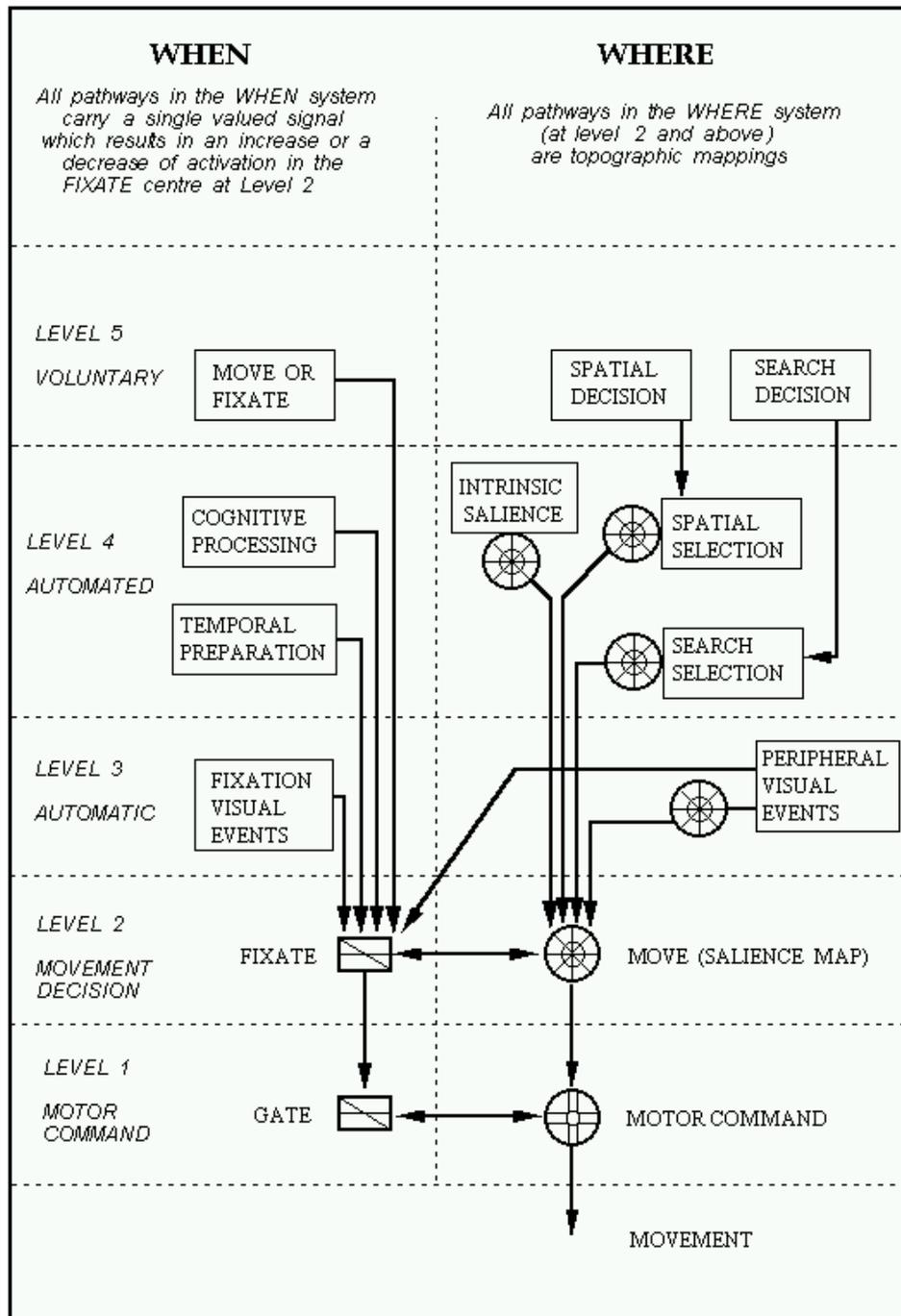


Abbildung 3.1: Modell der Sakkadengenerierung aus Findlay & Walker (1999). In der Vertikalen erkennt man verschiedene Ebenen der Sakkadenkontrolle, in der Horizontalen die Trennung zeitlicher und räumlicher Prozesse (s. Text für Details).

Auf Ebene 2 des Modells, von den Autoren als *movement decision* bezeichnet, sind zentrale Vorstellungen des Modells angesiedelt. Allgemein wird auf dieser Ebene die Information zur Entscheidung, wann und wohin eine Sakkade ausgeführt werden soll, integriert und an die oben beschriebene Ebene 1 weitergeleitet. Innerhalb des WHEN-Systems übernimmt diese Funktion ein sogenanntes Fixationszentrum, das mit einem bestimmten Aktivitätsniveau ausgestattet ist. Bei Unterschreitung eines Schwellenniveaus dieser Aktivierung findet eine *gate*-Öffnung statt, wodurch eine Sakkade ausgelöst wird (Ebene 1). Demgegenüber wird innerhalb des WHERE-Systems auf dieser Ebene ein Bewegungszentrum postuliert, das als zweidimensionale Salienzkarte mit einer kontinuierlichen Aktivationsverteilung beschrieben wird. Als Sakkadenziel wird die Koordinate spezifiziert, die auf der Karte mit der maximalen Aktivierung versehen ist. Die mannigfaltigen Determinanten der Aktivationsverteilung auf dieser Salienzkarte werden durch spezifische Prozesse höherer Ebenen dargestellt. Der Idee der kompetitiven Hemmung zwischen den Verarbeitungsrouten wird auf dieser Ebene Rechnung getragen, indem eine wechselseitige Abhängigkeit der beiden Zentren auftritt: Eine Aktivationszunahme im Bewegungszentrum inhibiert die Aktivierung im Fixationszentrum und beschleunigt so den Prozess der Sakkadengenerierung. Als neurophysiologisches Substrat des Fixationszentrums gelten die Omnipause-Zellen in den Colliculi superiores, wobei offen gelassen wird, ob nicht auch weitere Regionen an dieser Funktion beteiligt sein könnten. Diese Regionen interagieren mit tieferen Schichten der Colliculi, die die Metrik der Sakkaden auf einer motorischen Karte kodieren.

Auf Ebene 3 wird der Einfluss visueller Ereignisse im Zentrum und in der Peripherie der Fixation auf die zuvor erwähnten Module spezifiziert. Die Autoren beschreiben diesen Einfluss als *automatisch*, da er unabhängig von Lernroutinen oder gar intentionalen Prozessen stattfindet. So führt das Erscheinen eines fovealen Stimulus zu einer Aktivationszunahme im Fixationszentrum, während das Erlöschen zu einer Abnahme führt. Demgegenüber haben periphere Stimuli eine unmittelbare Neuberechnung der Salienz im Bewegungszentrum zur Folge. Sie können jedoch auch direkt das Fixationszentrum beeinflussen, was dem Phänomen der Express-Sakkaden (Fischer & Boch, 1983; Fischer & Weber, 1993) gerecht werden soll: Wenn das Fixationszentrum bereits kurz vor der Schwellenerreichung steht, kann ein peripherer Stimulus-*onset* zur direkten *gate*-Öffnung führen. Ein experimentelles Paradigma, das nicht nur geeignet ist, Expresssakkaden zu evozieren, sondern an sich die Informationsverarbeitung auf dieser Ebene widerspiegelt, ist das Gap-Paradigma (vgl. Fischer & Weber, 1997). Im Gegensatz zum Overlap-Versuch, bei dem der Proband ein in der Peripherie erscheinendes Target ansehen soll, der zuvor fixierte Fixationspunkt aber nicht verschwindet, wird beim Gap-Experiment

bereits kurz vor *onset* des Targets der Fixationspunkt gelöscht (für maximale Effekte in der Regel 200 ms). Dieser *offset* bewirkt eine charakteristische Verkürzung der sakkadischen Latenz von über 50 ms. Experimentelle Untersuchungen zu diesem Phänomen zeigen, dass diese Reaktionsbeschleunigung dabei nicht nur ein Resultat einer allgemeinen Warnreizkomponente darstellt, die sich auch z.B. über akustische Warnreize erzeugen lässt, sondern auch einen spezifisch visuell-okulomotorischen Prozess widerspiegelt. Dieser Prozess ist gekennzeichnet durch eine Verminderung der Aktivität der Fixationszellen während der Gap-Periode (vgl. Dorris & Munoz, 1995).

Ebene 4 repräsentiert *automatisierte* Prozesse, die zwar nicht willentlich gesteuert, jedoch aufgrund von Lernerfahrungen erworben worden sind¹. Innerhalb des WHERE-Systems sind hier drei Einflussquellen voneinander zu unterscheiden. Zunächst wird ein Einfluss der intrinsischen Salienz postuliert, d.h. z.B. von den Eigenschaften früherer Targets oder der Ungewöhnlichkeit eines aktuellen Reizes bis hin zu Kontrasteinflüssen (vgl. Radach et al., 2004, für eine kritische Diskussion). Als weiteres kommen räumliche Selektionsphänomene (*spatial selection*) hinzu, ein Beispiel hierfür wäre „inhibition of return“ für Sakkaden (Rayner et al., 2003). Dieser Effekt äußert sich in längeren Fixationszeiten vor Sakkaden, die an eine direkt zuvor angeblickte Stelle zurückkehren. Ebenfalls werden auf dieser Ebene Selektionseinflüsse wirksam, die eine gezielte Suche nach spezifischen Eigenschaften von Reizen (*features*) ermöglichen (*search selection*), ohne dass diese Selektion als willentlich im Sinne der Prozesse auf Ebene 5 gedacht wird². Innerhalb des WHEN-Systems können Warnsignale oder ein vorhersagbarer Onset von Targets einen Einfluss der temporalen Vorverarbeitung darstellen. Aber auch die Intensität der kognitiven Verarbeitung kann auf dieser Ebene die Verarbeitungszeit modulieren und einen Effekt auf die Fixationszeiten nach sich ziehen (Wortfrequenzeffekt)³.

Auf der obersten Ebene 5 werden *willentliche* Prozesse subsummiert. Auf beiden Routen sind Effekte zu erwarten, zum einen ein willentliches Timing der Sakkade mit direkter Wirkung auf die Aktivität im Fixationszentrum oder aber eine willentliche Wahl des Sakkadenziels, was sich entweder in konkreten Koordinaten oder in der Voraktivierung spezifischer abstrakter Features niederschlägt. Beispiele für solchermaßen kognitiv gesteuerte Sakkaden sind Antisakkaden (vgl. Kapitel 4), die in entgegengesetzter Richtung zu einem erscheinenden Target ausgeführt werden sollen und dabei neben einer Inhibitionsleistung auch ein räumliches Umkodieren der

¹ Die Autoren sprechen auf dieser Ebene von einer Integration von *higher level*-Informationen, doch sind innerhalb der kognitiven Psychologie solche Prozesse terminologisch noch eher als *low level*-Informationen zu fassen.

² Als klassische Versuchsanordnung in diesem Zusammenhang ist die „visuelle Suche“ zu nennen (vgl. Kap. 2).

³ Vgl. auch Radach (1999) für Vorschläge zur Erweiterung des Modells von Findlay & Walker, um direkte kognitive Einflüsse auf die räumliche Verarbeitung besser abzubilden.

Zielkoordinaten (Ebene 5) erfordern⁴, und gedächtnisgesteuerte Sakkaden, die nach einem spezifizierten Behaltensintervall gleichermaßen verzögert ausgeführt werden sollen. Beide Sakkadentypen sind also nicht visuell geführt, d.h. sie verlaufen immer „ins Leere“. Die bei den Antisakkaden bisweilen auftretenden fehlerhaften Prosakkaden werden von Findlay & Walker (1999) interpretiert im Sinne einer Beendigung der Berechnungen auf Ebene 3, bevor das Signal zum Abbruch eines Sakkadenprogramms eingetroffen ist. Läsionsstudien konnten zeigen, dass Antisakkaden bezüglich der zugrundeliegenden neurophysiologischen Prozesse zu unterscheiden sind von den gedächtnisgesteuerten Sakkaden (vgl. Kapitel 5), da bei letzteren zusätzlich der Nucleus caudatus involviert ist (Vermersch et al., 1999). Einige Autoren reihen auch das *double step*-Paradigma (Becker & Jürgens, 1979) unter die willentlichen Sakkaden ein (z.B. Heide & Kömpf, 1998), doch spricht viel für eine eher nicht-willentliche Steuerung (vgl. Kapitel 6). Dennoch soll an dieser Stelle auf diese wichtige Versuchsanordnung eingegangen werden. Bei diesem Paradigma springt ein in der Peripherie erscheinender Zielreiz in den meisten der Versuchsdurchgänge noch weiter nach außen. Hierbei variiert in Abhängigkeit von der Zeit zwischen dem Aufleuchten des Targets an der inneren Position bis zum Aufleuchten an der äußeren Position die mittlere Landeposition der Sakkade. Entscheidender Parameter ist die Reprogrammierungszeit zwischen dem Onset des zweiten Targets und dem Beginn der Augenbewegung. Ist diese Zeit kurz (ca. 50 ms), landet das Auge auf der Position des inneren Zielreizes, während bei einer ausreichenden Reprogrammierungszeit (ab ca. 140 ms) das Auge auf dem äußeren Target landet. Dazwischen verhält sich die Landeposition linear in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit. Diese Augenbewegung spiegelt im Rahmen des Modells von Findlay & Walker (1999) die räumliche und zeitliche Integration visueller Information wider, bei der sich die Interaktion beider Verarbeitungsrouten direkt auf der Salienzkarte zeigt.

3.1.2 Neurophysiologische Grundlagen der Blicksteuerung

Inzwischen ist relativ gut bekannt, welche hirneurophysiologischen Prozesse diese beschriebenen Aspekte der Sakkadensteuerung widerspiegeln (Leigh & Kennard, 2004). Für einen Überblick des Informationsflusses im Gehirn soll an dieser Stelle anhand Abbildung 3.2 zunächst eine Übersicht gegeben werden (vgl. Heide & Kömpf, 1998), bevor auf einzelne Prozesse detaillierter eingegangen wird. Die generell zunächst im visuellen Kortex ankommende Information von der Retina wird vom posterioren Parietalkortex genutzt, um eine reflexive räumliche Exploration zu gewährleisten, während in den frontalen Augenfeldern die intentionale Exploration des visuellen Raums sowie die Inhibition reflexiver Sakkaden z.B. bei Antisakkaden vorbereitet wird (Ebene 5).

⁴ Vgl. Kapitel 4.1 für Details und theoretische Alternativen.

Supplementärmotorische Areale unterstützen dabei die Berechnung sakkadischer Sequenzen wie im Double Step-Paradigma, während im dorsolateralen präfrontalen Kortex Gedächtnisinhalte zur Ausführung gedächtnisbasierter Sakkaden verarbeitet werden. Kombinationen solcher Paradigmen aktivieren wiederum selektiv zusätzliche Regionen, wie z.B. memorisierte sakkadische Sequenzen zusätzlich den rechten intraparietalen Sulcus sowie die supplementären Augenfelder (vgl. Heide et al., 2001, für eine Übersicht).

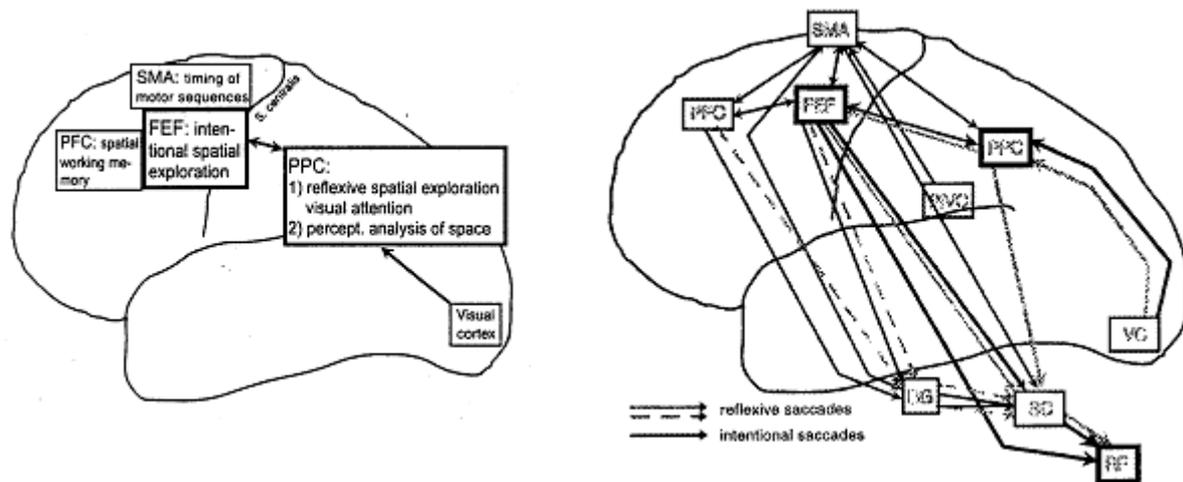


Abbildung 3.2: Korticale Regionen und Verarbeitungswege aus Heide & Köpff (1998, s. Text für Details). Im Informationsflussmodell der rechten Abbildung bedeuten *gebrochene Linien* inhibitorische Funktionen zur Unterdrückung reflexiver Sakkaden, während *durchgehende graue Linien* die wichtigsten Verarbeitungswege für reflexive Sakkaden markieren. *Dunkle Linien* beziehen sich auf intentionale Sakkaden. Legende: PFC Präfrontalkortex, SMA supplementäre Motorareale, FEF frontale Augenfelder, PPC posteriorer Parietalkortex, VC visueller Cortex, PIVC parietal-insularer Vestibularcortex, BG Basalganglien, SC Superior colliculus, RF Formatio reticularis.

Nach diesem allgemeineren Überblick soll im Folgenden die Neuropsychologie der Augenbewegungen noch etwas genauer dargestellt werden. Dies ist unerlässlich vor dem Hintergrund der angestrebten Interpretation der Befunde einzelner Paradigmen. In diesem Kapitel soll beschrieben werden, auf welche Weise die Untersuchung von Sakkaden Rückschlüsse auf zugrundeliegende Dysfunktionalitäten innerhalb des Verhaltens wie des ZNS erlaubt (vgl. Leigh & Kennard, 2004, für einen gelungenen Überblick). Besonders hilfreich ist dabei die Tatsache, dass die Okulomotorik zu den am besten untersuchten motorischen Systemen beim Menschen gehört und daher auch zur Untersuchung komplexer Prozesse wie Kognition, Gedächtnis und Wahrnehmung beitragen kann.

Zunächst lassen sich einfache Beziehungen zwischen Sakkadenlänge, Geschwindigkeit und Dauer ausmachen, die als „*main sequence*“ bekannt sind (vgl. Kapitel 2.3.2). Je länger die Sakkade, desto

höher die maximale Geschwindigkeit und Dauer. Die Beziehung zwischen maximaler Sakkadengeschwindigkeit und der Amplitude wird häufig durch eine lineare oder Exponentialfunktion angenähert (Bahill et al., 1975; Lebedev et al., 1996). Selbst die längsten Sakkaden dauern allerdings immer unter 100 ms, so dass ein visuelles Feedback auf eine Sakkade nicht mehr einwirken kann. Aus diesem Grund bezeichnet man Sakkaden auch als ballistische Bewegungen (Becker, 1989). Trotz der fehlenden willentlichen Kontrolle während einer Sakkade können ihre Parameter durch Faktoren wie Alertness, mentale Belastung sowie von der Sequenz der Zielreize innerhalb gewisser Grenzen beeinflusst werden (Bronstein & Kennard, 1987).

Zunächst sollen die prämotorischen Areale geschildert werden, die allgemein für schnelle Blickbewegungen verantwortlich sind. Alle Motoneuronen in den okulomotorischen, trochlearen und abducens-Kernen erhalten ihre Sakkadeninformation von Zellen in der *formatio reticularis* im Stammhirn, die prämotorische exzitatorische oder inhibitorische Burst-Neuronen genannt werden. Allgemein werden alle Augenbewegungen von einem „Pulse“-Signal innerviert, das von den Burst-Neuronen ausgesendet wird. Diese Neuronen zeigen eine intensive Entladungsrate ab ca. 12 ms vor Beginn jeder Sakkade (Scudder et al., 2002). Die Feuerrate korreliert mit der Sakkadengeschwindigkeit, und die Anzahl der Spikes variiert proportional zur Sakkadenlänge. Die Projektionsbahnen von den Burst-Neuronen zu den okulomotorischen Muskeln verlaufen im Detail unterschiedlich für horizontale und vertikale Sakkaden sowie für die exzitatorischen und inhibitorischen Burst-Neuronen (vgl. Leigh & Zee, 1999). Ein weiteres Netzwerk, der sogenannte „neural integrator“ im Hirnstamm sowie im Cerebellum, ist verantwortlich für die Integration des sakkadischen Pulse-Signals, das eine Geschwindigkeitsinformation trägt, und des Step-Signals. Letzteres ist charakterisiert durch eine stufenartige Zunahme in der Feuerrate und trägt die Positionsinformation. Zusätzlich hält es die okulomotorischen Muskeln am Ende einer Sakkade in einem tonischen Kontraktionszustand (Leigh & Zee, 1999). Während die prämotorischen Burst-Neuronen nur während Sakkaden feuern, sind die Omnipause-Neuronen (Pons, *nucleus raphe interpositus*) nur während der Fixation aktiv und wirken inhibitorisch auf die prämotorischen Burst-Neuronenpopulationen.

Eine Störung dieses Netzwerks im Stammhirn kann sich auf verschiedene Weisen auswirken: Bei einigen Krankheiten (z.B. Niemann-Pick Typ C) kann die Beziehung zwischen Sakkadenamplitude und -geschwindigkeit (s.o.) gestört sein, so dass z.B. Sakkaden in bestimmte Richtungen deutlich verlangsamt sind (Rottach et al., 1997) oder gar nicht mehr ausgeführt werden. Die selektive Beeinträchtigung bestimmter Sakkadenrichtungen ist darin begründet, dass horizontale und vertikale Sakkaden im Hirnstamm von verschiedenen prämotorischen

Neuronenpopulationen gesteuert werden (s.o.). Eine Beeinträchtigung im Bereich der Pons (Omnipause-Neuronen) kann entweder ebenfalls eine Verlangsamung von Sakkaden (vgl. Leigh & Kennard, 2004) oder oszillatorische, unkontrollierbare Sakkadenbewegungen zur Folge haben (Bhidayasiri et al., 2001).

Purkinje-Zellen in der dorsalen Vermis projizieren auf den caudalen Teil im Nucleus fastigial im Cerebellum und kodieren exakt den Zeitpunkt, an dem eine Sakkade gestoppt werden muss, um auf einem Zielreiz zu landen. Vom Nucleus fastigial wird diese Information zu den prämotorischen Burst-Neuronen weitergeleitet. Läsionen der Vermis führen zu größerer Variation in Sakkadenamplituden (Takagi et al., 1998). Die genannten Strukturen im Cerebellum spielen daher eine wichtige Rolle beim Feintuning der Sakkadenamplitude, das vermutlich durch eine Efferenzkopie des motorischen Signals aus dem Hirnstamm, die den cerebellären Strukturen zur Verfügung gestellt wird, gewährleistet wird (für Details vgl. Leigh & Kennard, 2004). So wird vermutet, dass bei Patienten mit sakkadischer Hypermetrie diese Feedbackfunktion nicht vollständig zur Verfügung steht. Generell zeigen die Augen bei normalen Probanden stets ein leichtes „Undershoot“, wenn sie zu einem Zielreiz dirigiert werden, besonders bei Sakkadenamplituden von $> 10^\circ$. Bei cerebellären Krankheiten oder Läsionen ist jedoch ein charakteristisches „Overshoot“ zu beobachten, was auf die Beteiligung des Nucleus fastigial im Cerebellum zur Feinabstimmung der Sakkade im Rahmen der Zielgenauigkeit hinweist (Robinson et al., 1993). Darüber hinaus wird diese Efferenzkopie von der dorsalen Vermis und den N. fastigial an den medialen dorsalen Thalamus weitergeleitet. Diese Verbindung speichert die Information des Feedbacksignals zur spontanen Anpassung sakkadischer Sequenzen an neue visuelle Anforderungen (Reprogrammierung), so dass eine Läsion in diesen Bereichen z.B. zur Beeinträchtigung beim Ausführen sakkadischer Sequenzen im *double step*-Paradigma führt (Gaymard et al., 1994).

Eine wichtige Rolle bei der Initiierung von Sakkaden spielen die Colliculi superiores, die inhibierend auf die Omnipause-Neuronen einwirken. Außerdem wird vermutet, dass diese Struktur und/oder der Nucleus fastigial im Cerebellum verantwortlich für die Umwandlung von abstrakten räumlichen Positionsinformationen (place map) in temporale Informationen, die im Stammhirn vorherrschen, sind (s.o., vgl. Leigh & Kennard, 2004).

Nach der Darstellung der neurophysiologischen Substrate, die allgemein für alle Sakkaden relevant sind, soll im Folgenden näher auf Korrelate spezifischer Sakkadentypen eingegangen werden, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung relevant sind. Bei der Initiierung

reflexiver Sakkaden zu einem in der Peripherie aufleuchtenden Stimulus (Prosakkaden) spielen die parietalen Augenfelder die zentrale Rolle. Diese projizieren direkt zu den Colliculi superiores. Bei parietalen Läsionen kommt es daher zu einer Zunahme der sakkadischen Latenzen (Pierrot-Deseilligny et al., 1991; Braun et al., 1992; Gaymard et al., 2003), während willentliche Sakkaden nicht beeinträchtigt werden. Gestützt werden diese Befunde zudem durch TMS-Studien am posterioren Parietalkortex (PPC) (Kapoula et al., 2001).

Wird in einer experimentellen Manipulation des beschriebenen Prosakkaden-Paradigmas der zentrale Fixationspunkt etwa 200 ms vor Erscheinen des Zielreizes gelöscht (Gap-Bedingung), erhält man reflexive Sakkaden von z.T. erheblich kürzerer Dauer (sogenannte Express-Sakkaden, Fischer & Rampsperger, 1984, s.o.). Wie bereits erwähnt, wird durch die Löschung des Fixationspunktes ein „fixation release“-Mechanismus ausgelöst, der im rostralen Bereich der Colliculi superiores lokalisiert ist und neben einer modalitätsunspezifischen Warnreizkomponente für die Reaktionszeitverkürzung verantwortlich ist (Dorris & Munoz, 1995). Daher können Expresssakkaden als ein Test für die Funktionsfähigkeit der Colliculi superiores angesehen werden.

Gegenüber den oben beschriebenen reflexiven Express-Sakkaden werden Sakkaden im Overlap-Paradigma, bei denen der Fixationspunkt während des gesamten Durchgangs bestehen bleibt, vor allem durch die frontalen Augenfelder initiiert, wie eine große Anzahl von Studien am Menschen und Affen übereinstimmend gezeigt hat (Rivaud et al., 1994; Pierrot-Deseilligny et al., 2002)⁵. Generell spielen die frontalen Augenfelder (FEF) bei willentlichen Sakkaden eine große Rolle. Bei den sogenannten „memory guided“-Sakkaden (vgl. Kapitel 5) wird ebenso wie bei den zuvor erwähnten Sakkadentypen ein Zielreiz in der Peripherie gezeigt. Allerdings muss zu diesem Zeitpunkt eine Sakkade unterdrückt werden, da erst nach einem bestimmten Behaltensintervall, nach dem das Target bereits verschwunden ist, eine Sakkade zu der zuvor illuminierten Stelle ausgeführt werden soll. Dieses Paradigma wird diagnostisch zur Einschätzung des räumlichen Arbeitsgedächtnisses verwendet. Zur Ausführung dieser Sakkaden wird ein Netzwerk aus dorsolateralem Präfrontalcortex (DLPFC), den FEF sowie dem PPC verantwortlich gemacht (Pierrot-Deseilligny et al., 1993). Läsionen im DLPFC haben inakkurate Sakkaden zur Folge (Sawaguchi & Goldman-Rakic, 1994; Sweeney et al., 1996), und deshalb wird vermutet, dass diese Region räumliche Koordinaten im Gedächtnis speichert (Kobayashi et al., 2002). Auch bei TMS-Studien (Transkranielle Magnetstimulation) konnte ein erhöhter variabler Fehler in der

⁵ Bisweilen werden diese Sakkaden den willentlichen Sakkaden zugerechnet (z.B. Leigh & Kennard, 2004), eine unwillkürliche Reaktion auf den auftauchenden Stimulus ist allerdings schwer zu unterdrücken, so dass auch diese Sakkaden mit guten Gründen den reflexiven Sakkaden zugerechnet werden könnten.

Sakkadengenauigkeit festgestellt werden (Brandt et al., 1998; Pierrot-Deseilligny et al., 2003). In den FEF können Neuronen ebenfalls räumliche Information speichern (Umeno & Goldberg, 2001). Eine Stimulation der FEF durch TMS zog darüber hinaus Beeinträchtigungen der Latenzen von memory guided-Sakkaden nach sich (Wipfli et al., 2001), weshalb diese Region mit der konkreten Sakkadeninitiierung der memory guided-Sakkaden in Verbindung gebracht wird. Weitere beteiligte Regionen sind Areale im PPC und im rostralen interparietalen Sulcus (IPS), die für die visuell-räumliche Integration des Zielreizes zuständig sein sollen (Brown et al., 2004), und rostral von den supplementären Augenfeldern (SEF) (Heide et al., 2001; Merriam et al., 2001).

Auch bei der Ausführung von Antisakkaden muss eine reflexhafte Bewegung unterdrückt werden, da bei Erscheinen eines peripheren Targets eine Bewegung der Augen in die entgegengesetzte Richtung erfolgen soll. Eine wesentliche abhängige Variable in diesem Zusammenhang ist die relative Anzahl fehlerhafter reflexartiger Prosakkaden. Eine hohe Fehlerrate deutet auf eine geringe Fähigkeit hin, Sakkaden willentlich zu unterdrücken. Sowohl der DLPFC wie die FEF sind in diesem Paradigma involviert. Die FEF sind stärker aktiviert als bei Prosakkaden (s.o.; DeSouza et al., 2003). Spezifische DLPFC-Läsionen können zu erhöhten Fehlerraten führen, während FEF-Läsionen sich nur negativ auf die Latenzen auswirken (Pierrot-Deseilligny et al., 2003). Daher werden dem DLPFC Inhibitionsfunktionen und den FEF Ausführungsfunktionen zugeschrieben, wobei letztere möglicherweise zusätzlich in Inhibitionsprozesse involviert sein könnten (Cornelissen et al., 2002).

Für das Lernen komplexer okulomotorischer Bewegungsabläufe scheinen Netzwerke aus dorsomedialen Frontalkortex, Basalganglien und Cerebellum verantwortlich zu sein (Leigh & Kennard, 2004). Die prä-supplementären Motorareale (pSMA) spielen eine Rolle beim Erlernen neuer Bewegungssequenzen, während die pSMA eher für die Übertragung von Gelerntem auf neue Situationen zuständig sind (Husain et al., 2003). Die linken SAF kontrollieren motorische Sequenzen (Gaymard et al., 1993). Zur präzisen Neurophysiologie bei solchen komplexen Aufgaben ist allerdings naturgemäß weniger bekannt. Beim Ausführen einer visuellen Suchaufgabe wurden Neglect-Patienten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass diese Patienten, die meist eine Schädigung im rechten Parietallappen aufwiesen, kein Gedächtnis für bereits abgesuchte Bereiche eines Suchraums aufwiesen (Husain et al., 2001). Elektrophysiologische Ableitungen beim Affen deuten vor allem auf eine Beteiligung des PPC hin. Neuronen in der lateralen Interparietalregion (LIP) sind bei der Zielauswahl bei kompetitiven Targets beteiligt (Wardak et al., 2002). Beim Menschen konnten bei visuellen Suchaufgaben ebenfalls Beteiligungen des PPC sowie orbitofrontaler Areale bei der Elaboration einer

Suchstrategie nachgewiesen werden (Gitelman et al., 2002; Hodgson et al., 2002). Allerdings setzt die Plastizität des Gehirns einer Unterscheidung zwischen notwendigen und beteiligten Strukturen bei komplexeren Aufgaben Grenzen. Eine globale Übersicht zur referierten funktionalen Bedeutung der genannten Strukturen bietet Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Zusammenfassung einiger Läsionseffekte auf Sakkaden (aus: Leigh & Kennard, 2004; eigene Übersetzung). Die Autoren mahnen zur Vorsicht bei der Gleichsetzung bestimmter Läsionen mit spezifischen Verhaltensauffälligkeiten, da meist größere Netzwerke an jedem Aspekt selbst einfacher Sakkaden beteiligt sind.

<i>Anatomische Struktur oder Verarbeitungsweg</i>	<i>Generelle Effekte von Läsionen</i>
Motoneuronen und okulomotorische Nerven	Verlangsamte Sakkaden mit geringer Bewegungsspanne
Prämotorische Burst-Neuronen	Verlangsamte Sakkaden horizontal / vertikal
Omnipause-Neuronen	Sakkadische Oszillationen; Verlangsamte Sakkaden horizontal / vertikal
Cerebellum: dorsale Vermis	Sakkadische Dysmetrie
Cerebellum: Nucleus fastigial	Sakkadische Hypermetrie
Superior colliculus	Verlust von Express-Sakkaden
Thalamus	Beeinträchtigung der Reaktionen auf double step-Stimuli
Parietale Augenfelder	Erhöhte Latenz bei visuell geführten Sakkaden; weniger akkurate Reaktionen auf double step-Stimuli; beeinträchtigte visuelle Suche
Frontale Augenfelder	Bilateral erhöhte Latenz zu Overlap-Stimuli, erinnerten Stimuli oder in der Antisakkadenaufgabe; kontralaterale Hypometrie zu visuellen und erinnerten Zielreizen
(Prä-)supplementäre Augenfelder	Beeinträchtigung von erinnerten Sakkadensequenzen und der Umkehrung einer gelernten Bewegungssequenz
Dorsolateraler Präfrontalcortex	Verminderte Präzision von Sakkaden zu erinnerten Zielreizen; erhöhte Fehlerrate in der Antisakkadenaufgabe; Beeinträchtigung der visuellen Suche; Beeinträchtigung vorhersagbarer Sakkaden
Basalganglien	Schwierigkeiten in der Initiierung von willentlichen Sakkaden in Aufgaben, die gelerntes oder vorhersagbares Verhalten und das Arbeitsgedächtnis erfordern (z.B. visuelle Suche)

In einer Untersuchung von Kimmig et al. (2001) konnte der Unterschied zwischen reflexiven und willentlich initiierten sakkadischen Blickbewegungen mittels gleichzeitig per fMRI registrierter kortikaler Aktivität verdeutlicht werden. Da diese Untersuchung zudem eine der ersten darstellt, die funktionelle bildgebende Verfahren zur Untersuchung von Sakkaden einsetzte, soll an dieser Stelle eine beispielhafte Darstellung erfolgen. In dieser Untersuchung wurde der von Kimmig et al. (1999) entwickelte MR-Eyetracker verwendet, der über eine zeitliche Auflösung von 1000 Hz sowie einer horizontalen Messgenauigkeit von $< 0.2^\circ$ verfügt. Der MR-Eyetracker wurde in Verbindung mit einem 1.5 Tesla-Scanner verwendet. Die Autoren untersuchten grundlegende visumotorische Aufgabenstellungen. Verglichen wurde die BOLD-Antwort bei der Betrachtung von unterschiedlich häufigen Zielreizsprüngen pro Zeitintervall sowie bei verschiedenen großen Targetamplituden (2° , 6° , 10°). In einer für die hier vorliegende Studie wesentlichen Variation wurde die kortikale Aktivität während Pro- und Antisakkaden verglichen.

Wie bereits oben erwähnt, sind zur Ausführung von Antisakkaden im Vergleich mit Prosakkaden zwei distinkte Prozesse vonnöten, zum einen eine Unterdrückung einer unwillkürlichen reflexiven Sakkade und zum anderen eine räumliche Transformation der Zielreizlokation⁶. In Läsionsstudien konnte gezeigt werden, dass eine Beeinträchtigung der Augenfelder eine erhöhte Anzahl von fehlerhaften Prosakkaden zur Folge hat (Braun et al., 1992; Burman & Bruce, 1997; Guitton et al., 1985; Sommer & Tehovnik, 1997), wobei eine andere Studie als neuronales Korrelat für die erhöhte Fehlerraten anstelle der frontalen Augenfelder den dorsolateralen Präfrontalkortex angibt (Pierrot-Deseilligny et al., 1991). In einem direkten Vergleich der kortikalen Aktivität von Pro- und Antisakkaden fanden zahlreiche PET-Studien eine erhöhte Aktivität der frontalen Augenfelder bei Bearbeitung der Antisakkadenaufgabe (Doricchi et al., 1997; O'Driscoll et al., 1995; Sweeney et al., 1996). In einer weiteren PET-Studie (Paus et al., 1993) sowie einer fMRI-Studie (Muri et al., 1998) konnte ein solcher Unterschied jedoch nicht nachgewiesen werden. In einer Untersuchung hinsichtlich möglicher Lateralisierungseffekte schienen die linken frontalen Augenfelder im Gegensatz zu den rechten nicht zur Suppression von Sakkaden beizutragen (Rivaud et al., 1994).

Da bis vor kurzer Zeit keine Möglichkeit einer zeitlich und räumlich hinreichend großen Auflösung bei der Messung von Blickbewegungen im fMRI-Scanner zur Verfügung stand, wurde oftmals entweder auf ungenaue Verfahren (EOG; vgl. Felblinger et al., 1996) zurückgegriffen oder die Messung der Blickbewegungen außerhalb des Scanners vor oder nach der Messung

⁶ Theoretische Alternativen zu dieser Auffassung werden in Kapitel 4.1 ausführlich diskutiert.

vorgenommen, so dass eine direkte Korrelation der okulomotorischen Performanzparameter mit Aktivitätsdifferenzen in ausgewählten kortikalen Zentren nicht möglich war.

In der Untersuchung von Kimmig et al. (2001) hingegen wurde ein Block-Design verwendet, in dem sich je 32 Sekunden dauernde „Fixationsperioden“ und „Sakkadenperioden“ abwechselten. Während der Fixationsperiode sollten die Probanden auf einen zentralen Fixationspunkt blicken. In der Sakkadenperiode wurde zuerst für 1 – 1.5 s der Fixationspunkt dargeboten, dann folgte nach jeweils einer 200 ms dauernden Gap-Periode für 3 s entweder rechts oder links ein Zielreiz. In jedem experimentellen Durchgang gab es insgesamt sechs Fixations- und Sakkadenperioden. Zur Variation der Amplitude wurden drei Durchgänge mit je 2°, 6° und 10° Sakkadenamplitude bei konstanter Sakkadenfrequenz von 0.44 Hz durchgeführt. Die Sakkadenfrequenz wurde bei konstanter Amplitude von 10° zwischen 0.06, 0.44 und 1.25 Hz (entsprechen 2, 14 und 40 Targetsprüngen während 32 s) in drei Durchgängen variiert. Zum Vergleich von Pro- und Antisakkaden mussten die Probanden jeweils drei Durchgänge bei konstanter Frequenz (0.44 Hz) und Amplitude (10°) absolvieren. An der Untersuchung zur Sakkadenfrequenz und Amplitude nahmen fünf, an der Antisakkadenaufgabe zehn Probanden teil. Kortikale Aktivierung wurde gemessen in den frontalen und supplementären Augenfeldern, dem Parietalkortex und dem Striatum, sowie in den bewegungssensitiven Bereichen des Parieto-Occipitalkortex.

Die BOLD-Antworten in den genannten Regionen waren hoch korreliert mit der Sakkadenfrequenz, aber nicht mit der Sakkadenamplitude. In der Antisakkadenaufgabe war die BOLD-Antwort allgemein erhöht im Vergleich zur Prosakkadenaufgabe mit statistisch signifikanten Unterschieden in den frontalen Augenfeldern, aber auch im Parietalkortex sowie im Precuneus. Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung deutlich eine Abhängigkeit zwischen der Ausführung verschiedener Sakkadenaufgaben, insbesondere bei Pro- und Antisakkaden, und der BOLD-Antwort in den korrespondierenden kortikalen Zentren, was die grundsätzliche Eignung bildgebender Verfahren zur genaueren Untersuchung hirneurophysiologischer Korrelate belegt. In jüngster Zeit mehren sich Studien, die diese Prozesse in einem event-related-Design anstelle eines Block-Designs untersuchen (vgl. Munoz, 2002).

Im nächsten Kapitel soll nun ein Experiment dargestellt werden, das reflexive Prosakkaden zum Untersuchungsgegenstand macht, um mögliche THC-Effekte zu untersuchen. Auf der Basis der Ergebnisse können dann Rückschlüsse über intakte und gestörte kortikale Prozesse aufgrund der dargestellten neurophysiologischen Grundlagen gezogen werden.

3.2 Experiment 2: Visuell geführte Prosakkaden

Im vorherigen Kapitel wurde auf theoretische Aspekte der Steuerung von einfachen, reflexiven Sakkaden zu sichtbaren Zielreizen bereits detailliert eingegangen. In Kapitel 2 (Visuelle Suche) wurden mehrere Möglichkeiten der Störung des visuell-okulomotorischen Systems angesprochen, die anhand der experimentellen Untersuchung einfacher Prosakkaden genauer spezifiziert werden sollen.

Bei der Ausführung einfacher Sakkaden können Defizite in zwei distinkten Bereichen entstehen, die für die Leistungsminderung in der visuellen Suchaufgabe aus dem ersten Experiment zumindest zum Teil verantwortlich sein könnten. Dies betrifft gemäß dem im vorherigen Kapitel diskutierten Modell von Findlay & Walker (1999) den zeitlichen Parameter, also die Latenz vom Erscheinen des Zielreizes bis zur Ausführung der zielgerichteten Sakkade, sowie den räumlichen Parameter, also die Länge der Sakkade zum Zielreiz. Da die mittlere Sakkadenlänge der Cannabisgruppe in der visuellen Suche signifikant um etwa $0,5^\circ$ verlängert war (vgl. Kapitel 2.3.1), ist dies möglicherweise auch bei einfachen visuell geführten Sakkaden nachzuweisen. Somit sind die beiden Parameter Latenz und Länge die zentralen abhängigen Variablen in diesem Experiment. Daher sind zwei Arbeitshypothesen festzuhalten:

H1: Die Latenzen für einfache Prosakkaden sind für langjährige Cannabisuser mit frühem age of onset verlängert.

H2: Die mittleren Sakkadenlängen zum Zielreiz bei einfachen Prosakkaden sind für langjährige Cannabisuser mit frühem age of onset verlängert.

Diese Hypothesen sollen im Experiment getestet werden. Darüber hinaus lassen sich auch andere Parameter erheben, die bei beiden Gruppen verglichen werden sollen. Dazu gehören mittlere Sakkadengeschwindigkeiten sowie mögliche *time on task*-Effekte. Bezüglich der Sakkadengeschwindigkeiten werden aufgrund der Ergebnisse in der visuellen Suche (s. Kapitel 2) keine Gruppenunterschiede erwartet. Als einfacher Parameter der Fixationsstabilität lässt sich die mittlere räumliche Differenz zwischen der Position zu Beginn einer Fixation und dem Ende einer Fixation berechnen. Auf der Basis der Daten zur visuellen Suche lassen sich diesbezüglich keine Hypothesen treffen, so dass dieser Parameter gemeinsam mit den *time on task*-Effekten *post hoc* betrachtet wird.

Als weiterer Faktor neben der Gruppenzugehörigkeit wird die Reaktionsbedingung Gap vs. Overlap (s. Kapitel 3.1.1) eingeführt. Das Ausmaß des Gap-Effektes ist erstens ein Maß für die Verarbeitung von Warnreizen und zweitens für die Funktionstüchtigkeit der mit den Colliculi superiores verbundenen zeitlichen *low-level*-Verarbeitung der Sakkadensteuerung (vgl. Kapitel 3.1.2). Als physiologisches Substrat, das beim Gap-Effekt eine Rolle spielt, gilt der PPC, da nach Läsionen dieses Areals Verlängerungen in den Reaktionszeiten in der Gap-Bedingung gefunden wurden (Pierrot-Deseilligny et al. 1987, 1991), während bei Läsionen der frontalen Augenfelder Verlängerungen der Reaktionszeit in der Overlap-Bedingung auftraten (Rivaud et al., 1994, vgl. Kapitel 3.1.2). Unterschiede zwischen den Gruppen im Ausmaß des Gap-Effektes könnten als Maß für Prozesse der Warnreizverarbeitung und/oder der Loslösung vom Fixationspunkt ebenso einen Teil der Reaktionszeitunterschiede in der visuellen Suche erklären, weshalb sich als dritte zentrale Hypothese ergibt:

H3: Das Ausmaß des Gap-Effektes ist in der Kontrollgruppe signifikant höher als in der THC-Gruppe.

Im nächsten Kapitel soll auf die Untersuchungsmethodik eingegangen werden, die der Testung der genannten Hypothesen zugrunde liegt.

3.3 Methode

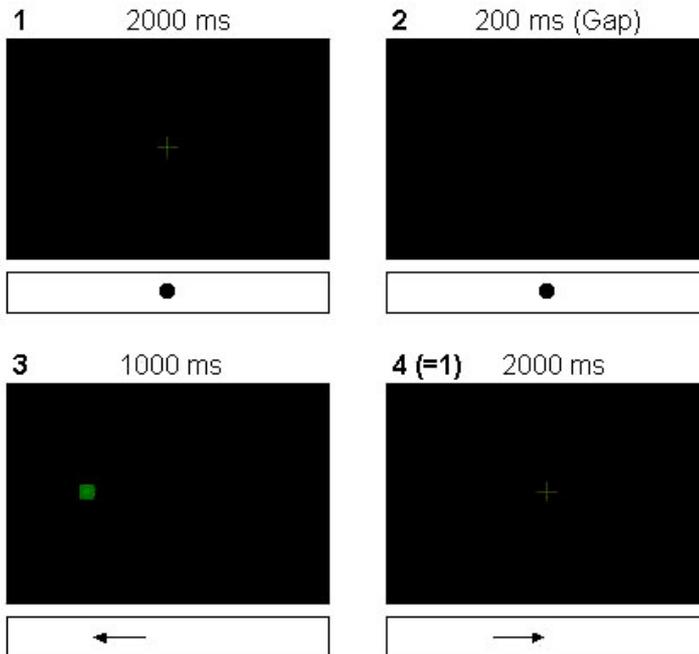
In diesem Experiment wurden die selben Probanden getestet, die auch die visuelle Suchaufgabe absolviert haben. Auch die Apparatur und das Setting, also z.B. der Sehabstand zum Monitor, wurden unverändert beibehalten (vgl. Kapitel 2.2). Bei der Messung der Blickbewegungen wurde allerdings im Gegensatz zur visuellen Suchaufgabe nur die horizontale Bewegung des Auges aufgezeichnet, da die Zielreize sich nur auf einer horizontalen Achse befanden. Dementsprechend wurde auch die Kalibrieroutine auf eine horizontale Messung angepasst, und zwar mit Kalibriertargets, die etwa an der Position der Zielreize im Versuch positioniert waren. Dadurch wurde eine maximale Genauigkeit der Messung gewährleistet. Vor Beginn der auszuwertenden Versuchsdurchgänge mussten alle Probanden einen Versuchsdurchgang mit 30 Übungssequenzen absolvieren, um ein gewisses Maß an Routine zu erzielen und mögliche Verständnisschwierigkeiten bezüglich des Versuchsablaufes zu minimieren. Bei diesem Übungsdurchgang wurde bereits wie im Hauptexperiment kalibriert und gemessen, um die

Probanden so gut wie möglich an die Apparatur zu gewöhnen. Der Versuch dauerte einschließlich der Instruktion, der Kalibrierung und der Übungsdurchgänge etwa 15-20 Minuten. Die Experimentaldurchgänge bestanden aus 120 Sakkaden, wobei bei der Hälfte der zentrale Fixationspunkt über den gesamten Durchgang hinweg bestehen blieb (Overlap), während er bei der anderen Hälfte 200 ms vor dem Onset des Zielreizes gelöscht wurde (Gap). Die meisten klassischen Experimente bedienen sich der Gegenüberstellung von Gap und Overlap-Bedingungen (z.B. Heide & Kömpf, 1998; Fischer, 1999; Pratt et al., 1999), weshalb auch hier die Overlap-Bedingung und nicht z.B. eine Step-Bedingung gewählt wurde, bei der bei Erscheinen des Zielreizes *gleichzeitig* der Fixationspunkt verschwindet. Die Gap-Periode von 200 ms wurde in Hinblick auf einen maximalen Gap-Effekt gewählt (vgl. Fischer & Weber, 1997). Der Zielreiz war ein kleines Quadrat (ca. $1/3^\circ$), das in einer Entfernung von 6° links oder rechts vom Fixationskreuz erschien. Die Zielentfernung wurde nicht zu klein gewählt, um eine größere Variation zu erhalten, sollte aber immer noch repräsentativ für die Ausführung alltäglicher Sakkaden (z.B. beim Lesen oder der visuellen Suche) sein. Die gewählte Distanz liegt darüber hinaus in einem in diesen Experimenten üblichen Rahmen (vgl. z.B. Fischer & Weber, 1991, Heide & Kömpf, 1998). In einem Experiment, in dem die Targetposition von 1° - 12° variiert wurde, konnten Fischer & Weber (1997) zeigen, dass sich die Latenz bei zunehmender Exzentrizität etwas verringert. Auch die Darbietung eines Kreuzes an der zentralen Fixationsposition sowie eines Quadrates als Zielreiz hat sich in anderen Studien bewährt (vgl. z.B. Fischer, 1999). Die Größe des Zielreizes hat keinen Effekt auf die abhängigen Variablen (Roberts et al., 1994), wurde aber in Anlehnung an eine übliche Buchstabengröße in Leseexperimenten gewählt (vgl. Kapitel 7). Die Probanden wurden instruiert, den Zielreiz beim Erscheinen so schnell und genau wie möglich zu fixieren (entsprechend auch: Reuter-Lorenz et al., 1995; Pratt et al., 1999) und nach dem Erlöschen wieder auf das zentrale Fixationskreuz zu blicken, das zwischen den einzelnen Durchgängen jeweils für 2000 ms sichtbar war (entsprechend auch z.B. Fischer & Weber, 1991; vgl. Abbildung 3.3)⁷. Die Prosakkadenaufgabe wurde bei allen Probanden vor der Antisakkadenaufgabe (s. Kapitel 4) durchgeführt, da nachgewiesen werden konnte, dass bei umgekehrter Reihenfolge ein erheblicher Sequenzeffekt auf die Prosakkadenaufgabe zu erwarten wäre (Machado & Rafal, 2000).

⁷ Zum Wortlaut der Instruktion vgl. Anhang A.

Prosakkaden-Paradigma (Gap):

Screenshots und
korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)



Prosakkaden-Paradigma (Overlap):

Screenshots und
korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)

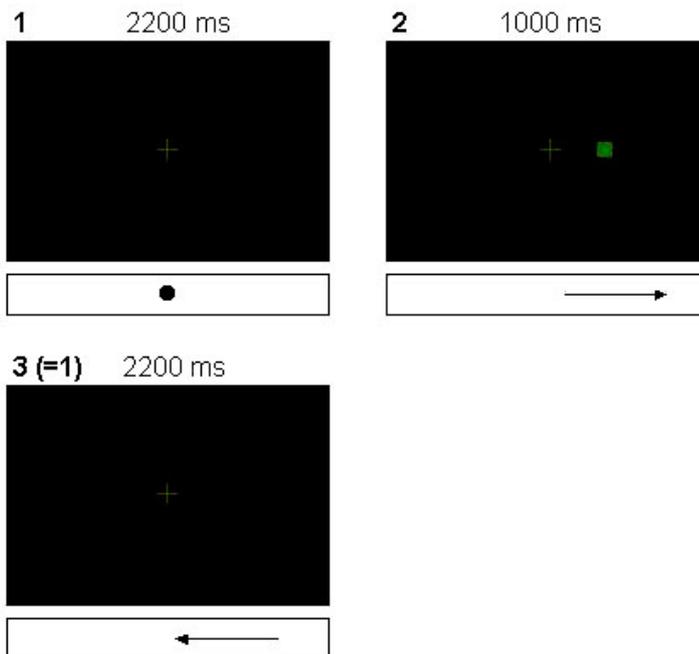


Abbildung 3.3: Prosakkaden-Paradigma: Ablauf eines Gap- (oben) bzw. Overlap-Durchgangs (unten) mit links bzw. rechts erscheinendem Zielreiz. Die Reize der Screenshots sind verhältnismäßig größer als im Original. Angegeben sind jeweils die Darbietungszeiten (oben) sowie die instruierten Blickbewegungen (darunter).

3.4 Prosakkaden: Ergebnisse

Vorbemerkungen

Insgesamt trägt jeder Proband maximal 60 Beobachtungen in der Gap- sowie 60 Beobachtungen in der Overlap-Bedingung bei. Aufgrund von Blinzeln oder kurzzeitigen Messausfällen ist es möglich, dass einige Sakkaden nicht in die Auswertung aufgenommen werden können. Für die Latenzen wurden aufgrund einer Sichtung der Verteilung alle Fälle ausgeschlossen, die eine Latenz von 700 ms überschreiten. Als untere Grenze für die Latenzen wurde ein Wert von 70 ms festgelegt, da Sakkaden unterhalb dieser Reaktionszeit mit Zufallswahrscheinlichkeit in die Richtung des Zieles bewegt wurden, es sich daher also nicht um die zu untersuchenden zielgerichteten Sakkaden handeln kann. Aufgrund dieser Festlegungen wurden über alle Versuchspersonen 2,9% aller aufgezeichneten Sakkaden aus der Auswertung ausgeschlossen. Um bezüglich des räumlichen Parameters ebenfalls nur offensichtlich zielgerichtete Sakkaden in die Auswertung mit aufzunehmen, wurden nur Sakkaden ausgewertet, die mindestens zwei und maximal neun Grad Schwinkel Länge aufwiesen. Dieser Bereich schließt die Wertung kleiner „zufälliger“ Sakkaden oder Sakkaden über den Monitorrand hinaus als zielgerichtete Sakkaden aus, bleibt jedoch groß genug, um möglichen Gruppenunterschieden Raum zu lassen. Aufgrund dieser Restriktionen wurden 4,7% der Sakkaden aus der Auswertung ausgeschlossen. Insgesamt trägt kein Proband weniger als 50 Beobachtungen pro Bedingung zur Berechnung des Mittelwertes bei.

Latenzen und Sakkadenamplituden

Bezüglich der *Latenzen* ist zwischen den Gap- und den Overlap-Durchgängen zu unterscheiden⁸. Der Effekt „Bedingung“ (Gap vs. Overlap) ist erwartungsgemäß signifikant ($F(1,38) = 260$; $p < 0,01$), so dass Sakkaden in der Gap-Bedingung schneller initiiert werden als in der Overlap-Bedingung. Auch der Haupteffekt zwischen den Gruppen ist signifikant ($F(1,38) = 4,25$; $p < 0,05$). THC-User weisen längere sakkadische Reaktionszeiten auf als die Kontrollgruppe, womit Hypothese 1 bestätigt wird. Der Unterschied beträgt ca. 8,5 ms in der Gap- und ca. 21,5 ms in der Overlap-Bedingung (vgl. Tabelle 3.2). Die Interaktion von „Bedingung“ und Gruppe ist nicht signifikant ($F(1,38) = 3,60$; $p > 0,05$). Somit ist der Gap-Effekt in der THC-Gruppe nicht

⁸ Zur möglichst ökonomischen Überprüfung der Hypothesen sowie möglicher Gruppenunterschiede im Gap-Effekt (Interaktion) wurde trotz der gerichteten Hypothesen zunächst ein globaler F-Test und daraufhin zusätzlich adjustierte Einzelkontraste berechnet.

verringert, so dass die Hypothese 3 sich nicht bestätigt. Zu einer weiteren Analyse der dritten Hypothese wurde für jeden Probanden das Ausmaß des Gap-Effektes ermittelt und zwischen den Gruppen verglichen. Die THC-Gruppe zeigte einen Gap-Effekt von durchschnittlich 49 ms gegenüber 62 ms in der Kontrollgruppe. Der Unterschied ist nicht signifikant ($t(38) = 1,91, p > 0,05$) und bestätigt somit das Ergebnis der Varianzanalyse bezüglich der Interaktion der Faktoren „Bedingung“ und Gruppe.

Betrachtet man ausschließlich die *Gap-Bedingung*, so ist in der THC-Gruppe eine mittlere Latenz von 135 ms gegenüber 127 ms in der Kontrollgruppe zu verzeichnen. Der Unterschied zwischen den Gruppen ist zwar in hypothesenkonformer Richtung, wird allerdings nicht als einfacher Haupteffekt (EHE) signifikant ($t(38) = 1,60, p > 0,05$). In der *Overlap-Bedingung* ist in der THC-Gruppe eine mittlere Latenz von 197 ms gegenüber 176 ms in der Kontrollgruppe zu verzeichnen (vgl. Abbildung 3.4). Der Unterschied zwischen den Gruppen ist in hypothesenkonformer Richtung und als EHE signifikant ($t(38) = 2,14, p < 0,05$).

Tabelle 3.2.: Übersicht über Latenzen, mittlere intraindividuelle Streuungen der Latenzen und die mittlere Amplitude in der Prosakkadenaufgabe für Gap- und Overlap-Durchgänge in beiden Gruppen. Die Werte der Amplituden wurden über Gap- und Overlap-Durchgänge gepoolt (vgl. Text). Standardabweichungen sind in Klammern angegeben. Signifikante t-Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ markiert. Zur Berechnung der t-Werte der mittleren intraindividuellen Streuungen wurden quadrierte Werte verwendet (Varianzen).

Bedingung / Parameter		Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38) ⁹
Gap	mittlere Latenz (ms)	126 (16)	135 (17)	1,60
	mittlere Latenz – SD pro Pbn (ms)	33,92 (12,22)	43,33 (14,47)	2,22*
Overlap	mittlere Latenz (ms)	175 (26)	197 (36)	2,14*
	mittlere Latenz – SD pro Pbn (ms)	47,88 (19,59)	66,44 (40,55)	1,84
mittlere Amplitude (°)		5,73 (0,22)	5,81 (0,18)	1,16

⁹ T-Werte sind in den Gap- und Overlap-Bedingungen für die einfachen Haupteffekte (EHE) angegeben. Die Signifikanzbeurteilung basiert auf der Bonferroni-Adjustierung. Für die F-Werte der Varianzanalyse siehe Text.

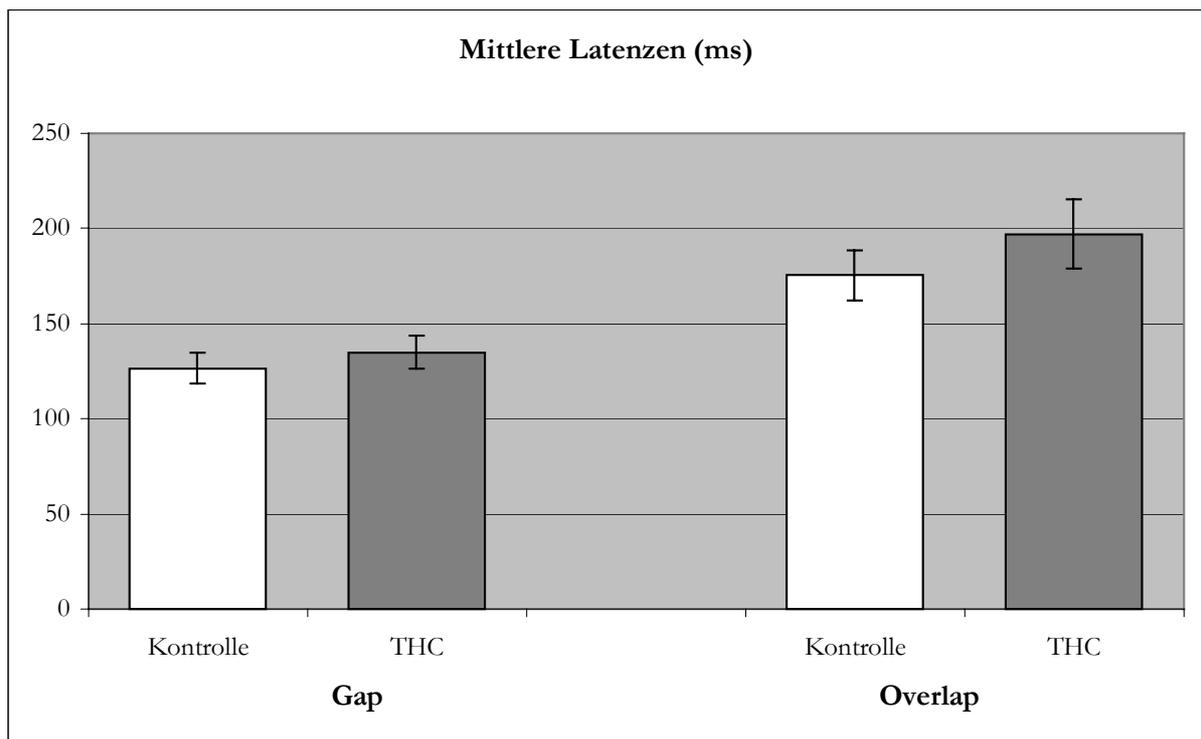


Abbildung 3.4: Mittlere Latenzen der Prosakkaden für die Kontroll- und THC-Gruppe in den Gap- und Overlap-Bedingungen. Der Overall-Gruppeneffekt ist signifikant (vgl. Text).

Eine nähere Betrachtung der Mittelwerte der Standardabweichungen der Latenz pro Proband zeigt, dass die THC-Gruppe signifikant höhere Streuungen der Latenz in der Gap-Bedingung aufweist (43,33 gegenüber 33,92 in der Kontrollgruppe, $t(38) = 2,20$; $p < 0,05$). Dieser Unterschied besteht zahlenmäßig auch in der Overlap-Bedingung, ist dort aber nicht signifikant (66,45 gegenüber 47,88 in der Kontrollgruppe, $t(38) = 1,84$; $p > 0,05$).

Bei der Auswertung der Sakkadenamplitude als räumlichem Parameter wurden die Daten für Overlap- und Gap-Bedingungen gepoolt, da es keine theoretischen Gründe für einen diesbezüglichen Bedingungsunterschied gibt (vgl. Kapitel 3.1). Die mittlere Sakkadenamplitude zu dem 6° Schwinkel entfernten Zielreiz betrug in der THC-Gruppe 5,81° und in der Kontrollgruppe 5,73°. Dieser Unterschied ist nicht signifikant ($t(38) = 1,16$, $p > 0,05$), so dass Hypothese 2 nicht bestätigt wird. Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht über die bisher referierten Werte.

weitere Parameter

Der Anteil von besonders kurzen Sakkaden, deren Latenz zu kurz ist, um als sinnvolle Reaktionen auf die erscheinenden Reize gewertet zu werden (*Antizipationen*), unterschied sich nicht zwischen den Gruppen: Der Anteil sakkadischer Latenzen unter 70 ms betrug in der THC-Gruppe durchschnittlich 3,96% gegenüber 4,66% in der Kontrollgruppe ($t(38) = 0,71, p > 0,05$). Die Wahrscheinlichkeit, bei Latenzen unter 80 ms eine Bewegung in die richtige Richtung zu machen lag auf Zufallsniveau. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Betrachtung von *Expresssakkaden*, die üblicherweise als Sakkaden mit einer Latenz zwischen 80 und 120 ms definiert werden (vgl. z.B. Fischer, 1999). Zunächst ist deutlich, dass erst in der Gap-Bedingung ein bedeutsamer Anteil von Expresssakkaden auftritt. Darüber hinaus zeigt sich, dass in der THC-Gruppe der Anteil an Expresssakkaden niedriger ist als bei den Kontrollprobanden, wenn auch statistisch nicht signifikant. Dieses Ergebnis ist kompatibel mit der signifikant verkürzten Reaktionsdauer in der Kontrollgruppe (s.o.).

Auch eine Analyse der *Fixationsstabilität* zeigte keine signifikanten Unterschiede. Die Differenz zwischen den Positionen am Anfang und am Ende einer Fixation betrug in der THC-Gruppe durchschnittlich $0,054^\circ$ gegenüber $0,058^\circ$ in der Kontrollgruppe ($t(38) = 0,85, p > 0,05$). Da bezüglich der Sakkadenamplituden kein Unterschied zwischen den Gruppen nachgewiesen werden konnte (s.o.), lassen sich die mittleren *Sakkadengeschwindigkeiten* direkt miteinander vergleichen. Die mittlere Maximalgeschwindigkeiten betragen $351 (54) ^\circ/s$ in der Kontrollgruppe und $341 (64) ^\circ/s$ in der THC-Gruppe und unterschieden sich nicht signifikant ($t = 0,52; p > 0,05$).

Um ein Maß für einen möglichen *time on task-Effekt* über die Aufgabe zu gewinnen, wurden die mittleren Latenzen in den letzten 40 von den mittleren Latenzen der ersten 40 von insgesamt 120 Durchgängen pro Proband abgezogen. Die Latenzdifferenzen wurden für die Gap- und Overlap-Bedingungen separat analysiert. In den Overlap-Durchgängen nahm die Reaktionszeit in beiden Gruppen um etwa 5 ms ab (THC-Gruppe: 5,43 ms; Kontrollgruppe: 4,37 ms; $t(38) = -0,17, p > 0,05$), in der Gap-Bedingung nahm die Reaktionszeit in der THC-Gruppe um 2,50 ms ab, in der Kontrollgruppe jedoch um 4,42 ms zu ($t(38) = -1,40, p > 0,05$). Keiner der Unterschiede in den time-on-task-Maßen ist signifikant.

Ein weiterer interessanter Befund unabhängig vom Gruppenvergleich ist ein Vergleich der *Sakkadenrichtungen*. Während sich in der Gap-Bedingung kein Richtungseffekt auf die Latenz

einstellt ($M = 136$ ms; $s = 19$), sind in der Overlapbedingung die nach rechts gerichteten Sakkaden signifikant schneller ($180,5$ ms ($s = 36$)) als die nach links gerichteten Sakkaden ($194,8$ ms ($s = 34$); $t(39) = 3,23$; $p < 0,01$). Außerdem sind auch die Sakkadenamplituden nach rechts signifikant kürzer ($5,63^\circ$ ($s = 0,3$) gegenüber $5,86^\circ$ ($s = 0,3$) in der Gap-Bedingung; $t(39) = 7,72$, $p < 0,01$ sowie $5,76^\circ$ ($s = 0,2$) gegenüber $5,95^\circ$ ($s = 0,2$) in der Overlap-Bedingung; $t(39) = 5,52$; $p < 0,01$). Die genannten Parameter sind in Tabelle 3.3 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Weitere Ergebnisse zur Prosakkaden-Aufgabe. Zur detaillierten Beschreibung der einzelnen Parameter siehe Text. Standardabweichungen sind in Klammern angegeben. Keiner der angegebenen t-Werte ist signifikant ($p > 0,05$).

Bedingung / Parameter		Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38)
Gap	mittlerer Gapeffekt (ms)	49 (17)	62 (26)	1,91
	Anteil Express- sakkaden (< 120 ms) (%)	41,5 (25,6)	33,38 (20,21)	0,7
	<i>time on task</i> -Effekt (ms)	2,50 (13,02)	-4,42 (17,91)	1,40
Overlap	Anteil Express- sakkaden (< 120 ms) (%)	8,64 (9,77)	7,49 (10,43)	0,7
	<i>time on task</i> -Effekt (ms)	4,37 (16,83)	5,43 (22,07)	0,17
Fixationsstabilität ($^\circ$)		0,058 (0,013)	0,054 (0,015)	0,85
Anteil Antizipationen (Sakkaden < 80 ms) (%)		4,66 (3,22)	3,96 (3,05)	0,71

3.5 Prosakkaden: Diskussion

In diesem Experiment wurden die Eigenschaften einfacher, reflexiver Prosakkaden der THC-Gruppe mit der Kontrollgruppe verglichen. Aufgrund der Ergebnisse in der visuellen Suchaufgabe wurde ein Unterschied in räumlichen und zeitlichen Parametern erwartet. Bezüglich der Sakkadenamplitude konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis kann so interpretiert werden, dass die räumliche Steuerung der Blickbewegungen in Bezug auf visuell geführte Sakkaden nicht vom Langzeitkonsum von THC beeinträchtigt wird. Auch die Stabilität der Fixation scheint nicht betroffen zu sein.

Ein anderes Bild zeigt sich bei der Betrachtung der zeitlichen Parameter. Die THC-Gruppe war signifikant langsamer in ihren Reaktionszeiten. In der Overlap-Bedingung zeigte sich eine Verlangsamung der sakkadischen Reaktionszeit von über 20 ms. In der Gap-Bedingung ist zwar ebenfalls ein in die selbe Richtung weisender Unterschied von über 8 ms zu diagnostizieren, doch ist dieser Unterschied deutlich geringer. Dies kann vor allem dadurch begründet sein, dass die Reaktionszeiten in der Gap-Bedingung generell so kurz ausfallen, dass aufgrund eines Bodeneffektes die Kontrollgruppe nicht mehr viel schneller reagieren kann. Diese Interpretation wird unterstützt durch die Tatsache, dass bezüglich der intraindividuellen Streuung eine signifikant höhere Varianz in der THC-Gruppe zu verzeichnen ist. Das deutet darauf hin, dass trotz nicht signifikanter absoluter Unterschiede in der THC-Gruppe größere Schwierigkeiten bei dieser Aufgabe zu bestehen scheinen. Die Ergebnisse aus dem nachfolgenden Experiment (Antisakkaden, vgl. Kapitel 4) werden diese Vermutungen weiter unterstützen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass mittels dieser Aufgabe ein grundlegendes Defizit in der zeitlichen Steuerung der Blickbewegungen nachgewiesen wurde, durch das zumindest ein Teil der erhöhten Reaktionszeiten in der visuellen Suchaufgabe erklärt werden kann. Physiologische Substrate der zeitlichen Steuerung der Blickbewegungen bei visuell geführten zielgerichteten Sakkaden sind vor allem die Colliculi superiores und andere damit direkt verbundene Nuclei (vgl. Munoz, 2002). Diese Zentren erhalten ihren Input wiederum vom posterioren Parietalcortex (PPC). In einer Untersuchung von Heide & Kömpf (1998) konnten bei einer entsprechenden Läsion erhöhte Reaktionszeiten in visuell geführten Sakkadenaufgaben nachgewiesen werden (s. Kapitel 3.1). Möglicherweise treten in diesen Regionen langfristig subtile Schädigungen des zentralen Nervensystems durch dauerhaften Konsum von THC auf, die als Folge die beobachteten Defizite haben. Diese Interpretation wird gestützt durch die Tatsache, dass in jenen Regionen eine Verteilung von Cannabinoid-Rezeptoren nachgewiesen wurde (vgl. Kapitel 1.1), auch wenn in den spezifisch okulomotorischen Zentren dieser Areale keine auffällig hohe Rezeptorkonzentration zu finden ist¹⁰.

Die Untersuchungen zu möglichen *time on task*-Effekten brachten keine signifikanten Ergebnisse zutage, was allerdings auch an der Kürze der Aufgabe liegen kann. So könnte einer möglichen Ermüdung auch ein Trainingseffekt entgegenwirken, was sich z.B. in der leichten Reaktionszeitbeschleunigung in der Gap-Bedingung für die THC-Gruppe niedergeschlagen haben könnte. Aufgrund der hohen Streuungen, die auf die geringe Anzahl von Beobachtungen zurückzuführen ist, sollte man bei der Interpretation dieses Parameters generell vorsichtig sein

¹⁰ Für weitere neurophysiologische Implikationen vgl. Kapitel 9.

(vgl. Tabelle 3.3). Bei einer einfachen Aufgabe wie dieser ist innerhalb von 15 Minuten offensichtlich kein *time on task*-Effekt zu erwarten.

Die ähnlichen Werte für die Sakkadengeschwindigkeiten bestätigen die Ergebnisse aus der visuellen Suche (Kapitel 2), wo keine Beeinträchtigung des Verhältnisses von Sakkadenamplitude und -geschwindigkeit in der THC-Gruppe gezeigt werden konnten. Die basalen Mechanismen zur Steuerung der optimalen Effizienz einer Sakkade scheinen damit intakt zu sein. Auch bezüglich des Ausmaßes des Gap-Effektes sind keine Unterschiede zwischen den Gruppen nachweisbar. Dieser Befund deutet darauf hin, dass sowohl die attentionale Verarbeitung von Warnreizen als auch die basalen Verarbeitungsmechanismen auf der Ebene des Fixationszentrums von langjährigem THC-Konsum nicht beeinträchtigt werden. Physiologische Substrate, deren Aktivität durch die Gap-Bedingung moduliert werden, sind v.a. die Colliculi Superiores (Tinsley & Everling, 2002; für einen Überblick vgl. Munoz, 2002).

Insgesamt kann aus dieser Aufgabe der Schluss gezogen werden, dass die räumliche Informationsverarbeitung und okulomotorische Kontrolle visuell geführter Sakkaden intakt ist. Demgegenüber zeigen sich Defizite in der zeitlichen Informationsverarbeitung zur Sakkadengenerierung, die sich in einer verzögerten Latenz äußern. Da in dieser Aufgabe die Reaktion unmittelbar als Folge der Reizverarbeitung erfolgt, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Verzögerung durch späte (rein-motorische) oder bereits durch frühere Informationsverarbeitungsprozesse zustande kommt. Hierüber wird erst eine Aufgabe näher Auskunft geben können, die eine verzögerte Reaktion beinhaltet. Eine solche Aufgabe wird in Kapitel 5 (*memory guided*-Sakkaden) vorgestellt.

4. Experiment 3: Das Antisakkaden-Paradigma: mentale Transformation und Inhibition

Im zuvor dargestellten Experiment wurde untersucht, inwieweit bei einfachen, visuell geführten und reflexiven Prosakkaden Auffälligkeiten in der Blicksteuerung zu verzeichnen sind. Dabei wurde auf Seiten der abhängigen Variablen unterschieden zwischen zeitlichen und räumlichen Parametern. Im Sinne des Modells zur Blickbewegungssteuerung von Findlay & Walker (1999; vgl. Kapitel 3.1) ging es damit um die Analyse der Stufe der automatischen Verarbeitungsebene. Im Gegensatz dazu wird in der Antisakkaden-Aufgabe verlangt, eine reflexive Bewegung zu einem dargebotenen Zielreiz zu unterdrücken und stattdessen eine willentliche Sakkade in die entgegengesetzte Richtung in etwa derselben Länge zu initiieren. Dies entspricht im Modell von Findlay & Walker der obersten Ebene der willentlich ausgeführten Sakkaden. Ganz im Sinne dieses Modells soll auch hier zwischen zeitlichen und räumlichen Parametern unterschieden werden, um die Informationsverarbeitung im When- und im Where-System zu untersuchen. Zunächst wird ein Überblick über den theoretischen Forschungsstand zur Antisakkaden-Aufgabe gegeben.

4.1 Antisakkaden: Theorie und Forschungsstand

Allgemein wird bei der Antisakkadenaufgabe ein Proband aufgefordert, eine Sakkade in die entgegengesetzte Richtung zu einem auftauchenden Reiz zu machen. Sie wurde 1978 von Hallett zum ersten Mal vorgestellt (Hallett, 1978). Besonders in letzter Zeit hat die Bedeutung der Untersuchung von Antisakkaden deutlich zugenommen, was sich in einer wachsenden Zahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema niederschlägt.

In dieser Aufgabe besteht für den Ausführenden ein Konflikt zwischen einer reflexiven Bewegung zum aufleuchtenden Reiz und der willentlichen Bewegung in die entgegengesetzte Richtung. Damit werden mindestens zwei separate Prozesse gefordert, ein Unterdrückungsprozess zur Verhinderung der dominanten Reaktion und ein Prozess zur Initiierung der geforderten Sakkade¹. Obgleich die Aufgabe von den Probanden in der Regel verstanden wird, fällt die Beachtung der Instruktion nicht immer leicht. Daher kommt es gelegentlich zu sogenannten fehlerhaften Prosakkaden. Der Anteil fehlerhafter Prosakkaden hängt dabei von Charakteristika der Aufgabe ab und wird durch Übung nicht moduliert (Everling & Fischer, 1998). Fast alle dieser fehlerhaften Sakkaden werden mit einer nachfolgenden Sakkade

¹ Die Begriffe „Inhibition“ und „Unterdrückungsprozess“ werden an dieser Stelle in einem abstrakten Sinn gebraucht ohne Aussagen darüber treffen zu wollen, ob diesem Prozess eine aktive endogene Unterdrückung oder z.B. ein eher passives Gewinnen eines Wettlaufs mit alternativen Sakkadenprogrammen unterliegt.

korrigiert (Mokler & Fischer, 1999). Als eine mögliche Erklärung hierfür wurde vorgeschlagen, dass sich ein aktiver zentraler Inhibitionsprozess, der auf das Fixationszentrum wirkt, nicht gegen die unwillkürliche exogene Reflexbewegung durchsetzen kann (Everling et al., 1998, 2000; vgl. auch Kapitel 3.1).

Als Erklärung für die zugrundeliegenden Prozesse bei dieser Aufgabe wurden bislang verschiedene Vorschläge gemacht. Hallett selbst (1978; Hallett & Adams, 1980) interpretierte diese Aufgabe als analog zu einer speziellen Variante der double step-Aufgabe (Becker & Jürgens, 1979; vgl. Kapitel 6). Dort werden in der Variante „pulse over return“ Zielreize präsentiert, die zunächst in einer Richtung relativ zum Fixationspunkt aufleuchten und dann nach einem kurzen Interstimulusintervall (ISI) über den Fixationspunkt hinweg in die entgegengesetzte Richtung springen. In Übertragung auf die Antisakkadenanforderung bedeutet dies, dass zunächst eine reflexive Sakkade programmiert wird, die jedoch gestoppt werden kann, wenn vor der Beendigung ihrer Programmierung ein zweites Programm zur Auslösung der endogenen Sakkade startet. Diese Erklärung ist jedoch eine post hoc Übertragung der Interpretation von double step-Experimenten auf die Antisakkadenaufgabe, ohne dass direkt ein empirischer Nachweis der Übertragbarkeit geleistet wurde. Dies liegt vor allem daran, dass anders als bei der double step-Aufgabe das ISI nicht direkt variierbar ist.

Eine eher physiologische Erklärung lieferten Schlag-Rey et al. (1997). Sie vermuteten, dass bei Antisakkaden zwei parallele Sakkadenprogramme initiiert werden, bei denen jeweils das mit stärkerer neuronaler Aktivität gewinnt. Demgegenüber legten Experimente von Everling et al. (1998; 1999) sowie von Everling & Munoz (2000) mit aus Pro- und Antisakkaden gemischten Blöcken nahe, dass noch während der Instrukionsphase bei Antisakkaden die Aktivität der Fixationsneurone in den Colliculi superiores steigt, was inhibitorische Prozesse noch vor der Reizdarbietung reflektieren könnte.

Neuere Untersuchungen vor dem Hintergrund von Modellen zur exekutiven Kontrolle (vgl. Kluwe, 1997) legen nahe, dass die Probleme der Konfliktlösung bei der Handlungskontrolle nicht durch das Eingreifen einer zentralen Steuerungsinstanz, sondern eher indirekt durch die parallele Generierung und Aktivierung alternativer Handlungsprogramme gelöst werden. Vor diesem Hintergrund scheint bei den Antisakkaden die Verhinderung der reflexhaften Reaktion nicht auf der Inhibition der reflexhaften Sakkade vor der Reizdarbietung, sondern auf der Rechtzeitigkeit und Geschwindigkeit der Programmierung einer alternativen Sakkade zu beruhen (Massen, 2002).

Die resultierende Sakkade ist nach diesem Verständnis der Sieger des Wettlaufs zwischen exo- und endogen ausgelöster Sakkade.

Bei korrekten Antisakkaden wird, wie bereits erwähnt, kein sichtbares Ziel angesteuert. Daher werden sie nicht direkt durch die Aktivität der Neurone in dem primären visuellen Cortex, den Colliculi Superiores oder dem Hirnstamm unterstützt. Aus diesem Grund ist es nicht erstaunlich, dass Antisakkaden in ihrer Größe und Geschwindigkeit inter- und intraindividuell sehr variabel sind (Fischer, 1999; Hallett & Adams, 1980). Die Kontrolle willentlicher Sakkaden (z.B. auch memory-guided-Sakkaden) im Allgemeinen wird vor allem im Bereich der frontalen Augenfelder angenommen (Gaymard et al., 1998, 1999; vgl. auch Kapitel 3.1), während der dorsolaterale Präfrontalkortex direkt an der Unterdrückung reflexiver Sakkaden beteiligt zu sein scheint (Guitton et al., 1985; Pierrot-Deseilligny et al., 1991).

Generell sind die Latenzen bei Antisakkaden, wie auch bei anderen exogenen Sakkaden (z.B. Henik et al., 1994), um mindestens 30 ms höher als bei Prosakkaden. Psychologisch lässt sich hierfür der höhere Verarbeitungsaufwand verantwortlich machen, da mehr Informationsverarbeitungsprozesse für die erfolgreiche Ausführung verantwortlich sind (s.o.). Hierbei ist vor allem die notwendige interne Transformationsleistung und die vorübergehende Speicherung der Zielkoordinaten für die Sakkade zu erwähnen. Als physiologische Gründe lassen sich die bereits erwähnte fehlende Aktivierung der visuellen Cortices sowie zumindest teilweise der anatomisch längere Verarbeitungsweg für Antisakkaden verantwortlich machen, der aufgrund der zugrundeliegenden Transformationsleistung zumindest einen Informationsaustausch zwischen den Hemisphären erfordert (Fischer, 1999).

Die bereits angesprochenen fehlerhaften Prosakkaden in dieser Aufgabe unterscheiden sich in ihrer Metrik nicht von normalen Prosakkaden, z.B. weisen sie die charakteristischen Merkmale der main sequence (vgl. Kapitel 2.3.2) auf. Auch die Latenzen sind vergleichbar mit normalen Prosakkaden. Ein einfaches Maß für die Inhibitionsleistung in der Antisakkadenaufgabe ist der Anteil auftretender fehlerhafter Prosakkaden an allen absolvierten Sakkaden. Dieser Parameter ist in der klinischen Forschung im Bereich der Schizophrenie (z.B. Fukushima et al., 1988; Sereno & Holzman, 1995), bei Patienten mit ADHD (z.B. Mostofsky et al., 2001), bei Zwangsstörungen (Tien et al., 1992) sowie bei Alzheimererkrankungen (Fletcher & Sharpe, 1986) erfolgreich untersucht worden als Maß für die Funktionsfähigkeit des präfrontalen Cortex, insbesondere dessen Inhibitions- und willentliche motorische Kontrollleistung. Eine Beeinträchtigung der Latenzen sowie ein erhöhter Anteil fehlerhafter Prosakkaden bei Patienten mit frontalen

gegenüber temporalen Läsionen wurde bereits 1985 von Guitton et al. berichtet. Neben dem Anteil an fehlerhaften Prosakkaden lässt sich bei ausreichend hoher Stichprobe auch das Korrekturverhalten auswerten, wobei als Korrekturzeit die Zeit zwischen dem Ende der ersten Sakkade und dem Beginn der darauffolgenden Korrektursakkade zum intendierten Ziel gilt (für einen Überblick vgl. auch Everling & Fischer, 1998).

Wie bei den Prosakkaden kann auch in der Antisakkadenbedingung ein Gap-Effekt gefunden werden, der ebenso bei einem Intervall von 200 ms maximal ist (Fischer & Weber, 1997). Dabei ist dieser Effekt etwas kleiner als bei Prosakkaden (Reuter-Lorenz et al., 1995) und beträgt gewöhnlich etwa 20-40 ms. Darüberhinaus treten in der Gap-Bedingung mehr fehlerhafte Prosakkaden auf als in der Overlap-Bedingung (Reuter-Lorenz et al., 1991; Forbes & Klein, 1996). Die Größe des Stimulus hat keinen signifikanten Effekt auf die abhängigen Variablen (Roberts et al., 1994; Fischer & Weber, 1997). Ein Anstieg der Stimulusexzentrizität von 1°-12° führt wie bei Prosakkaden zu einer kürzeren Latenz, aber auch zu einem Anstieg der Richtungsfehler (Fischer & Weber, 1997).

Aufgrund der Befunde in der visuellen Suchaufgabe, bei der längere Reaktionszeiten und verlängerte Sakkadenamplituden in der THC-Gruppe gefunden werden konnten (vgl. Kapitel 2), wurden die folgenden zentralen Ergebnisse erwartet:

H1: Probanden der THC-Gruppe weisen im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant verlängerte Latenzen in dieser Aufgabe auf.

H2: Probanden der THC-Gruppe weisen im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant verlängerte Sakkadenamplituden in dieser Aufgabe auf.

Außerdem werden über die abhängigen Variablen, die bereits in der Prosakkadenaufgabe (Kapitel 3) untersucht wurden, hinaus auch die Anzahl fehlerhafter Prosakkaden geprüft, und zwar als Maß für die Fähigkeit zur Unterdrückung reflexiver Sakkaden.

4.2 Methode

Der visuelle Input in der Antisakkadenaufgabe und die Messapparatur ist identisch mit der Prosakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3.3). Die Aufgaben unterscheiden sich im Interesse einer

maximalen Vergleichbarkeit ausschließlich hinsichtlich der Instruktion², in der die Probanden hier aufgefordert werden, so schnell wie möglich in die entgegengesetzte Richtung des Zielreizes zu blicken, und zwar in ungefähr demselben Abstand, wie der Zielreiz vom zentralen Fixationskreuz entfernt ist (s. Abbildung 4.1). Wie auch in der Prosakkaden-Aufgabe wechseln in unregelmäßiger Reihenfolge 60 Gap- und 60 Overlap-Durchgänge. Da diese Aufgabe den Probanden anfangs nicht leicht fällt, wird sie in einem Übungsblock mit 30 Durchgängen trainiert. Es nahmen dieselben 40 Probanden wie in den zuvor berichteten Experimenten teil (vgl. Kapitel 2.2.1).

Antisakkaden-Paradigma (Overlap):

Screenshots und korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)

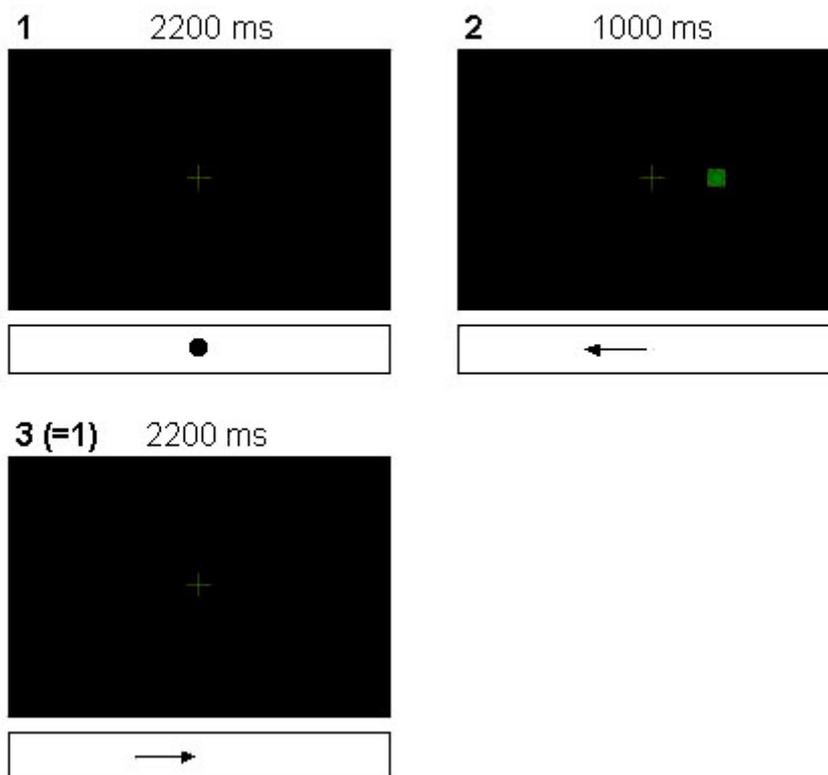


Abbildung 4.1: Antisakkaden-Paradigma: Ablauf eines Overlap-Durchgangs mit links bzw. rechts erscheinendem Zielreiz. Die Reize der Screenshots sind verhältnismäßig größer als im Original. Angegeben sind jeweils die Darbietungszeiten (oben) sowie die instruierten Blickbewegungen (darunter). Ein Gap-Durchgang verläuft analog zu Abbildung 3.3.

² Für den Wortlaut der Instruktion vgl. Anhang A.

4.3 Ergebnisse

Generell wurden dieselben Kriterien zur Ermittlung der auszuwertenden Sakkaden angelegt wie bei der Analyse der Prosakkaden (siehe Kapitel 3.4).

Latenzen und Amplituden

Bezüglich der *Latenzen* ist zwischen den Gap- und den Overlap-Durchgängen zu unterscheiden³. Der Effekt „Bedingung“ (Gap vs. Overlap) ist signifikant ($F(1,38) = 205,39$; $p < 0,01$), d.h. die Latenzen in den Gap-Durchgängen sind erwartungsgemäß kürzer als in den Overlap-Durchgängen. Auch der Haupteffekt zwischen den Gruppen ist signifikant ($F(1,38) = 5,01$; $p < 0,05$). Die THC-Gruppe reagiert langsamer auf den Zielreiz als die Kontrollgruppe, womit Hypothese 1 bestätigt wird (vgl. Abbildung 4.2). Die Interaktion von „Bedingung“ und Gruppe ist nicht signifikant ($F(1,38) = 0,42$; $p > 0,05$), d.h. der Gap-Effekt unterscheidet sich nicht zwischen den Gruppen. Betrachtet man nur die *Gap-Bedingung*, so ist in der THC-Gruppe eine mittlere Latenz von 224 ms gegenüber 196 ms in der Kontrollgruppe zu verzeichnen. Der Unterschied zwischen den Gruppen ist in die hypothesenkonforme Richtung als einfacher Haupteffekt (EHE) signifikant ($t(38) = 2,20$, $p < 0,05$). In der *Overlap-Bedingung* beträgt die mittlere Latenz der THC-Gruppe 299 ms gegenüber 265 ms in der Kontrollgruppe. Der Unterschied zwischen den Gruppen ist ebenfalls als EHE in hypothesenkonformer Richtung signifikant ($t(38) = 2,06$, $p < 0,05$).

Eine nähere Betrachtung der Gruppenunterschiede bezüglich der mittleren intraindividuellen Standardabweichung der Latenzen zeigt keine signifikanten Unterschiede in der Gap-Bedingung (60,25 in der THC-Gruppe gegenüber 79,79 in der Kontrollgruppe, $t(38) = 1,95$, $p > 0,05$). Auch in der Overlap-Bedingung ist kein signifikanter Unterschied zu verzeichnen (91,46 in der THC-Gruppe gegenüber 71,47 in der Kontrollgruppe, $t(38) = 1,38$, $p > 0,05$; siehe Tabelle 4.1).

³ Zur möglichst ökonomischen Überprüfung der Hypothesen sowie möglicher Gruppenunterschiede im Gap-Effekt (Interaktion) wurde trotz der gerichteten Hypothesen zunächst ein globaler F-Test und daraufhin zusätzlich adjustierte Einzelkontraste berechnet.

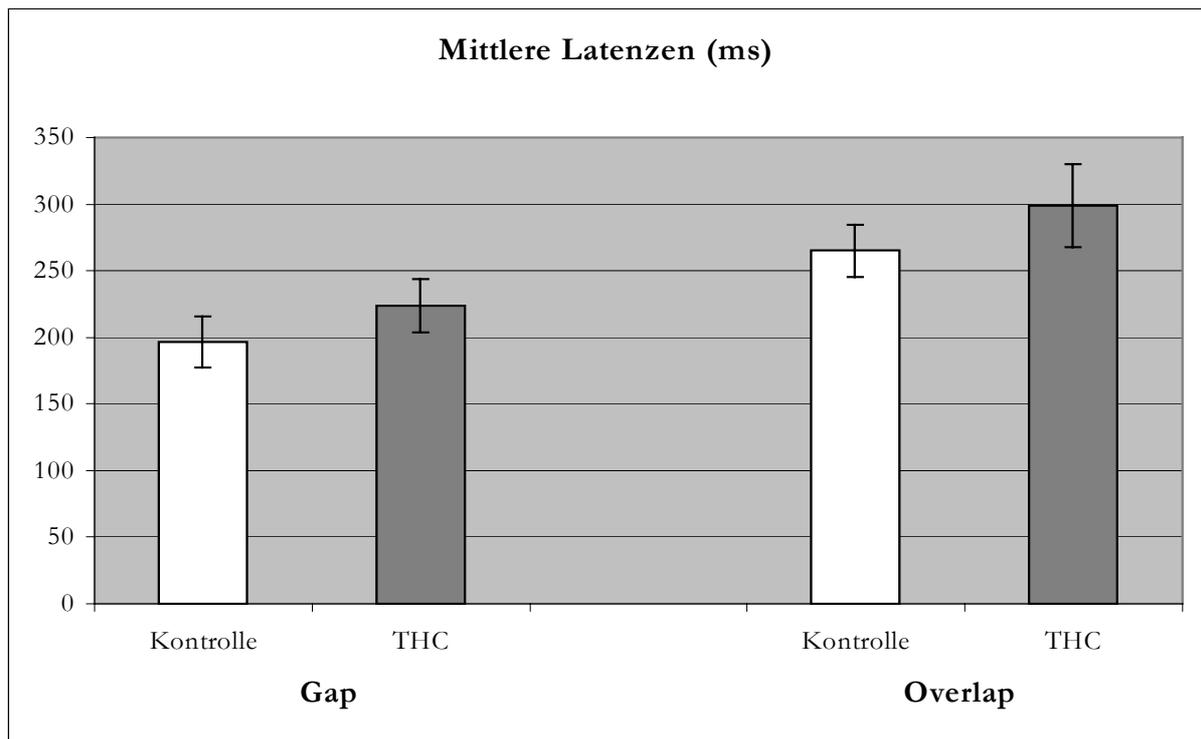


Abbildung 4.2: Mittlere Latenzen der Antisakkaden für die Kontroll- und THC-Gruppe in den Gap- und Overlap-Bedingungen. Die Gruppenunterschiede sind signifikant.

Tabelle 4.1: Übersicht über Latenzen, mittlere intraindividuelle Streuungen der Latenzen und der mittleren Amplitude in der Antisakkadenaufgabe für Gap- und Overlap-Durchgänge. Die Werte der Amplituden wurden über Gap- und Overlap-Durchgänge gepoolt (vgl. Text). Standardabweichungen sind in Klammern angegeben. Signifikante t-Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ markiert. Zur Berechnung der t-Werte der mittleren intraindividuellen Streuungen wurden quadrierte Werte verwendet (Varianzen).

Parameter	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38) ⁴
Gap	mittlere Latenz (ms)	196,43 (38,27)	2,20*
	mittlere Latenz – SD pro Pbn (ms)	60,25 (21,03)	1,95
Overlap	mittlere Latenz (ms)	265,21 (39,00)	2,06*
	mittlere Latenz – SD pro Pbn (ms)	71,47 (35,68)	1,38
mittlere Amplitude (°)	4,99 (0,65)	5,50 (0,66)	2,49*

⁴ T-Werte sind in den Gap- und Overlap-Bedingungen für die einfachen Haupteffekte (EHE) angegeben. Die Signifikanzbeurteilung basiert auf der Bonferroni-Adjustierung. Für die F-Werte der Varianzanalyse siehe Text.

Da wie bei der Prosakkadenaufgabe keine theoretischen Gründe für eine getrennte Analyse der Gap- und Overlap-Bedingung bezüglich der Sakkadenamplitude sprechen, sei an dieser Stelle die gepoolte Analyse berichtet. Die mittlere Sakkadenamplitude in entgegengesetzter Richtung zu dem 6° Schwinkel entfernten Zielreiz betrug in der THC-Gruppe 5,50° und in der Kontrollgruppe 4,99° (vgl. Abbildung 4.3). Dieser Unterschied weist in hypothesenkonformer Richtung und ist signifikant ($t(38) = 2,49, p < 0,05$).

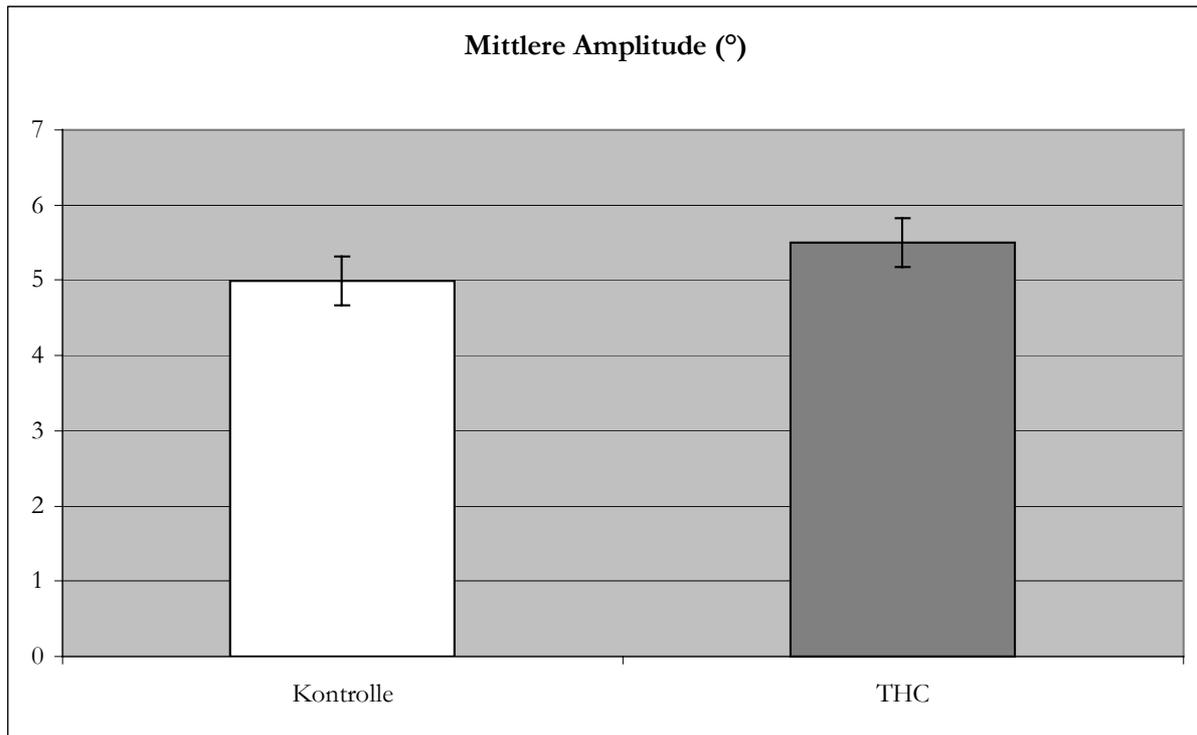


Abbildung 4.3: Signifikante Unterschiede bzgl. der mittleren Amplitude zwischen den Gruppen in der Antisakkadenaufgabe.

weitere Ergebnisse

In einer Analyse der mittleren *Anzahl fehlerhafter Prosakkaden* konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen nachgewiesen werden. In der Gap-Bedingung betrug der Anteil fehlerhafter Prosakkaden in beiden Gruppen etwa ein Viertel aller Sakkaden, während in der Overlap-Bedingung etwa 10% der Sakkaden in die falsche Richtung gelenkt wurden.

Der Gap-Effekt für die korrekten Antisakkaden unterschied sich ebenso wenig zwischen den Gruppen wie im Prosakkadenexperiment. Mit 69 ms (Kontrollgruppe) bzw. 75 ms (THC-

Gruppe) liegt dieser Wert im Mittel (72,05 ms) allerdings signifikant höher als der Gap-Effekt bei den Prosakkaden (im Mittel 55,55 ms; $t(39) = 3,63$, $p < 0,05$).

Eine Analyse der *time on task* in Anlehnung an das Vorgehen in der Prosakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3.4) ergab ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. In der Gap-Bedingung wurde die Kontrollgruppe nominell im Mittel um 5 ms langsamer, während die THC-Gruppe um 6 ms schneller wurde. Ein umgekehrtes Bild zeigt sich bei der Overlap-Bedingung, wo die Kontrollgruppe um 3 ms schneller, während die THC-Gruppe um 6 ms langsamer wurde. Zu beachten sind hierbei auch die hohen Standardabweichungen dieser Werte (vgl. Tabelle 4.2).

Die Unterschiede in der Latenz spiegeln sich in tendenziell höheren prozentualen Anteilen von *Expresssakkaden* in der Kontrollgruppe, die sich jedoch nicht signifikant unterscheiden (vgl. Tabelle 4.2). Auch eine Analyse der *Fixationsstabilität* zeigte wie bei den Prosakkaden (s. Kapitel 3) keine signifikanten Unterschiede. Die Differenz zwischen den Positionen am Anfang und am Ende einer Fixation betrug in der THC-Gruppe durchschnittlich $0,067^\circ$ gegenüber $0,075^\circ$ in der Kontrollgruppe ($t(38) = 1,45$; $p > 0,05$). Diese Werte liegen etwas über den Werten in der Prosakkadenaufgabe (s. Kapitel 3). Da die Sakkadenlänge in der THC-Gruppe größer war als in der Kontrollgruppe (s.o.), würde man eine leicht höhere mittlere Maximalgeschwindigkeit erwarten. Die mittlere Maximalgeschwindigkeiten betragen $305^\circ/s$ (58) in der Kontrollgruppe und $321^\circ/s$ (68) in der THC-Gruppe, was diese Erwartung bestätigt, doch erreicht dieser Unterschied keine statistische Signifikanz ($t = 0,80$; $p > 0,05$). Insgesamt liegen diese Werte unter dem Niveau der Werte für die Prosakkaden, was aufgrund der kürzeren Amplitude zu erwarten war.

Wie bei den Prosakkaden soll auch hier ein Vergleich der *Sakkadenrichtungen* über alle Probanden angestellt werden. Während sich in der Gap-Bedingung kein signifikanter Richtungseffekt auf die Latenz einstellt ($M = 234,6$ ms ($s = 46$) nach rechts gegenüber $239,5$ ms ($s = 50$) nach links), sind dennoch die nach *links* gerichteten Sakkaden tendenziell schneller. In der Overlap-Bedingung sind die nach *links* gerichteten Sakkaden signifikant schneller ($285,7$ ms ($s = 52$)) als die nach rechts gerichteten Sakkaden ($293,3$ ms ($s = 58$); $t = 2,22$; $p < 0,05$). Anders als bei den Prosakkaden finden sich allerdings bei den Antisakkaden keine Richtungseffekte auf die Sakkadenamplitude (Gap: links $5,38^\circ$ ($s = 0,9$), rechts $5,36^\circ$ ($s = 1,0$), Overlap: links $5,35^\circ$ ($s = 1,1$), rechts $5,16^\circ$ ($s = 1,0$)) (vgl. Tabelle 4.2)).

Tabelle 4.2: Weitere Ergebnisse zur Antisakkaden-Aufgabe. Zur detaillierten Beschreibung der einzelnen Parameter siehe Text. Standardabweichungen sind in Klammern angegeben. Keiner der angegebenen t-Werte ist signifikant ($p > 0,05$).

Bedingung / Parameter		Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38)
Gap	mittlerer Gapeffekt (ms)	69 (24)	75 (38)	0,65
	Fehlerhafte Prosakkaden (%)	25,30 (14,4)	24,11 (12,3)	0,28
	Anteil Express sakkaden (< 120 ms) (%)	13,9 (14,7)	8,7 (6,5)	1,11
	<i>time on task</i> -Effekt (ms)	4,87 (30,58)	-5,68 (34,18)	0,66
Overlap	Fehlerhafte Prosakkaden (%)	11,88 (14,2)	8,62 (5,8)	0,95
	Anteil Express sakkaden (< 120 ms) (%)	1,5 (2,8)	0,8 (1,5)	0,2
	<i>time on task</i> -Effekt (ms)	-2,94 (44,15)	5,70 (38,08)	1,03

4.4 Diskussion

Insgesamt hat die Antisakkadenaufgabe sehr interessante Ergebnisse hervorgebracht. Der bereits in der Prosakkadenaufgabe festgestellte Latenzeffekt konnte auch in dieser Aufgabe beobachtet werden. Die THC-Gruppe ist sowohl in der Gap- als auch in der Overlap-Bedingung signifikant um ca. 30 ms langsamer als die Kontrollgruppe. Damit wird Hypothese 1 bestätigt. Diese Beobachtung kann somit anteilig für die Reaktionszeitdifferenzen in der visuellen Suchaufgabe geltend gemacht werden. Eine Beeinträchtigung der THC-Gruppe bezüglich der zeitlichen Sakkadensteuerung ist offensichtlich ein über verschiedene Aufgaben hinweg robuster Befund.

Neben dieser Bestätigung des Defizits der zeitlichen Blickbewegungssteuerung ist in dieser Aufgabe allerdings noch ein zusätzlicher Effekt aufgetreten, nämlich eine Beeinträchtigung in der räumlichen Blickbewegungssteuerung. Die Sakkaden in dieser Aufgabe sind in der THC-Gruppe um durchschnittlich $0,5^\circ$ Sehwinkel signifikant verlängert, wodurch Hypothese 2 eindeutig bestätigt wird. Dieser Betrag entspricht interessanterweise etwa dem Wert, der in der visuellen Suchaufgabe gefunden werden konnte (vgl. Kapitel 2.3.1). Während jedoch in der visuellen Suchaufgabe die Länge jeder einzelnen Sakkade naturgemäß nicht näher durch eine Instruktion spezifiziert wird, ist in der hier verwendeten Antisakkadenaufgabe eine Sakkade mit einer genau

spezifizierten Distanz gefordert. Möglicherweise ist das hypermetrische Verhalten der THC-Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe in der visuellen Suchaufgabe kein Resultat einer bestimmten Suchstrategie, sondern der Ausdruck einer basalen Dysfunktion der metrischen Programmierung von nicht visuell geführten Sakkaden. In der Prosakkadenaufgabe konnte bereits gezeigt werden, dass visuell geführte Sakkaden zu sichtbaren Zielreizen der THC-Gruppe keine Mühe bereitet, so dass diese Dysfunktion kein allgemeines Problem der metrischen Sakkadenprogrammierung darzustellen scheint. Vielmehr scheint die interne Transformationsleistung der Zielkoordinaten einer Sakkade eine problematische Operation zu sein. Um diese Transformationsleistung zu vollbringen, ist zumindest für eine kurze Zeit der Einsatz des Arbeitsgedächtnisses für die Position des visuell dargebotenen Zielreizes vonnöten, aufgrund derer dann eine adäquate Änderung der Zielkoordinaten stattfinden kann. Dies entspricht zudem den theoretischen Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis aus der Konzeption von Baddeley (1986), in der das Arbeitsgedächtnis explizit als notwendige Instanz für mentale Transformationsvorgänge erwähnt wird. Die Vermutung eines Defizites im visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis als Ursache der schlechteren Leistung in der Parametrisierung von Antisakkaden kann allerdings nur durch eine direkte Applikation eines Experiments zum sakkadenbezogenen räumlichen Kurzzeitgedächtnis entschieden werden. Ein solches Experiment wird im nachfolgenden Kapitel 5 beschrieben.

Zusätzliche Evidenz für einen Zusammenhang zwischen dem Arbeitsgedächtnis und der Antisakkadenaufgabe liefert auch eine Untersuchung von Roberts et al. (1994). In dieser experimentellen dual-task-Untersuchung konnten positive Korrelationen zwischen der Belastung des Arbeitsgedächtnisses und der Latenzen bzw. Anzahl fehlerhafter Prosakkaden in der Antisakkadenaufgabe festgestellt werden. Auch wenn bezüglich der fehlerhaften Sakkaden kein Defizit in der THC-Gruppe nachweisbar war, ist deutlich, dass zur erfolgreichen Lösung der Aufgabe das Arbeitsgedächtnis vonnöten ist. Die Arbeitsgedächtnisaufgabe in der genannten Studie erforderte allerdings mentale Transformationen von Zahlen, aber keine visuell-räumliche Belastungen des Arbeitsgedächtnisses. Eine direkten Zusammenhang des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses mit der Leistung in der Antisakkaden- und memory-guided-Aufgabe konnten Walker et al. (1998) anhand einer Einzelfallstudie nachweisen. Sie fanden bei einem Patienten mit einer Läsion des Gyrus frontalis inferior und den damit einhergehenden schlechten Leistungen in visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnismaßen eine Rate fehlerhafter Prosakkaden von 100% in der Antisakkadenaufgabe sowie eine Rate von 58% fehlerhafter reizgerichteter Spontansakkaden in der memory-guided-Aufgabe. Leider wurde in keiner dieser beiden Studien die Sakkadenamplitude thematisiert, so dass ein direkter Zusammenhang von der räumlichen

Parametrisierung der Sakkaden in der Antisakkadenaufgabe und dem visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis nur vermutet werden kann. Dennoch bieten diese Studien deutliche Hinweise auf eine Beteiligung des Arbeitsgedächtnisses in der Antisakkadenaufgabe.

Ein Einwand bezüglich des postulierten räumlichen Defizites in der THC-Gruppe könnte lauten, dass in dieser Gruppe zwar längere Sakkaden gemacht werden als in der Kontrollgruppe, dass diese jedoch dem 6° entfernten Ziel näher kommen und sie damit letztlich sogar präziser sind als die Sakkaden der Kontrollgruppe. Diese Interpretation würde darauf hindeuten, dass der Konsum von Cannabis die Sakkadenparametrisierung sogar verbessert. Dieser Einwand wäre allein auf der Basis dieses Experimentes naheliegend, doch im Zusammenhang mit den Ergebnissen in der visuellen Suchaufgabe nicht aufrechtzuerhalten. In dieser Aufgabe hat sich schließlich ein Defizit in der Reaktionszeit ergeben, das zumindest teilweise mit einer sakkadischen Hypermetrie in Zusammenhang gebracht werden konnte (vgl. Kapitel 2). Damit erscheint es naheliegend, dass das sakkadische Verhalten in der THC-Gruppe keinen Vorteil, sondern einen Nachteil abbildet.

Eine Analyse der Anteile fehlerhafter Prosakkaden in diesem Experiment hat keine Gruppenunterschiede ergeben. Damit sind keine Defizite in der Inhibitionsleistung bei der THC-Gruppe im Gegensatz zu Befunden aus der Schizophrenie- und ADHD-Forschung nachweisbar (vgl. Kapitel 4.1). Diese Beobachtung zeigt darüber hinaus, dass die tatsächlich nachgewiesenen Unterschiede sehr selektiv sind. Eine allgemein schlechtere Leistung bezüglich einer Reihe von Parametern bei schwer zu bewältigenden Sakkadenaufgaben wäre eindeutig weniger informationshaltig, als die bisher beobachtete selektive Störung spezifischer Komponenten der Blickbewegungssteuerung.

Bezüglich der Höhe des Gap-Effektes sind keine Gruppenunterschiede festzustellen, was die Beobachtungen aus dem Prosakkaden-Experiment bestätigt. Auffällig ist jedoch, dass die mittlere Höhe des Gap-Effektes in der Antisakkadenaufgabe höher als in der Prosakkadenaufgabe ausfällt. Dies entspricht nicht den bisherigen Befunden von Reuter-Lorenz et al. (1995; s. auch Forbes & Klein, 1996), wo ein etwas geringerer Gap-Effekt in der Antisakkadenaufgabe gefunden wurde. Neuere Studien berichten allenfalls eine Vergleichbarkeit des Gap-Effektes bei reflexhaften und willentlichen Sakkaden (Craig et al., 1999). Im Einklang mit früheren Befunden

steht hingegen die Tatsache, dass der Anteil fehlerhafter Prosakkaden in der Gap-Bedingung gegenüber der Overlap-Bedingung erhöht ist (vgl. Tabelle 4.1)⁵.

Die Analyse der *time on task*-Effekte erbrachte trotz der von den Probanden berichteten höheren Schwierigkeit aufgrund der hohen Streuungen keine gegenüber dem Prosakkaden-Experiment weiterführenden Ergebnisse. Da nicht einmal ein globaler Effekt über alle Probanden nachweisbar war, sind auch keine Gruppenunterschiede zu verzeichnen.

Da in der Prosakkadenaufgabe die nach rechts gerichteten Sakkaden bezüglich der Latenz schneller waren als die nach links gerichteten Sakkaden, war zunächst davon auszugehen, dass diese Ergebnisse einen Einfluss motorischer Gewohnheiten darstellen, die durch das Lesen von links nach rechts konstituiert werden. Diese Erklärung wurde bereits von Abed (1991) vorgeschlagen. Dieselben Assymetrien wurden auch von mehreren unabhängigen Forschungsgruppen berichtet (Fischer & Weber, 1997, Fischer et al., 1997; Munoz et al., 1998; vgl. auch Bell et al., 2000). Das umgekehrte Ergebnismuster bei den Antisakkaden legt eine andere Erklärungsrichtung nahe: Entscheidend für den Reaktionsvorteil ist offensichtlich der Ort der Stimuluspräsentation, d.h. es besteht ein Reaktionsvorteil bei Stimuli auf der rechten Seite, unabhängig von der Reaktionsrichtung. Diese für die Grundlagenforschung interessante Befund müsste allerdings in neuen Experimenten genauer untersucht werden, um klare Schlussfolgerungen zu diesem Effekt ziehen zu können.

Insgesamt bleibt somit festzuhalten, dass die Beeinträchtigung der zeitlichen Sakkadensteuerung auch in der Antisakkadenaufgabe bestätigt werden konnte. Darüber hinaus zeigte sich bezüglich der räumlichen Steuerungsleistung in dieser Aufgabe eine Hypermetrie von nicht visuell geführten Sakkaden im Vergleich zur Kontrollgruppe. Diese Ergebnisse entsprechen dem Muster der Befunde von Ploner et al. (vgl. Kapitel 1.2.1), die Kurzzeiteffekte von Cannabis untersucht haben. Allerdings fand diese Arbeitsgruppe zusätzlich einen Anstieg fehlerhafter Prosakkaden, der hier nicht aufgetreten ist. Möglicherweise sind die fehlerhaften Sakkaden daher ein Ausdruck von willentlichen Inhibitionsleistungen, die nur unter akutem THC-Einfluss beeinträchtigt sind. Die Beeinträchtigung der räumlichen Steuerung ist möglicherweise auf ein Defizit des räumlichen Arbeitsgedächtnisses zurückzuführen⁶. Diese Interpretation soll direkt in dem im nächsten Kapitel beschriebenen Experiment zu gedächtnisgesteuerten Sakkaden überprüft werden.

⁵ Für eine ausführlichere Diskussion dieser Zusammenhänge sowie einer Interpretation im Rahmen des Modells von Findlay & Walker (1999) vgl. auch Massen (2002, S. 104f).

⁶ Für mögliche neurophysiologische Implikationen vgl. Kapitel 9.

5. Experiment 4: Das „Memory guided“-Sakkaden-Paradigma: Die Rolle des Gedächtnisses

Im zuvor dargestellten Antisakkaden-Experiment (Kapitel 4) wurden Sakkaden zu Positionen ausgeführt, die nicht visuell markiert sind. Aus diesem Grund wird auch von nicht-visuell geführten Sakkaden gesprochen. Diese Eigenschaft kommt ebenso den memory guided-Sakkaden¹ zu. Bei diesem Paradigma muss eine willentliche Sakkade zu einer Stelle ausgeführt werden, an der zum Zeitpunkt der Ausführung kein visuelles Reizmaterial zu sehen ist.

5.1 „Memory guided“-Sakkaden: Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

Neben den Antisakkaden ist das memory guided-Sakkaden-Experiment ein weiteres wichtiges Paradigma zur Untersuchung willentlicher Sakkadenausführung (Hikosaka & Wurtz, 1983; Funahashi et al., 1989, 1991; Fuster 1991; Pierrot-Deseilligny et al., 2002). In dieser Aufgabe wird der Proband aufgefordert, einen zentralen Fixationspunkt zu fixieren, während in der Peripherie kurz ein Stimulus präsentiert wird. Nach einem bestimmten Intervall, das von einigen hundert Millisekunden bis hin zu ca. 10 Sekunden dauern kann, soll eine Sakkade zu der vorher in der Peripherie markierten Stelle ausgeführt werden. Als Signal zur Auslösung der Sakkade dient gewöhnlich das Erlischen des zentralen Fixationspunktes (z.B. Brown et al., 2003).

Die Aufgabe erlaubt eine Dissoziation zwischen der sensorischen Verarbeitung eines peripheren Reizes und den mit der motorischen Vorbereitung einer Sakkade assoziierten Prozessen. Aus diesem Grund wurde sie häufig zur Untersuchung neuronaler Prozesse verwendet, vor allem auch bei nicht-humanen Primaten (z.B. Hikosaka & Wurtz, 1983; Barash et al., 1991). Darüber hinaus erlaubt diese Aufgabe die Analyse von kognitiven Prozessen in Bezug auf das Arbeitsgedächtnis in Abhängigkeit vom Behaltensintervall (Baddeley, 1986). Das Arbeitsgedächtnis ist für das Aufrechterhalten und Manipulieren von Information zuständig, die nicht mehr direkt als sensorisches Reizmuster verfügbar ist. Dieses Gedächtnis ist dabei zur Bewältigung alltäglicher motorischer Aufgaben hochrelevant (für Beispiele siehe Baddeley, 1983, 1986; Levy & Goldman-Rakic, 2000).

¹ Der Ausdruck „memory guided-Sakkaden“ hat sich in der einschlägigen Literatur auch in Deutschland zu einem stehenden Begriff entwickelt, weshalb ich in dieser Arbeit auf ihn und nicht auf den deutschen Terminus „gedächtnisgesteuerte Sakkaden“ zurückgreife. Inhaltlich besteht kein Unterschied zwischen den Redeweisen.

Um neurophysiologische Grundlagen des Arbeitsgedächtnisses bei dieser Sakkadenaufgabe zu untersuchen, wurden in letzter Zeit vermehrt bildgebende Verfahren eingesetzt. Hier wurden im Kontrast zu visuell geführten Sakkaden eine stärkere Beteiligung der parietalen, frontalen und supplementären Augenfelder berichtet (Anderson et al., 1994; Sweeny et al., 1996; Greenlee et al., 2001). Bezüglich der Rolle des präfrontalen Cortex sind die Befunde bislang widersprüchlich. In einer neueren Untersuchung von Brown et al. (2003) konnte durch ein Event-Related-Versuchsdesign zwischen Stimulus-, Behaltens- und Reaktionsprozessen unterschieden werden. Als Korrelate des Behaltensprozesses konnten vor allem Teile des frontalen Gyrus (rechts posterior inferior) sowie der frontalen (rechts medial) und supplementären (bilateral) Augenfelder bestätigt werden. In einer Untersuchung von Nyffeler et al. (2004) wurde bei Probanden während des memory delays mittels transkranieller Magnetstimulation (TMS) der dorsolaterale Präfrontalcortex stimuliert. Als Folge fanden sie eine signifikante Veränderung der Sakkadenamplitude, vor allem in einer Bedingung mit relativ kurzem memory delay von drei Sekunden.

Bezüglich des Einflusses von Drogen sind bisher vor allem Effekte von Alkohol auf das visuelle Kurzzeitgedächtnis bekannt. Wegner & Fahle (1999) wählten als neuropsychologisches Maß zur Untersuchung des Kurzzeitgedächtnisses die Benton-Aufgabe, bei der geometrische Muster kurzfristig gemerkt werden müssen, und als psychophysisches Maß die Behaltensleistung in einer Vernier-Diskriminationsaufgabe, bei der zwei gegeneinander versetzte Linien präsentiert werden. Dabei werden nach einem variablen Interstimulusintervall (ISI) erneut versetzte Linien gezeigt und der Proband muss entscheiden, welche der beiden Linienkonfigurationen stärker gegeneinander versetzt waren. Die Autoren fanden nur bezüglich der Vernier-Aufgabe eine durch Alkohol verursachte Beeinträchtigung der visuellen Behaltensleistung.

Für die Steuerung der Okulomotorik in alltäglichen Aufgaben ist ein intaktes visuell-räumliches Arbeitsgedächtnis unerlässlich (vgl. Kapitel 3.1), deshalb soll dessen Funktionstüchtigkeit im nachfolgend beschriebenen Experiment direkt untersucht werden. Da sich in der visuellen Suchaufgabe in der THC-Gruppe vermehrt Reinspektionen zu bereits betrachteten Reizen zeigten (vgl. Kapitel 2), liegt die Vermutung nahe, dass das für die visuelle Navigation relevante Arbeitsgedächtnis gestört sein könnte. Diese Annahme wird durch die Tatsache unterstützt, dass die in der Literatur konsistent berichtete neuropsychologische Beeinträchtigung durch akuten THC-Gebrauch vor allem auch das Gedächtnis betrifft (vgl. Kapitel 1.2). Auch die Ergebnisse aus der Antisakkadenaufgabe (s. Kapitel 4.4) legen eine mögliche Beeinträchtigung des räumlichen Arbeitsgedächtnisses nahe. In einer Untersuchung zu akuten Effekten von Cannabis

auf memory-guided-Sakkaden konnte im Vergleich zu einer Kontrollgruppe bereits eine Hypermetrie in der THC-Gruppe festgestellt werden (Ploner et al., 2002; vgl. Kapitel 1.2.1 für eine detailliertere Darstellung). Daher soll folgende Hypothese getestet werden:

H1: Die mittlere Sakkadenlänge für memory-guided Sakkaden ist in der THC-Gruppe signifikant gegenüber der Kontrollgruppe verlängert.

Außerdem wird in dieser Aufgabe eine verzögerte Reaktion erfordert, da sie nicht direkt auf einen visuellen Stimulus folgt. Somit lässt sich mit ihr auch die in der Pro- und Antisakkadenaufgabe gefundene Reaktionszeitverzögerung für die THC-Gruppe genauer interpretieren. Aufgrund der Ergebnisse von Ploner et al. (2002) zu Akuteffekten von Cannabis ist zu erwarten, dass keine signifikanten Unterschiede in der Reaktionszeit zu erwarten sind, was insgesamt gegen eine Beeinträchtigung später motorischer Prozesse spricht. Daher wird bezüglich der zeitlichen Parameter die folgende Hypothese aufgestellt:

H2: Die sakkadische Reaktionszeit unterscheidet sich zwischen der THC- und der Kontrollgruppe nicht signifikant.

5.2 Methode

In diesem Experiment nahmen die selben Probanden wie in den übrigen Experimenten teil. Die Apparatur war ebenfalls identisch (vgl. Kapitel 2.2.1 & 2.2.3). Während eines Durchgangs betrachten die Probanden ein zentrales Fixationskreuz für 2200 ms. Danach erscheint zusätzlich an einer von vier Positionen für 1000 ms ein Zielreiz (Quadrat), entweder 3° links, 3° rechts, 6° links oder 6° rechts. Die Eigenschaften der Zielreize (Farbe, Größe) sind identisch zu denen in der Prosakkadenaufgabe (s. Kapitel 3.3). Die Probanden wurden instruiert, den erscheinenden Zielreiz nicht anzusehen, sondern den Blick auf das Fixationskreuz gerichtet zu halten. Nach dem Verlöschen des Zielreizes bleibt das zentrale Kreuz 1500 ms bestehen (*memory delay*) und soll weiter betrachtet werden. Dann verlischt es für 1000 ms. Dies dient den Probanden als Signal, um an die Stelle des nicht mehr sichtbaren Zielreizes zu blicken. Zuletzt soll der Proband dann in die Mitte auf das wieder erscheinende Fixationskreuz schauen. Der Proband erhält in der Versuchsanordnung keine Rückmeldung über die Genauigkeit seiner Leistung, da möglichst viel Varianz bezüglich der Amplitude induziert und Trainingseffekte vermieden werden sollen. Insgesamt muss jeder Proband 120 randomisierte Durchgänge absolvieren, die in vier Blöcke

unterteilt sind. Zwischen den Blöcken sind kurze Pausen möglich. Vor dem Hauptexperiment wird den Probanden in einem Übungsblock mit 30 Durchgängen die Aufgabe erklärt und es werden mögliche Unklarheiten beseitigt. Das Experiment dauert etwa 15-20 Minuten. Die nachstehende Abbildung 5.1 veranschaulicht nochmals den Ablauf eines einzelnen Durchgangs.

Memory-Guided-Sakkaden-Paradigma:

Screenshots und korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)

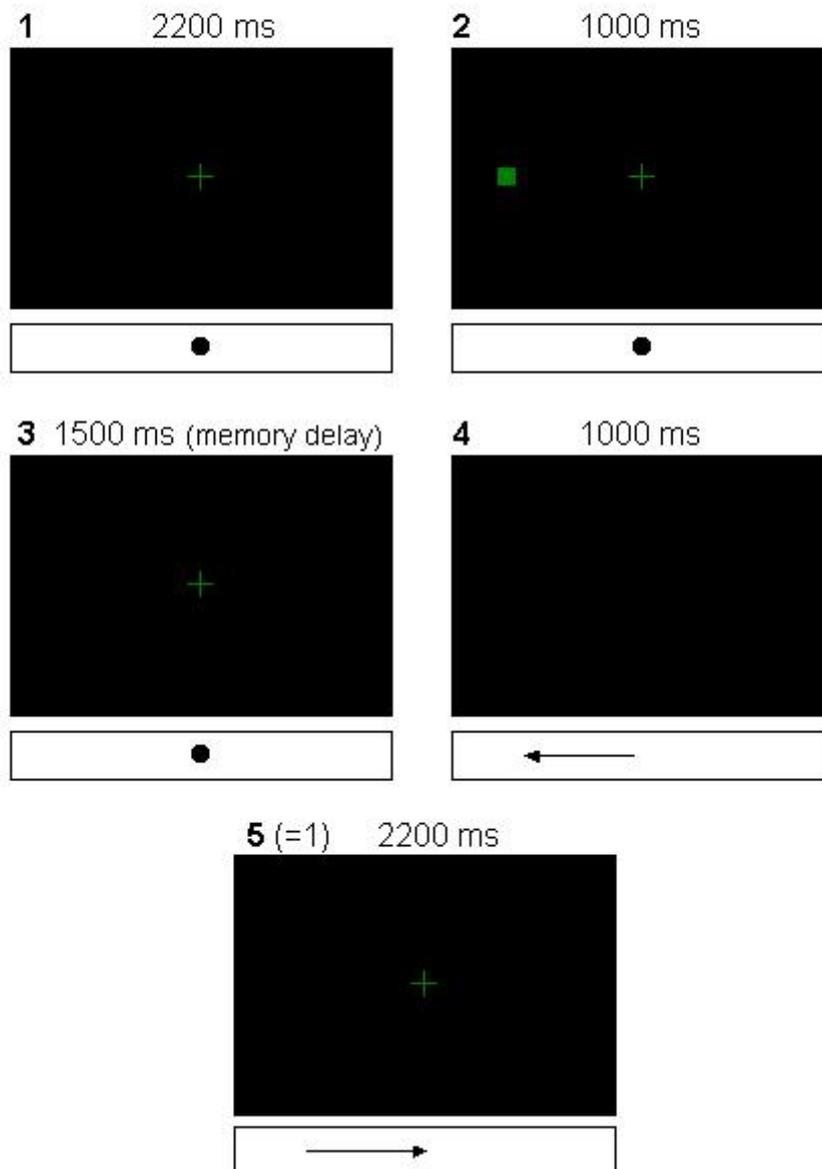


Abbildung 5.1: „Memory-guided“-Paradigma: Ablauf eines Durchgangs mit links außen erscheinendem Zielreiz. Die Reize der Screenshots sind verhältnismäßig größer als im Original. Angegeben sind jeweils die Darbietungszeiten (oben) sowie die instruierten Blickbewegungen (darunter). Als Signal zum Ausführen der Sakkade dient das Erlöschen des Fixationspunktes (Bild 4). Die Reize erschienen im Abstand von 3° und 6° links und rechts.

5.3 Ergebnisse

Leider musste ein Proband der THC-Gruppe aus der Auswertung dieses Experimentes ausgeschlossen werden, da über die Hälfte der Messwerte unbeabsichtigt gelöscht wurden. Um die Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen zu gewährleisten, wurde dieser Proband nicht durch eine andere Versuchsperson in der Auswertung ersetzt.

Latenzen und Amplituden

Insgesamt zeigen sich in diesem Experiment im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten keine Latenzeffekte zwischen den Gruppen. Die Latenzen in Reaktionen auf 3° entfernte Positionen unterscheiden sich nicht von denen zu 6° entfernten Zielreizen (vgl. Abbildung 5.2). Ebenso ist die Variabilität der Latenzen innerhalb der Probanden zwischen den Gruppen nicht signifikant verschieden². Damit konnte die zweite Hypothese insgesamt bestätigt werden.

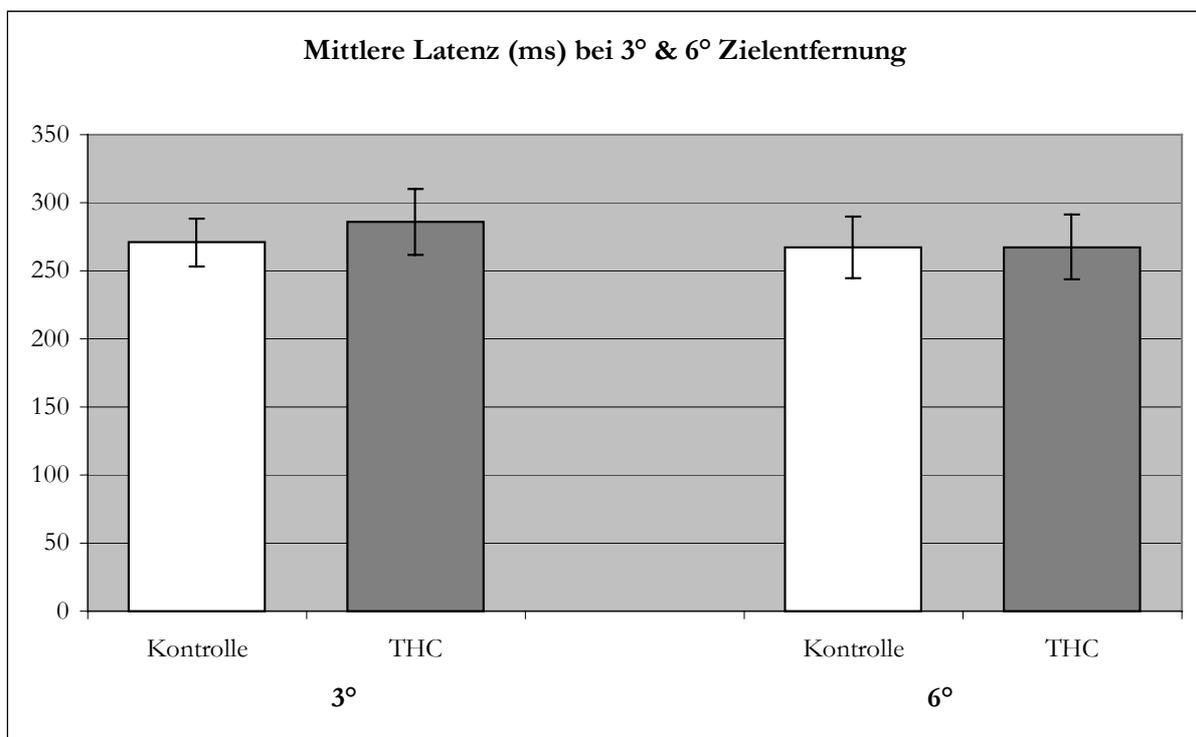


Abbildung 5.2: mittlere Latenzen zu 3° und 6° entfernten Zielreizen in der „memory guided“-Sakkadenaufgabe für die THC- und die Kontrollgruppe. Die Gruppenunterschiede sind nicht signifikant.

² Da sich im Gegensatz zu den zuvor dargestellten Experimenten zu Pro- und Antisakkaden die Hypothesen nicht auf Interaktionen beziehen, wurden hier im Sinne einer möglichst hohen statistischen Validität die Hypothesen durch geplante Einzelkontraste getestet (vgl. Hager, 1987, S. 161 ff), die der gerichteten Hypothese zu den Sakkadenamplituden entsprechen. Die Signifikanzbeurteilung erfolgte nach einer Bonferroni-Adjustierung.

Bezüglich der Sakkadenamplituden ist demgegenüber festzuhalten, dass die THC-Gruppe in der 3°-Bedingung eine signifikante Amplitudenverlängerung aufweist, und zwar um einen Betrag von etwa 0,25°. Dieselbe Tendenz zeigt sich in der 6°-Bedingung, auch wenn der Unterschied (0,16°) hier nicht statistisch abgesichert werden kann. Damit konnte die erste Hypothese ebenfalls zu großen Teilen bestätigt werden (vgl. Abbildung 5.3). Die genannten Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle 5.1 noch einmal zusammengefasst.

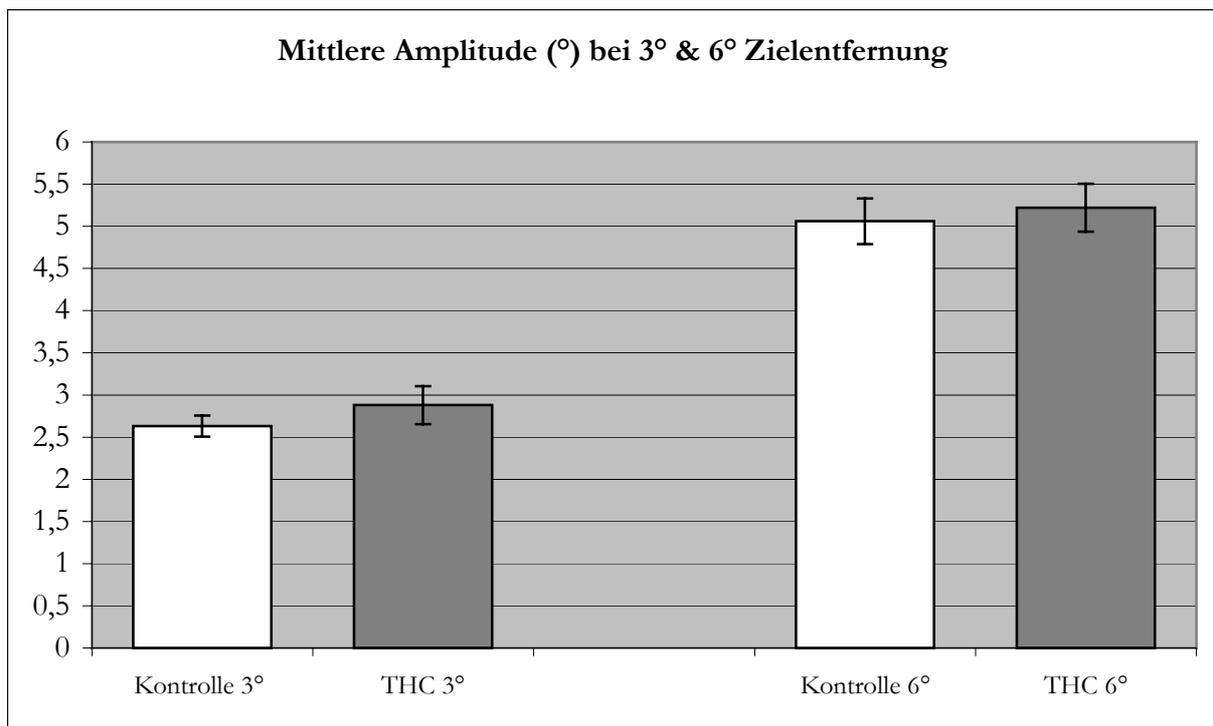


Abbildung 5.3: Gruppenunterschiede bzgl. der mittleren Amplitude bei 3° und 6° entfernten Zielreizen in der „memory guided“-Sakkadenaufgabe. Der Gruppenunterschied in der 3°-Bedingung ist signifikant (s. Text für Details).

Tabelle 5.1: Übersicht über Latenzen, mittleren intraindividuellen Streuungen der Latenzen und der mittleren Amplitude in der „memory guided“-Sakkadenaufgabe für 3° und 6° entfernte Zielreize. Standardabweichungen sind in Klammern angegeben. Signifikante t-Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ markiert. Zur Berechnung der t-Werte der mittleren intraindividuellen Streuungen wurden quadrierte Werte verwendet (Varianzen).

Parameter	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38)
mittlere Latenz bei 3° Entfernung (ms)	271 (34)	286 (48)	1,13
mittlere Latenz bei 6° Entfernung (ms)	267,54 (45,31)	267,52 (47,52)	0,02
mittlere Latenz-SD pro Pbn (gesamt, ms)	120,07 (37,07)	136,01 (40,96)	1,28
mittlere Amplitude bei 3° Zielreizen (°)	2,63 (0,25)	2,88 (0,45)	2,12*
mittlere Amplitude bei 6° Zielreizen (°)	5,06 (0,54)	5,22 (0,57)	0,93
Fehlerhafte Spontansakkaden bei Erscheinen des Zielreizes (%)	37,5 (22,2)	27,0 (14,7)	1,72

Spontansakkaden

Als fehlerhafte Spontansakkaden wurden solche definiert, die innerhalb des Behaltensintervalls mit einer Amplitude von mehr als 1,5° in die Richtung des erschienenen Zielreizes gelenkt wurden. Insgesamt ist der Anteil dieser fehlerhaften Sakkaden mit etwa einem Drittel aller ausgeführten Sakkaden groß (vgl. Tabelle 5.1), was auf die Schwierigkeit der Unterdrückung einer reflexiven Sakkade hindeutet. Zwischen den Gruppen konnte kein signifikanter Unterschied bezüglich der mittleren Anzahl nachgewiesen werden. Der prozentuale Anteil der Sakkaden, die unwillkürlich durch das Erscheinen des Zielreizes ausgelöst wurden, ist zwar nominell in der Kontrollgruppe erhöht, der Unterschied wird jedoch aufgrund der hohen Variabilität nicht signifikant (vgl. Tabelle 5.1).

5.4 Diskussion

In diesem Experiment wurden – wie in der Antisakkadenaufgabe – Sakkaden zu nicht visuell sichtbaren Zielreizen ausgeführt. Ähnlich wie in der Antisakkadenaufgabe sind in dieser Aufgabe

die Sakkadenamplituden signifikant verlängert, auch wenn diese Verlängerung nur in der 3^o-Bedingung statistisch signifikant ist. Möglicherweise ist bei den Probanden insgesamt bei dieser Aufgabe eine stärkere Ermüdung zu verzeichnen, da sie als letzte innerhalb einer Reihe experimenteller Paradigmen platziert wurde. Dies würde auch die relativ hohe Anzahl fehlerhafter Reflexsakkaden in beiden Gruppen erklären und könnte bedeuten, dass real existierende Unterschiede dadurch etwas „ausgewaschen“ wurden. Dennoch erscheint vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus der Antisakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 4.3) generell der Schluss gerechtfertigt, dass bei chronischem THC-Konsum dauerhafte Beeinträchtigungen bezüglich der Präzision nicht visuell geführter Sakkaden auftreten, die mit Defiziten des räumlichen Arbeitsgedächtnisses assoziiert sind.

Gruppenunterschiede bezüglich der Latenz wurden in dieser Aufgabe nicht erwartet, da im Gegensatz zu den Pro- und Antisakkadenaufgaben die Reaktion um die Dauer des Behaltensintervalls hinausgeschoben wird und in dieser Zeit bereits vorbereitet werden kann. Die Ergebnisse bestätigen diese Vermutung. Dies lässt den Schluss zu, dass die beobachteten Latenzeffekte bei nicht-verzögerten Reaktionen bei den Pro- und Antisakkaden (vgl. Kapitel 3 und 4) auf Prozesse der Reaktionsvorbereitung und nicht auf die Ausführung der jeweiligen Blickbewegung zurückzuführen sind. Dieses Resultat gleicht den Befunden von Ploner et al. (2002) zu Kurzzeiteffekten von Cannabis (vgl. Kapitel 5.1) und deutet auf Störungen des dorsolateralen Präfrontalcortex (vgl. Kapitel 3.1.2)³. Zusätzlich kann dieses Ergebnis dahingehend interpretiert werden, dass bei den THC-Probanden keine allgemeine Tendenz zu verlangsamten Reaktionen zu verzeichnen ist, die auf Probandeneigenschaften und nicht auf spezifische Störungen durch THC zurückzuführen wären. Eine solche Vermutung ist mit dem hochselektiven Befundmuster bezüglich der okulomotorischen Latenzen unvereinbar. Zuletzt bleibt anzumerken, dass die THC-Gruppe keine Tendenz zu einer höheren Rate fehlerhafter Spontansakkaden bei Erscheinen des Zielreizes zeigte. Dies bestätigt die Ergebnisse aus der Antisakkadenaufgabe, da dort ebenso keine Hinweise auf eine geringe Inhibitionsleistung in der THC-Gruppe zu finden waren (vgl. Kapitel 4). Da in der Studie zu Kurzzeiteffekten von Ploner et al. (2002) sowohl in der „memory guided“-Sakkadenaufgabe vermehrt Spontansakkaden als auch in der Antisakkadenaufgabe mehr fehlerhafte Prosakkaden auftraten, lässt dies den Schluss zu, dass exekutive Funktionen zwar von einer akuten Intoxikation beeinträchtigt werden, nicht aber als langfristige Folge chronischen Dauerkonsums.

³ Für weitere neurophysiologische Implikationen vgl. Kapitel 9.

Diskussionswürdig ist wie bei den Antisakkaden (vgl. Kapitel 4.4) die Tatsache, dass die THC-Gruppe zwar längere Sakkaden ausführt, aber diese Sakkaden den Zielreizen näher kommen und daher in Bezug auf die Aufgabe als genauer beschrieben werden müssen. Insofern ist zunächst nicht klar einsehbar, warum der Gruppenunterschied nicht vielmehr eine *bessere* Leistung der THC-Gruppe wiedergibt. Es sprechen jedoch mehrere Argumente dafür, weiter an der Ansicht festzuhalten, dass sich in diesem Verhalten wie auch bei den Antisakkaden ein Defizit widerspiegelt. Erstens ist ein Undershoot von Sakkaden zu nicht visuell-geführten Zielreizen in den hier gewählten Abständen ein über viele Studien gut bestätigter Effekt für normale Probanden. Daher scheint dies ein „gesundes“ Verhalten zu repräsentieren. Zweitens muss dieser Befund vor dem Hintergrund der bereits berichteten Effekte gesehen werden, die gezeigt haben, dass Cannabisprobanden ganz offensichtlich mehrere Defizite bezüglich ihres Blickverhaltens aufweisen, wie die übrigen Experimente dieser Arbeit belegen. Außerdem ist über diese Arbeit hinaus bekannt (s. Kapitel 1), dass THC-Konsumenten zumindest bei akuter Intoxikation Defizite im räumlichen Arbeitsgedächtnis aufweisen. Vor diesem Hintergrund scheint es unumgänglich, Auffälligkeiten bezüglich der hierfür sensiblen Parameter im Vergleich zu Kontrollprobanden als defizitär zu deuten.

Insgesamt konnte mittels dieser Aufgabe also einerseits das Latenzdefizit in der Pro- und Antisakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3 und 4) genauer spezifiziert werden, und zwar als ein Effekt von Reaktionsvorbereitungsprozessen. Andererseits konnten die Defizite in der räumlichen Sakkadensteuerung aus der Antisakkadenaufgabe ebenfalls untermauert werden, so dass insgesamt von einer Beeinträchtigung des räumlichen Arbeitsgedächtnisses ausgegangen werden kann. Diese Ergebnisse sind darüber hinaus vergleichbar mit denen von Ploner et al. (2002; vgl. Kapitel 1), die ebenfalls längere Sakkaden bei Cannabisprobanden im Vergleich mit den Kontrollprobanden in dieser Versuchsanordnung fanden. Allerdings befasste sich diese Studie im Gegensatz zu der vorliegenden mit Akut-Effekten von THC. Offensichtlich können diese Defizite auch persistieren, zumindest bei der hier untersuchten Stichprobe chronischer Konsumenten mit frühem *age of onset*.

6. Experiment 5: Das „Double Step“-Paradigma: Reprogrammierungsfähigkeit

Eine wichtige Komponente der Blickbewegungssteuerung ist die Fähigkeit des sakkadischen Systems, in der Planung befindliche Sakkaden zu revidieren und stattdessen eine neue Bewegung zu einem anderen Zielort zu programmieren. Dies wird z.B. immer dann notwendig, wenn nach dem Planungsbeginn einer ersten Sakkade neue Information verarbeitet wurde, die eine andere als die bereits in Planung befindliche Sakkade nahelegt. In komplexen alltäglichen Aufgaben wie dem Lesen aber auch der visuellen Suche ist anzunehmen, dass dieser Mechanismus einen zentralen Bestandteil einer reibungslos funktionierenden visuellen Informationsverarbeitung darstellt. Während jeder Fixation wird Information aufgenommen, die möglicherweise für die Planung von nachfolgenden Sakkadenzielen relevant sein kann. Um die Funktionstüchtigkeit dieser Teilleistung bei den Cannabisprobanden zu untersuchen, wurde ein speziell hierfür etabliertes Paradigma verwendet, das in diesem Kapitel im Zentrum steht.

6.1 „Double Step“-Sakkaden: Theoretischer Hintergrund & Forschungsstand

Allgemein gehört das *double step*-Experiment zu den grundlegenden Paradigmen in der okulomotorischen Forschung und wurde im Kontext der hier interessierenden Fragestellung erstmals von Becker & Jürgens (1979) vorgestellt. In dieser Untersuchung wurde es genutzt, um die Möglichkeit der parallelen Programmierung von Sakkaden zu untersuchen. Das Entscheidende war daher, dass während der Reaktionsvorbereitung einer ersten Sakkade neue handlungsrelevante Information hinzukommt. Die Verwendung der Aufgabe selbst reicht bereits zurück zu Experimenten von Westheimer (1954) und bis in die Mitte der 70er Jahre hinein (s. Becker & Jürgens, 1979, sowie Becker, 1989, für eine kurze Übersicht). In diesen frühen Experimenten wurde bereits nachgewiesen, dass die Fixationsdauer zwischen zwei Sakkaden sich verkürzt und sogar unter das normale Reaktionszeitniveau von Sakkaden fällt, wenn das zeitliche Intervall zwischen zwei Zielreizschritten kleiner wird.

Im Folgenden soll eine typische Versuchsanordnung dargestellt werden. Die Versuchsperson fixiert zunächst einen Fixationspunkt in der Mitte des Bildschirms (vgl. Bild 1 in Abbildung 6.1). Dann erscheint ein Zielreiz links oder rechts (Bild 2), der in den meisten der Versuchsdurchgänge nach einem variablen Interstimulusintervall (ISI) durch einen weiteren Zielreiz ersetzt wird (Bild 3). In der einfachsten Bedingung wird dieser zweite Zielreiz in der gleichen Richtung weiter außen präsentiert (stair case-Bedingung). Die Versuchsperson wird instruiert, die Reize mit den

Blicken zu verfolgen. Subjektiv entsteht für den Probanden der Eindruck, dass der Zielreiz „springt“.

Der entscheidende Parameter in diesem Paradigma ist die Reprogrammierungszeit zwischen dem Onset des zweiten Targets und der Augenbewegung. Sie bestimmt die Zeit, die das visuelle System noch hat, neu einkommende Information in die Parametrisierung der Sakkade einfließen zu lassen. Dieses Maß ist also ein Kompositum aus der experimentellen Manipulation (ISI) und der Reaktionsgeschwindigkeit des jeweiligen Probanden in einem bestimmten Durchgang. Der interessanteste Befund bei dieser Aufgabe ist, dass in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit die mittlere Landeposition der initialen Sakkade (auch: Primärsakkade) variiert. Ist diese Zeit kurz (etwa unter 70 ms), landet das Auge zunächst auf der Position des inneren Targets, da das bereits erstellte Bewegungsprogramm nicht mehr geändert werden kann, und springt erst dann weiter zur äußeren Position. Bei einer ausreichenden Reprogrammierungszeit (etwa 170 ms) landet das Auge direkt auf der Position des äußeren Targets, da die Zeit zur Umkodierung der Koordinaten ausreicht. Zwischen diesen Zeiträumen verhält sich die Landeposition interessanterweise linear in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit. Dies betrifft den Bereich von etwa 80 bis 150 ms. Entsprechend wird auch die Wahrscheinlichkeit, auf die beiden Zielreize mit einer Einzel- anstelle einer Doppelsakkade zu reagieren, bei einer längeren Reprogrammierungszeit größer. Damit spiegelt dieses Reaktionsmuster die räumliche und zeitliche Integration visueller Information wider.

Unterschieden werden verschiedene Bedingungen in dieser Aufgabe. Die einfachste Bedingung wird als „stair case“ bezeichnet und besteht aus einem Zielreiz zu einer Seite, der von einem zweiten Zielreiz in gleicher Richtung gefolgt wird. Alternativen zu dieser Bedingung sind zweite Zielreize, die in entgegengesetzter Richtung relativ zum ersten Zielreiz erscheinen, und zwar entweder in Richtung der Ausgangsfixation (pulse undershoot), zurück zur Ausgangsfixation (symmetrical pulse) oder sogar über die Ausgangsfixation hinweg (pulse overshoot). In der vorliegenden Untersuchung soll nur die einfachste Bedingung (stair case) Anwendung finden. Typische Auswertungen der Leistungen der Probanden beinhalten die Abhängigkeit der Latenz der initialen Sakkade und des Reaktionstyps (einfache oder Doppel-Sakkade) von dem Interstimulusintervall sowie von der Reprogrammierungszeit (vgl. Becker & Jürgens, 1979). Die Abhängigkeit der Sakkadenamplitude von der Reprogrammierungszeit wird typischerweise als „Amplitude Transition Function“ bezeichnet. Weitere typische Analysen bei einer Doppelsakkadenantwort beziehen sich auf den Einfluss der Reprogrammierungszeit auf das intersakkadische Intervall, gemessen als die Zeit zwischen dem Onset beider Sakkaden. Dabei

wird gewöhnlich eine schnellere Aufeinanderfolge der Sakkaden bei längerer Reprogrammierungszeit gefunden. Eine ähnliche Auswertung bezieht sich auf die Fixationsdauer zwischen beiden Sakkaden. Dabei ist auffällig, dass bei sehr langer Reprogrammierungszeit die Latenzen der zweiten Sakkade extrem verkürzt sein können (tlw. bis unter 50 ms), ohne dabei an Genauigkeit einzubüßen.

In den erwähnten Studien *vor* 1979 wurde nur ein Zusammenhang zwischen dem ISI und der Sakkadenamplitude nachgewiesen. Damit konnte eine parallele Programmierung von Sakkaden aber noch nicht bewiesen werden, da möglicherweise beide Sakkaden als „Gruppe“ programmiert worden sein könnten (vgl. z.B. Levy-Schoen & Blanc-Garin, 1974, für dieses Argument). Da mit Ausnahme von Lisberger et al. (1975) sowie Täumer (1975) alle vorhergehenden Autoren die Reaktionsparameter ausschließlich in Abhängigkeit von dem Interstimulusintervall der Zielreize betrachtet haben, konnte diese Interpretationsmöglichkeit nicht ausgeräumt werden. Daher wählten Becker & Jürgens (1979) die Reprogrammierungszeit als entscheidende unabhängige Variable. Erst die Abhängigkeit der genannten Sakkadenparameter von dieser Zeitspanne bewies die Existenz paralleler Sakkadenprogrammierung. Dabei können interindividuelle Differenzen in der Leistung bei dieser Aufgabe, wie sie z.B. bereits von Nam et al. (1975) nachgewiesen und z.B. von Becker (1989) bestätigt wurden, eine unterschiedliche Befähigung zur schnellen Reprogrammierung von Sakkaden aufgrund neuer Information reflektieren. Dieser Sachverhalt soll daher auch für einen Vergleich zwischen den Cannabis- und den Kontrollprobanden genutzt werden.

Im Verlauf der Forschung *nach* der Originaluntersuchung von Becker & Jürgens (1979) wurde dieses Paradigma neben den genannten Zwecken auch dazu verwendet, um räumliche Bezugssysteme der Sakkadensteuerung zu untersuchen. Bei der Programmierung der zweiten Sakkade muss, wenn nach Beendigung der ersten Sakkade keine visuelle Information mehr verfügbar ist, Information aus dem Gedächtnis zur Zielposition des zweiten Reizes zur Programmierung genutzt werden. Um eine Sakkade adäquat programmieren zu können, muss daher von der gespeicherten Distanzinformation der bereits zurückgelegte Weg abgezogen werden (vector subtraction), um die korrekte Sakkadenlänge zu erzielen (vgl. Deubel et al., 1984). In anderen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Phänomen der „Amplitude Transition Function“ auch bei gleich exzentrischen Stimuli gilt, die in unterschiedlichem Winkel vom Fixationsort (also nicht nur auf der Horizontalen) dargeboten werden. Bei sehr weit auseinanderliegenden Positionen sowie bei einem Wechsel der Sakkadenrichtung wird kein

sakkadisches Mittelungsphänomen, sondern eine eher bimodale Verteilung gefunden (Ottes et al., 1984).

Läsionsstudien haben Aufschluss über die funktionale Neuroanatomie dieses Sakkadentyps gegeben (vgl. Kapitel 3.1.2). Entscheidend zur Steuerung des Triggerings und der Abfolge dieser Sakkaden sind die frontalen Augenfelder sowie der posteriore Frontalkortex. Das Timing wird vor allem durch die supplementären Motorareale bestimmt. Weiterhin können Schädigungen des posterioren Parietalkortex räumliche Dysmetrien in dieser Aufgabe zur Folge haben.

Aufgrund der Ergebnisse in der visuellen Suche (vgl. Kapitel 2) soll die Vermutung überprüft werden, ob die schlechtere Leistung der THC-Gruppe möglicherweise auf eine geringere Fähigkeit zur Reprogrammierung von Sakkaden zurückzuführen ist. Wenn neu eingehende Information weniger schnell verarbeitet werden kann, sollte bei der *double step*-Aufgabe im kritischen Bereich der Reprogrammierungszeit eine kürzere Amplitude der Primärsakkade sowie eine geringere Wahrscheinlichkeit zu einer Einzelsakkadenantwort resultieren. Der Einfluss des zweiten Zielreizes wäre damit geringer als bei Individuen, die schneller neu eingehende Information verarbeiten. Damit werden in diesem Experiment die folgenden Hypothesen getestet:

H1: Die Amplitude der Primärsakkade als Antwort auf einen *double step*-Stimulus ist bei gleicher Reprogrammierungszeit in der THC-Gruppe kürzer als in der Kontrollgruppe.

H2: Ebenso ist die Wahrscheinlichkeit, auf einen *double step*-Stimulus bei gleicher Reprogrammierungszeit mit einer Einzelsakkade zu reagieren, in der THC-Gruppe geringer als in der Kontrollgruppe.

Diese Hypothesen sollten jeweils im Bereich der kritischen Reprogrammierungszeit gelten, also etwa zwischen 80 und 150 ms (s.o.).

6.2 Methode

In dieser Untersuchung zum Vergleich der Reprogrammierungsfähigkeit zwischen Langzeitkonsumenten von Cannabis mit frühem „age of onset“ und einer Kontrollgruppe wurden dieselben Probanden mit derselben Apparatur wie in den vorigen Experimenten untersucht (vgl. Kapitel 2.2.1 und 2.2.3). Als Intervalle zwischen dem Onset des ersten und

zweiten Targets wurden nach umfangreichen Vorversuchen die Intervalle 40 ms, 70 ms und 100 ms bestimmt¹. Diese Intervalle liegen im Bereich des für solche Versuche Üblichen, so verwenden z.B. Findlay & Harris (1984) ISI von 50 - 200 ms, derselbe Bereich wurde auch in der Originaluntersuchung von Becker & Jürgens (1979) verwendet, dort allerdings verbunden mit im Vergleich zu diesem Experiment größeren Sakkadenamplituden (15°-30°). Findlay & Harris (1984) konnten die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Becker & Jürgens (1979) jedoch für kleinere Sakkadenamplituden, wie sie in diesem Experiment gefordert werden, nachweisen. Alle *double step*-Sakkaden waren gleichsinnig gerichtet und entsprechen damit der „stair case“-Bedingung im Sinne von Becker & Jürgens (vgl. Kapitel 6.1). Auf weitere Bedingungen mit entgegengesetzt gerichteten Doppelsakkaden wurde einerseits aus Ökonomiegründen verzichtet, andererseits wird die Reprogrammierungsleistung bereits in dieser einfachen Aufgabe hinreichend operationalisiert. In einem Viertel aller Fälle wurde kein zweiter Zielreiz präsentiert, um zu vermeiden, dass eine zweite Sakkade auf gewohnheitsmäßige Routinen anstatt auf visueller Information basiert. Das erste Target erschien entweder links oder rechts vom Fixationspunkt in drei Grad Entfernung, das zweite Target erschien in einer Entfernung von sechs Grad. Insgesamt absolvierte jeder Proband 60 single-step-Durchgänge sowie 60 *double step*-Durchgänge mit den drei verschiedenen ISI. Die Durchgänge erfolgten gleichverteilt links oder rechts. Das Fixationskreuz selbst war 2,5 Sekunden sichtbar, das zweite Target genau eine Sekunde. Jede Versuchsperson absolvierte acht Blöcke a 30 randomisierte Durchgänge, der Versuch dauerte insgesamt ca. 20 Minuten. Vor diesen Blöcken wurde ein Probekblock durchgeführt, um den Probanden das Experiment zu erläutern und auf mögliche Unklarheiten zu reagieren. Das Versuchsdesign innerhalb eines Durchgangs ist in der folgenden Abbildung 6.1 noch einmal zusammengefasst.

¹ Die wichtigste Vorarbeit in diesem Zusammenhang wurde durch eine Diplomarbeit von R. Kresser (1996) am Institut für Psychologie der RWTH Aachen geleistet.

Double-Step Paradigma:

Screenshots und korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)

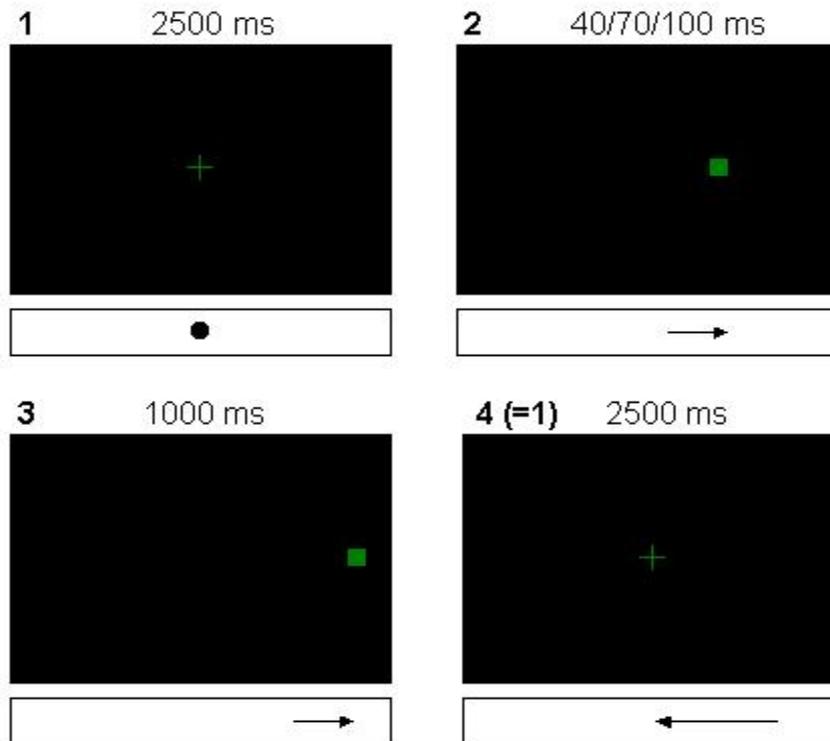


Abbildung 6.1: „Screen shots“ und korrespondierende Blickbewegungen im *double step*-Paradigma unter Angabe der im Experiment verwendeten Darbietungszeiten. Über Bild 2 sind die verschiedenen ISI angegeben. In einem Viertel der Durchgänge erscheint kein zweiter Zielreiz (Bild 3).

6.3 Ergebnisse

Allgemeine Vorbemerkungen

Jeder Proband absolvierte 240 Durchgänge. Zunächst wurden solche Reaktionen aus der weiteren Analyse ausgeschlossen, die aufgrund der nachstehenden inhaltlichen Argumente als Ausreißer definiert wurden. Dabei handelt es sich um sakkadische Reaktionszeiten von < 70 ms, da bei solchen Sakkaden nicht sicher davon ausgegangen werden kann, dass die visuelle Information tatsächlich verarbeitet worden ist (vgl. Kapitel 3.4). Dieses Kriterium führte zum Ausschluss von 2,3 % aller Durchgänge. Weiterhin wurden zu lange sakkadische Reaktionszeiten von > 500 ms ausgeschlossen, was jedoch nur 0,4% aller Durchgänge betraf. Ebenfalls ausgeschlossen wurden Sakkaden, deren Amplitude geringer als 1° oder größer als 8° war. Da die

Zielreize in einer Entfernung von 3° bzw. 6° vom Fixationspunkt erscheinen, ist bei solchen Abweichungen nicht zu erwarten, dass es sich um instruktionsgemäße Sakkaden handelt. Dieses Kriterium entfernte insgesamt 3,2% aller gemessenen Reaktionen. Bezüglich aller Ausschlusskriterien ist anzumerken, dass sich die Anzahl ausgeschlossener Fälle nicht signifikant zwischen den Gruppen unterschied. Insgesamt gingen nach diesen Einschränkungen insgesamt ca. 95% aller Daten in die weitere Analyse ein. Jeder Proband trug dadurch zu jeder der vier Experimentalbedingungen (single-step sowie drei *double step*-Bedingungen mit unterschiedlichen ISI) mindestens 50 von 60 möglichen Datenpunkten bei.

Vor der Ergebnisdarstellung sollen noch einige Vorbemerkungen zur Definition relevanter Parameter gegeben werden. Die Reprogrammierungszeit bei den *double step*-Bedingungen definiert sich durch die Differenz zwischen der Latenz der Primärsakkade und dem ISI (s. Kapitel 6.1). Weiterhin ist es notwendig, zwischen zwei Reaktionstypen in den *double step*-Bedingungen zu unterscheiden. Entweder treten zwei aufeinanderfolgende Sakkaden auf oder es erfolgt nur eine einzige Sakkade als Antwort. Eine Einzelsakkade ist in den nachfolgend referierten Ergebnissen definiert durch eine Amplitude von mindestens 1,5° in Richtung des Zielreizes und einer nachfolgenden Sakkade, die nicht mehr als 0,5° in dieselbe Richtung verläuft. Eine Aufeinanderfolge von zwei Sakkaden wurde definiert durch eine erste Sakkade, die mindestens 1,5° in Richtung des ersten Zielreizes gesteuert wird und von einer nachfolgenden Sakkade um mindestens 1° weiter in dieselbe Richtung gefolgt wird. Diese Kriterien wurden gewählt, da bei initialen Sakkaden unterhalb von 1,5° nicht davon ausgegangen werden kann, dass sie zu einem der Zielreize gerichtet sind, da diese mindestens in 3° Entfernung präsentiert wurden. Durch diese Definitionen konnten 10% der Reaktionen nicht eindeutig zugeordnet werden und wurden daher in den Analysen zu den Häufigkeiten dieser Sakkadenantworttypen nicht berücksichtigt.

„Single Step“-Durchgänge

Jede Versuchsperson trug mindestens 50 Reaktionen zu der Bedingung bei, in der auf einen links oder rechts erscheinenden Zielreiz in 3° Entfernung reagiert werden musste, ohne dass ein zweiter Zielreiz erschien. Die hier berichteten Mittelwerte beziehen sich nicht auf die Gesamtdaten pro Gruppe, sondern auf Probandenmittelwerte. Die mittlere Sakkadenamplitude zu diesen Zielreizen betrug 3,1° mit einer Standardabweichung von 0,18° sowohl in der THC- als auch in der Kontrollgruppe.

Die mittlere Latenz in der Kontrollgruppe betrug 167 ms ($s = 17,4$) gegenüber 170 ms in der THC-Gruppe ($s = 26,1$). Während die Mittelwerte sich nicht signifikant zwischen den Gruppen unterscheiden, weisen die Latenzen der THC-Gruppe eine signifikant höhere Varianz auf (Levene-Test; $F(1,38) = 7,59$; $p < 0,01$).

„Double Step-Durchgänge“: Effekte des Interstimulus-Intervalls

In diesem Abschnitt sollen Effekte des ISI auf die Latenz der ersten und zweiten Sakkade, die initiale Sakkadenamplitude sowie das Verhältnis von Einzelsakkaden- und Doppelsakkadenantwort berichtet werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Ergebnisse des *double step*-Paradigmas in Abhängigkeit vom Interstimulusintervall (ISI). Die Sakkadenamplitude und die Latenz beziehen sich auf die initiale Sakkade. Die „zweite Fixationsdauer“ betrifft die Fälle, in denen eine Doppelsakkadenantwort erfolgte und beschreibt die Zeit zwischen beiden Sakkaden. Die angegebenen F-Werte beziehen sich auf den Haupteffekt (HE) des ISI, den HE Gruppe sowie die Interaktion der Faktoren ISI & Gruppe. Signifikante Unterschiede bei $\alpha = 0,05$ sind mit „*“ markiert.

Parameter in Abhängigkeit vom ISI		Kontroll- gruppe (SD)	THC- Gruppe (SD)	F-Werte:
				HE ISI (2;35) HE Gruppe (1;36) Interaktion (2;35)
Sakkaden- amplitude (°)	40 ms ISI	4,95 (0,49)	4,90 (0,61)	178,63* 1,40 1,67
	70 ms ISI	4,13 (0,45)	4,14 (0,69)	
	100 ms ISI	3,46 (0,39)	3,65 (0,49)	
Wahrscheinlichkeit für eine Einzel- Sakkade (%)	40 ms ISI	0,45 (0,25)	0,48 (0,26)	65,03* 3,16 0,75
	70 ms ISI	0,21 (0,15)	0,24 (0,23)	
	100 ms ISI	0,07 (0,07)	0,16 (0,16)	
Latenz (ms)	40 ms ISI	170,95 (18,18)	177,47 (32,02)	4,07* 2,46 2,62
	70 ms ISI	168,97 (19,10)	173,97 (32,85)	
	100 ms ISI	165,31 (18,90)	175,77 (32,29)	
Zweite Fixationsdauer (ms)	40 ms ISI	118,96 (24,28)	119,61 (25,54)	30,28* 0,87 0,97
	70 ms ISI	118,30 (25,68)	120,20 (26,34)	
	100 ms ISI	129,34 (24,12)	131,91 (23,81)	

Zur statistischen Absicherung wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren ISI (drei Stufen, Messwiederholungsdesign) und Gruppe (2 Stufen) herangezogen. Allgemein findet sich ein signifikanter Effekt des ISI auf die Sakkadenamplitude. Bei höherem ISI verkürzt sich systematisch die Amplitude (s. Abbildung 6.2).

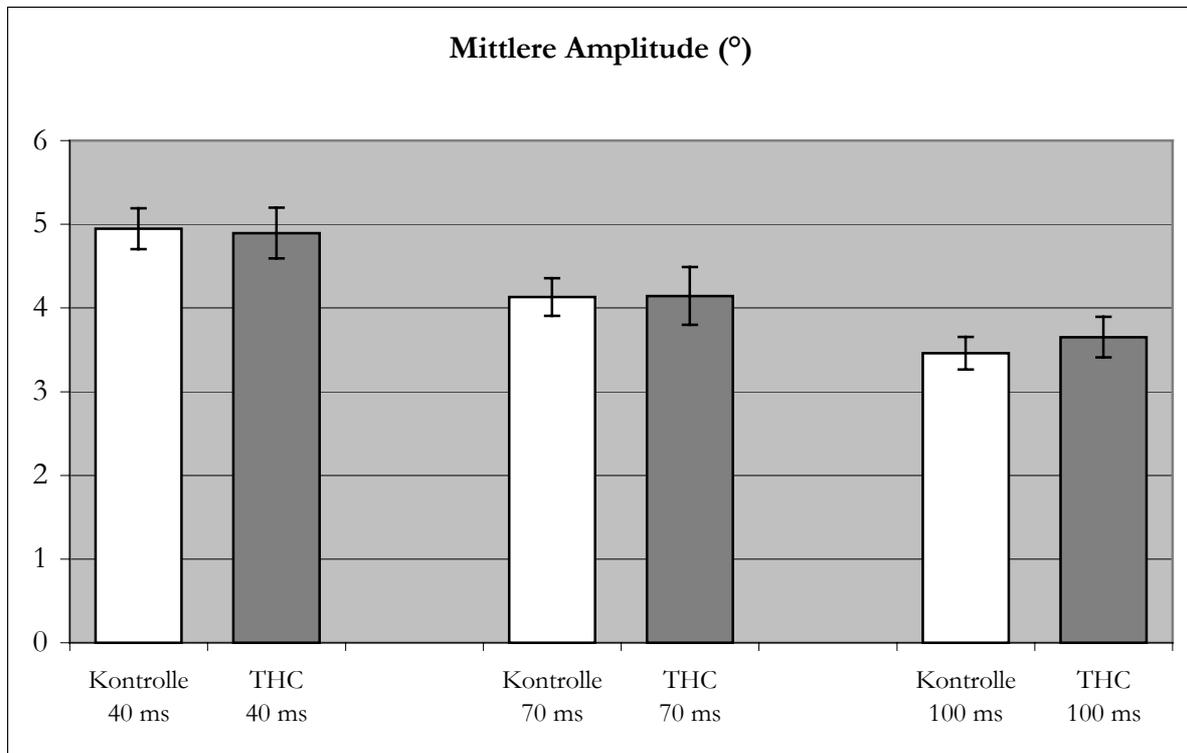


Abbildung 6.2: Mittlere Amplitude der Primärsakkade in der *double step*-Aufgabe in Abhängigkeit von den drei ISI. Die Gruppenunterschiede sind nicht signifikant.

Desweiteren lässt sich ein signifikanter Effekt des ISI auf die Wahrscheinlichkeit, mit einer Einzelsakkade zu reagieren, finden. Diese nimmt mit höherem ISI systematisch ab (s. Abbildung 6.3).

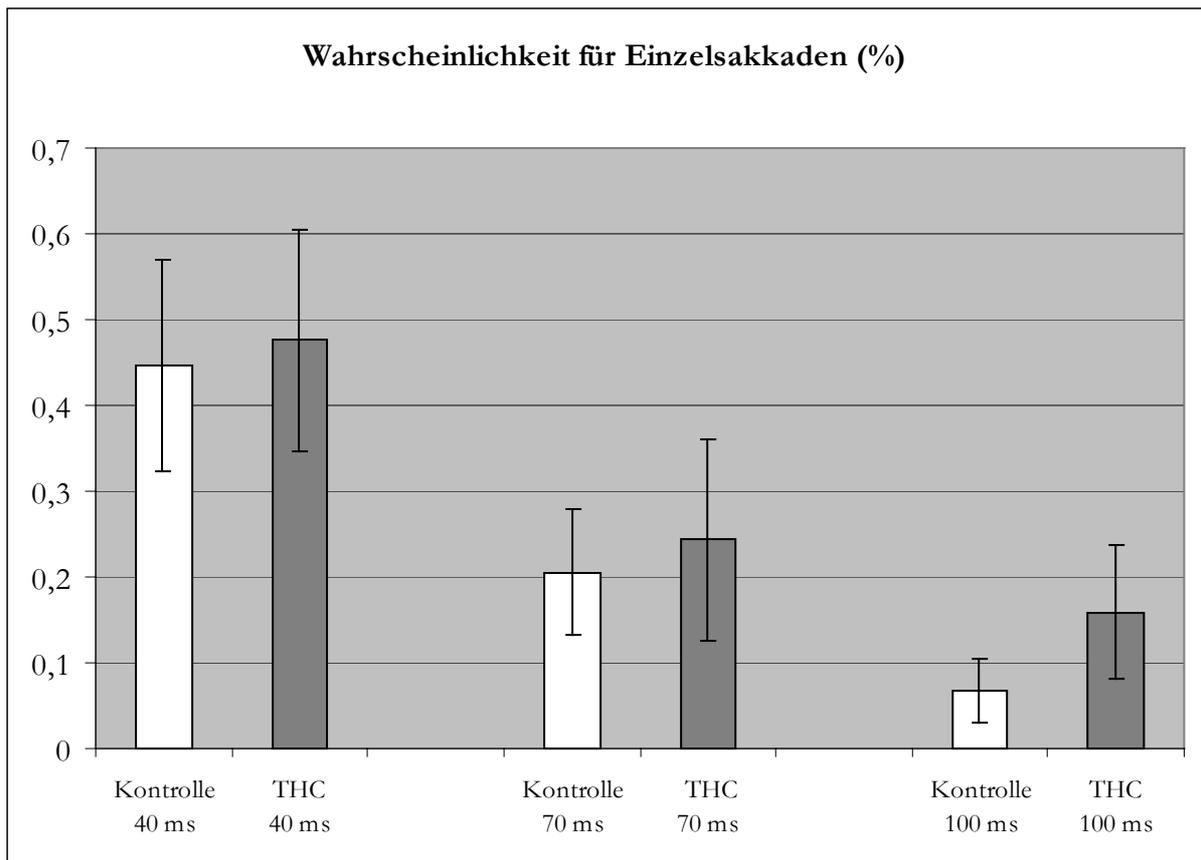


Abbildung 6.3: Wahrscheinlichkeit für die Ausführung von Einzelsakkaden in der *double step*-Aufgabe in Abhängigkeit von den drei ISI. Die Gruppenunterschiede sind nicht signifikant.

Auch die Latenz für die Primärsakkade unterscheidet sich signifikant zwischen den Bedingungen: Es besteht die Tendenz einer kürzeren Reaktionszeit bei längerem ISI. Bezüglich der Dauer der Fixation auf dem ersten Zielreiz (3° Entfernung) besteht ebenfalls ein Unterschied zwischen den drei Bedingungen, wobei vor allem ein Anstieg der Fixationszeit in der 100 ms-Bedingung um etwa 10 ms gegenüber den anderen Bedingungen zu verzeichnen ist.

Bezüglich keiner der untersuchten Parameter lässt sich ein signifikanter Gruppenunterschied feststellen. Tendenziell scheint sich die Wahrscheinlichkeit einer Einzelsakkade in der 100 ms-Bedingung zu unterscheiden (7% in der Kontrollgruppe gegenüber 16% in der THC-Gruppe), wobei in dieser Bedingung der Anteil der durchgeführten Einzelsakkaden im Vergleich mit den anderen Bedingungen nur sehr gering ist und bei insgesamt 9 Probanden in dieser Bedingung überhaupt keine Einzelsakkaden auftreten. Außerdem weist diese Tendenz nicht in eine hypothesenkonforme Richtung.

Effekte der Reprogrammierungszeit

In diesem Abschnitt sollen Effekte der Reprogrammierungszeit auf die initiale Sakkadenamplitude, das Verhältnis von Einzelsakkaden- und Doppelsakkadenantworten sowie die Fixationsdauer auf dem ersten Zielreiz berichtet werden. Zur statistischen Absicherung wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Reprogrammierungszeit (fünf Stufen, Messwiederholungsdesign) und Gruppe (2 Stufen) herangezogen. Außerdem wurde für jeden Probanden eine minimale Reprogrammierungszeit geschätzt, die zur Berücksichtigung der neuen visuellen Information gerade ausreicht, und zwar sowohl bezogen auf die Sakkadenamplitudenänderung als auch auf die Wahrscheinlichkeit, mit einer Einzelsakkade zu reagieren. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 6.2. Vor der Darstellung der Ergebnisse zum Gruppenvergleich soll zunächst eine detaillierte Gesamtaufstellung der Effekte der Reprogrammierungszeit auf die beiden wichtigsten Parameter, also die Amplitude und die Wahrscheinlichkeit einer Einzelsakkadenreaktion, gegeben werden (Abbildungen 6.4 & 6.5). In jeden Datenpunkt gehen 150 bis 700 Beobachtungen ein. Offenkundig benötigt eine Umprogrammierung des Reaktionstyps (Einzel- vs. Doppelsakkade) mindestens 90 ms, während die Amplitude bereits nach mindestens 60 ms modifiziert werden kann.

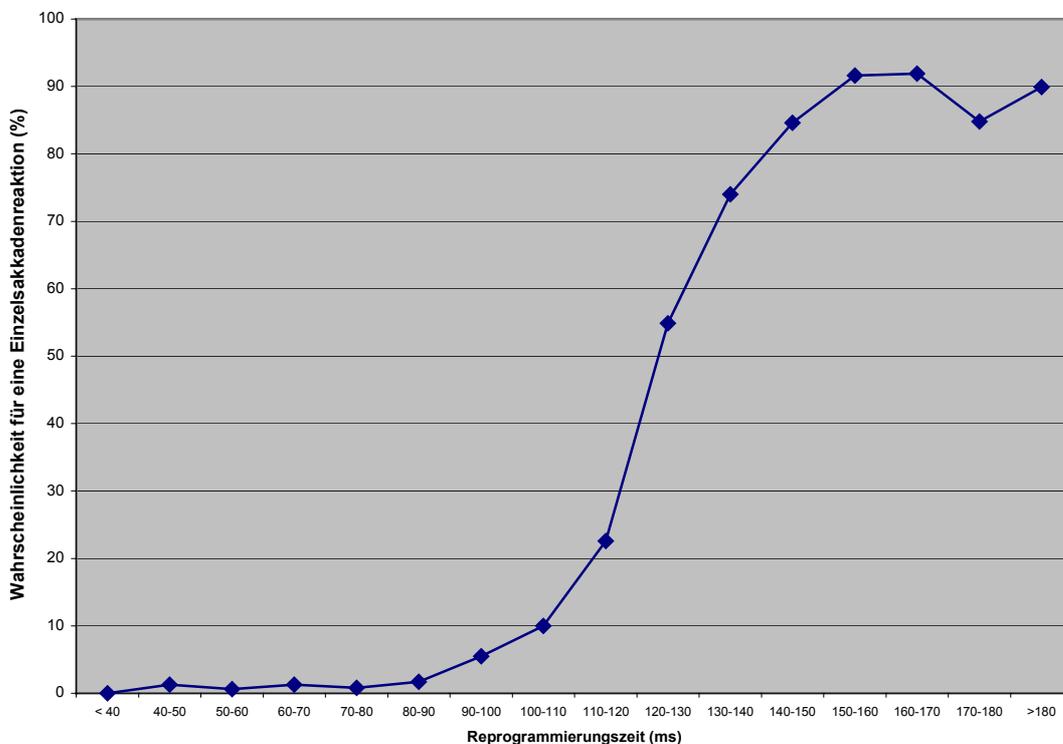


Abbildung 6.4: Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit einer Einzelsakkadenreaktion von der Reprogrammierungszeit in 10 ms-Schritten. In die Abbildung gehen die Werte aller getesteten Probanden ein.

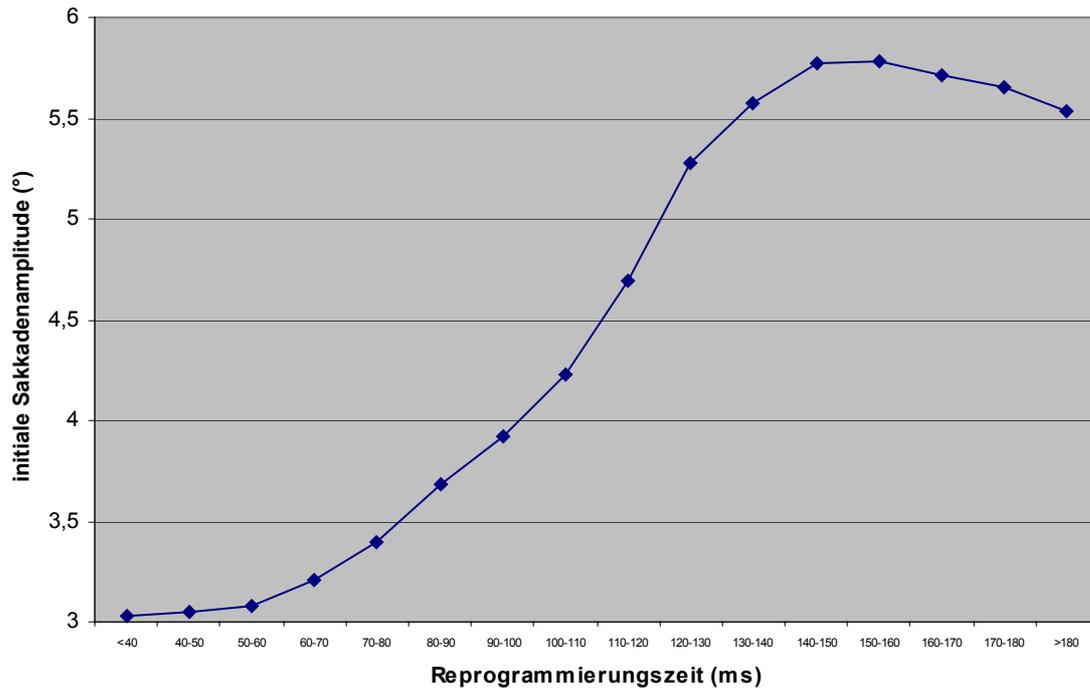


Abbildung 6.5: Abhängigkeit der initialen Sakkadenamplitude von der Reprogrammierungszeit in 10 ms-Schritten. In die Abbildung gehen die Werte aller getesteten Probanden ein.

Um auf der Basis dieser Werte einen Schätzer der minimalen Reprogrammierungszeit für beide Parameter für jeden einzelnen Probanden zu gewinnen, wurde die früheste Kategorie der Reprogrammierungszeit (in 10 ms-Schritten, vergleichbar zu Abbildungen 6.4 und 6.5) bestimmt, bei der ein Proband die Amplitude von $3,5^\circ$ überschreitet bzw. in mehr als zwei Durchgängen eine Einzelsakkade anstelle einer Doppelsakkade ausführt. Durch dieses Verfahren erhält man für jeden Probanden einen Schätzer für die minimale Reprogrammierungszeit für beide abhängige Variablen.

Auch die Ergebnisse im Gruppenvergleich zeigen, dass generell bei höherer Reprogrammierungszeit sowohl die Sakkadenamplitude als auch die Wahrscheinlichkeit einer Einzelsakkadenreaktion wie erwartet systematisch zunimmt (vgl. Tabelle 6.2). Im Falle einer Doppelsakkadenantwort scheint die Dauer der Fixation auf dem ersten Zielreiz in den Bedingungen bis zu einer Reprogrammierungszeit von 110 ms zu sinken, um daraufhin wieder anzusteigen. Interessant ist bezüglich dieses Parameters die Tatsache, dass die Fixationszeiten insgesamt mit durchschnittlich bis zu 120 ms sehr gering sind.

Bezüglich keiner Kategorie der Reprogrammierungszeit zeigt sich ein signifikanter Gruppenunterschied hinsichtlich der untersuchten Parameter. Damit konnten die Hypothesen 1 und 2 nicht bestätigt werden.

Tabelle 6.2: Ergebnisse des *double step*-Paradigmas in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit. Die Sakkadenamplitude bezieht sich auf die initiale Sakkade. Die Fixationsdauer auf 1. Zielreiz betrifft die Fälle, in denen eine Doppelsakkadenantwort erfolgte und beschreibt die Zeit zwischen beiden Sakkaden. Die angegebenen F-Werte beziehen sich auf den Haupteffekt (HE) der Reprogrammierungszeit, den HE Gruppe sowie die Interaktion der Faktoren Reprogrammierungszeit & Gruppe. Signifikante Unterschiede bei $\alpha = 0,05$ sind mit „*“ markiert.

Parameter in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	F-Werte:	
			HE Rep.zeit (4;31)	HE Gruppe (1;34) Interaktion (4;31)
Sakkadenamplitude (°)	< 50 ms	2,93 (0,25)	2,96 (0,41)	
	50-80 ms	3,20 (0,25)	3,23 (0,24)	
	80-110 ms	3,95 (0,36)	3,83 (0,43)	1140,91*
	110-150 ms	5,23 (0,49)	5,28 (0,75)	0,00
	> 150 ms	5,78 (0,33)	5,78 (0,37)	2,06
Wahrscheinlichkeit für eine Einzel-Sakkade (%)	< 50 ms	0 (0)	0,03 (0,11)	
	50-80 ms	0 (0,01)	0,01 (0,03)	
	80-110 ms	0,05 (0,06)	0,06 (0,09)	247,21*
	110-150 ms	0,50 (0,30)	0,52 (0,30)	0,89
	> 150 ms	0,90 (0,20)	0,92 (0,13)	0,40
Fixationsdauer auf 1. Zielreiz (ms)	< 50 ms	133,39 (24,72)	134,57 (23,84)	
	50-80 ms	121,38 (27,02)	128,04 (34,79)	
	80-110 ms	118,37 (25,47)	120,83 (29,03)	3,43*
	110-150 ms	119,49 (25,36)	122,53 (30,71)	1,76
	> 150 ms	147,61 (27,48)	149,21 (28,26)	1,18

Zur visuellen Darstellung des Vergleichs beider Gruppen wurde separat für jede Gruppe eine „Amplitude Transition Function“ berechnet, die die Reprogrammierungszeit (also das Intervall zwischen dem Onset des zweiten Targets und dem Beginn der Augenbewegung) in Beziehung setzt zu der Sakkadenamplitude. Eine weitere Auswertung bezieht sich auf die Wahrscheinlichkeit, in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit anstelle einer

Doppelsakkade eine Einzelsakkade auszuführen (vgl. Kapitel 6.1). Um reliable Datenpunkte zu erhalten, wurde hierbei im Vergleich zu den zuvor dargestellten Ergebnisse über alle Probanden größere Kategorien der Reprogrammierungszeit von 30 ms gewählt. In den Abbildungen 6.6 und 6.7 wird deutlich, dass sich die Gruppen in ihrer Fähigkeit der Reprogrammierung sakkadischer Sequenzen bezüglich beider Variablen nicht unterscheiden. Weiterhin kann in Abbildung 6.7 der typisch lineare Verlauf der Landeposition in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit für beide Gruppen erkannt werden.

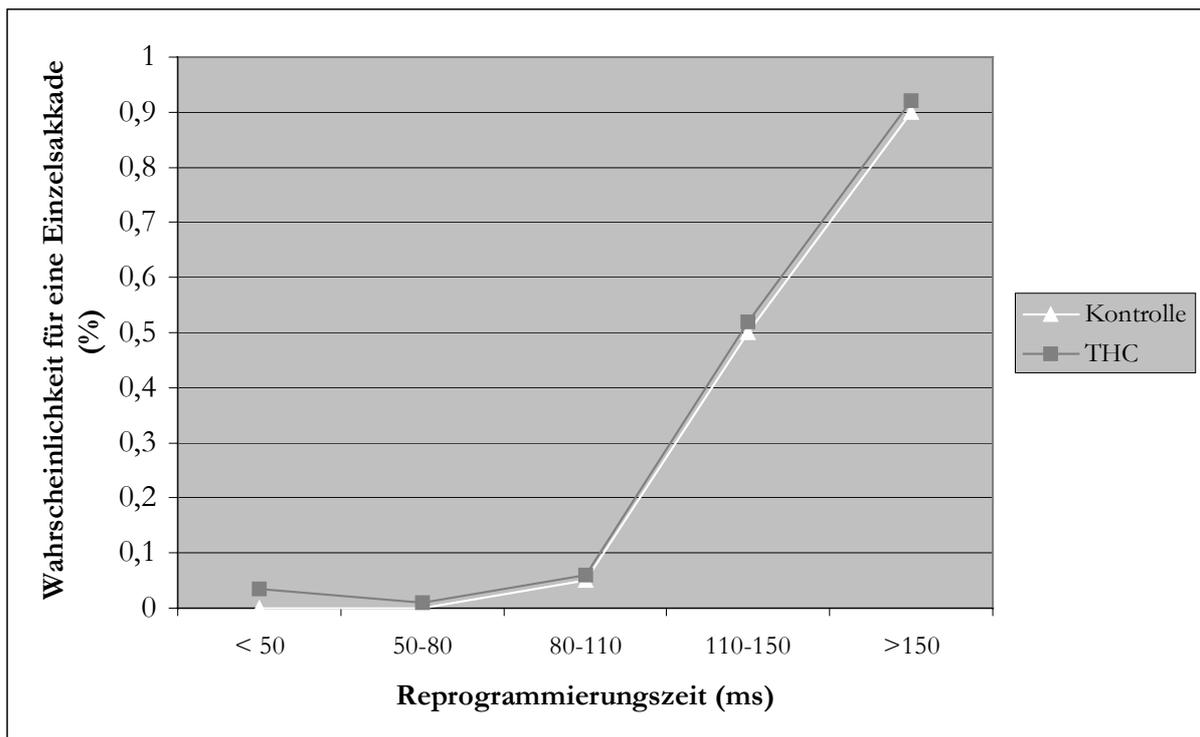


Abbildung 6.6: Wahrscheinlichkeit für eine Einzelsakkade in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit in der *double step*-Aufgabe für die THC- und die Kontrollgruppe.

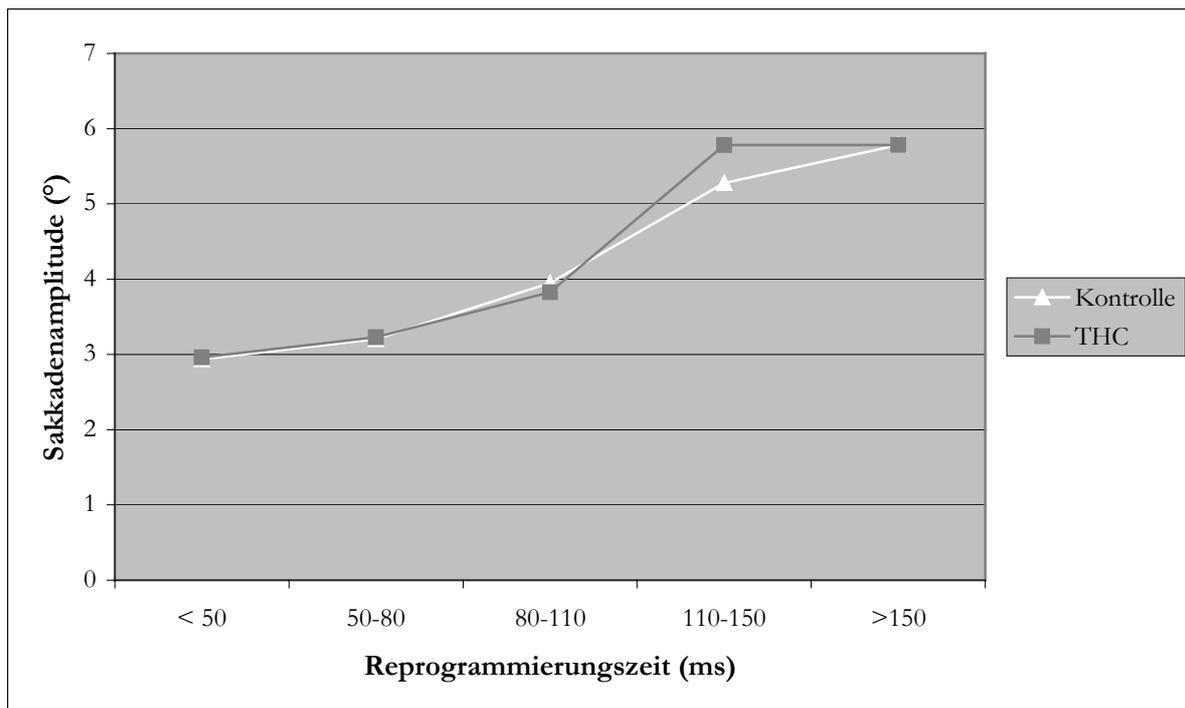


Abbildung 6.7: Sakkadenamplitude in Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit in der *double step*-Aufgabe für die THC- und die Kontrollgruppe.

6.4 Diskussion

Die Ergebnisse in den *single step*-Durchgängen zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen bezüglich der Sakkadenamplitude und bestätigen damit die Ergebnisse aus der Prosakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3.4). Bezüglich der Latenzen ist nur die Richtung des Unterschiedes konform mit den Latenzdifferenzen zwischen den Gruppen, die in den Pro- und Antisakkadenaufgaben gefunden wurden, doch wird dieser Unterschied nicht signifikant. Statistisch signifikant ist allerdings die höhere Varianz in den Latenzen der THC-Gruppe, die somit ansatzweise auf ein Defizit bezüglich der zeitlichen Steuerung hindeutet. Bei dem Vergleich zwischen den Prosakkadenaufgaben und den Einzelreizbedingungen im *double step*-Experiment sind allerdings zwei wichtige Unterschiede zu berücksichtigen. Einerseits sind die *single step*-Trials eingebettet in den Kontext der *double step*-Durchgänge. Diese Einbettung kann zur Folge haben, dass mögliche Unterschiede kleiner ausfallen als bei einer reinen Prosakkadenaufgabe. Zweitens entspricht das hier verwendete Paradigma nicht der Prosakkadenaufgabe, wo entweder eine *Overlap*- oder eine *Gap*-Bedingung implementiert wurde (vgl. Kapitel 3). Bei der vorliegenden Aufgabe verschwindet der Fixationspunkt genau in dem Moment, wo der Zielreiz erscheint (*step*). Des Weiteren ist der Zielreiz nur 3° und nicht 6° vom Fixationspunkt entfernt. Diese Unterschiede schränken damit die Vergleichbarkeit der beiden Aufgaben ein.

Die Ergebnisse bezüglich der *double step*-Durchgänge sind eindeutig. Die klassischen Befunde der Abhängigkeit der Sakkadenamplitude und der Wahrscheinlichkeit einer Einzelsakkadenantwort von dem ISI einerseits und von der zur Verfügung stehenden Reprogrammierungszeit andererseits wurden im vorliegenden Versuch reproduziert. Insgesamt geht aus den Ergebnissen klar hervor, dass zwischen den Gruppen keine Unterschiede in der Fähigkeit der Integration neuer Information in die Sakkadenprogrammierung bestehen. Lediglich bei einem ISI von 100 ms scheinen die Cannabisprobanden eher zu einer Einzelsakkadenreaktion zu neigen, wobei diese Tendenz nicht signifikant ist und in hypothesenkonträre Richtung weist. In Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit lässt sich ein ähnlicher Unterschied bezüglich dieses Parameters zudem nicht mehr finden, so dass der Unterschied vermutlich nicht auf einen real existierenden Gruppenunterschied hindeutet. Dies spricht für eine Unversehrtheit der Funktionen der supplementären Motorareale (vgl. Kapitel 3.1.2)².

Auch die klassischen Befunde bezüglich der Latenz der initialen Sakkade und der Dauer der Fixation auf dem ersten Zielreiz (3°) wurden bestätigt. Becker & Jürgens wählten 1979 anstelle der Dauer der Fixation auf dem ersten Reiz die Zeitdifferenz zwischen dem Onset der ersten und der zweiten Sakkade als Intervall, so dass dort zusätzlich die Dauer der ersten Sakkade miteinberechnet wurde. Dies ändert aber nichts an dem grundsätzlichen Effekt, dass sich bei zunehmender Reprogrammierungszeit die Verweildauer auf der Position des ersten Stimulus verkürzt, was in dieser Untersuchung bestätigt werden konnte. Bezüglich der Dauer der Fixation auf den 3° entfernten Reizen konnte ebenfalls bestätigt werden, dass diese sehr kurz sein kann, mit Mittelwerten in einigen Bedingungen von nur 120 ms.

Interessant aus grundlagenorientierter Perspektive ist eine genauere Betrachtung der „Amplitude Transition Function“ (s. Abbildung 6.5). Erst nach frühestens 60 ms ist das visuomotorische System in der Lage, die Zielposition zu modifizieren, was sich in einem Anstieg der Kurve zeigt. Nach ca. 150 ms hingegen besteht ausreichend Zeit, die Modifikationen der Landekoordinaten vollständig umzusetzen, das Auge landet also an der Stelle des peripheren Targets bei ca. 6°. Damit ist deutlich, dass zur Berücksichtigung neuer visueller Information mindestens 60 ms benötigt werden, während 150 ms ausreichen, um die zumindest in diesem Paradigma geforderte Neuberechnung der Landekoordinaten erfolgreich abzuschließen. Dies setzt möglichen Theorien zum Timing, Cancelling und zur Informationsaufnahme bei Sakkaden klare Grenzen (vgl. Deubel et al., 2000, für eine ausführliche Diskussion). Bei Betrachtung des zweiten wichtigen Parameters,

² Für weitere neurophysiologische Implikationen vgl. Kapitel 9.

nämlich der Wahrscheinlichkeit, mit einer Einzelsakkade zu antworten, ergibt sich eine systematische Verschiebung dieses Zeitfensters nach hinten (s. Abbildung 6.4). Hierbei tritt eine relevante Veränderung erst ab einer Reprogrammierungszeit von etwa 90 ms auf, und das endgültige Niveau ist erst etwas später, mit etwa 160 ms erreicht. Dies könnte zu dem Schluss führen, dass die Parametrisierung der Amplitude ein Prozess ist, der unabhängig von der Entscheidung abläuft, ob mit einer Einzel- oder Doppelsakkade reagiert werden soll, und etwas früher abgeschlossen ist. Spekulationen hierüber müssten jedoch in weiteren Experimenten geklärt werden und stehen nicht im Fokus der vorliegenden Untersuchung. Insgesamt entsprechen die berichteten Werte ungefähr der in einer Experimentalreihe von Ottes et al. (1984) angesetzten Zeit von 70 bis 90 ms vor Ausführung einer Sakkade, während der keine neue Information mehr die Sakkadenparameter beeinflussen kann.

Zusammenfassend kann damit einerseits festgestellt werden, dass die klassischen Befunde von Becker & Jürgens (1979) über alle Probanden reproduziert werden konnten, und dass sich andererseits die Cannabisgruppe in ihrer Fähigkeit zur Reprogrammierung von Sakkaden offensichtlich nicht von der Kontrollgruppe unterscheidet.

7. Experiment 6: Visuelle Spanne

Das Muster der Blickbewegungen in der visuellen Suchaufgabe (vgl. Kapitel 2) hat gezeigt, dass zur Prüfung, ob ein spezifizierter Zielreiz im Suchfeld vorhanden ist oder nicht, eine Fixation jedes einzelnen Items innerhalb der Suchmatrix nicht notwendig ist. Wie auch z.B. beim Lesen kann mit einer einzigen Fixation nicht nur im Bereich der Fovea, sondern auch außerhalb Information extrahiert werden. Der Bereich, innerhalb dessen während einer Fixation Information aufgenommen werden kann, wird visuelle Spanne genannt¹. Die Größe dieser visuellen Spanne ist intra- und interindividuell verschieden sowie abhängig vom zu verarbeitenden Informationstyp (s.u.). Vor dem Hintergrund der Defizite der THC-Gruppe in der visuellen Suche (vgl. Kapitel 2) ist es naheliegend, die mittlere Größe der visuellen Spanne bei den Cannabisprobanden zu überprüfen. Schließlich spricht einiges dafür, dass die reduzierte Leistung in der visuellen Suche auf ein Defizit in der Verarbeitung von Reizen in der Peripherie zurückzuführen ist, was zusätzlich die kürzeren Sakkaden der THC-Gruppe in dieser Aufgabe erklären könnte.

Um die visuelle Spanne direkt testen zu können, wurde ein Experiment zur peripheren Reizdiskrimination entwickelt, das in diesem Kapitel vorgestellt werden soll. Um eine Verbindung zu alltäglichen Anforderungen herzustellen, sollten die Probanden in diesem Experiment nicht sinnlose Reize, sondern kurz an unterschiedlichen Exzentrizitäten in der Peripherie dargebotene Buchstaben erkennen. Die kurze Darbietungsdauer (s.u.) schloss dabei eine Sakkade zum Zielreiz aus. Neben der Erkennung des Buchstabens wurden die Probanden zusätzlich instruiert, eine Sakkade zur Position des Zielreizes durchführen, der in der Zwischenzeit durch ein Quadrat maskiert wurde. Diese Aufgabe entspricht in einigen Punkten den Prozessen beim Lesen, wo ebenfalls Information in der Peripherie verarbeitet und gleichzeitig eine Sakkade programmiert werden muss (vgl. Kapitel 8). Das Experiment ist in seinen wesentlichen Parametern (quadratisches Sakkadenziel, Lokation der Zielreize) mit den zuvor berichteten Experimenten vergleichbar. Um die Relevanz des Gap-Paradigmas (vgl. Kapitel 3 und 4) in einer komplexeren, realitätsnäheren Aufgabe und in Bezug auf die Erkennensleistung zu überprüfen, wurden in diesem Experiment ebenso Gap- und Overlap-Bedingungen eingeführt.

Im berichteten Experiment zur visuellen Suche (vgl. Kapitel 2.3) wurde bereits eine indirekte Analyse der parafovealen visuellen Verarbeitung durchgeführt. Bei der Betrachtung des Zusammenhanges der Fixationsdauer und der je vorigen Sakkadenlänge zeigten sich zwischen

¹ Alternative Bezeichnungen zum Terminus „visuelle Spanne“ werden im nachfolgenden Kapitel 7.1 diskutiert.

den der THC- und der Kontrollgruppe keine Unterschiede. Fixationsdauern sind nach langen Sakkaden allgemein länger als nach kurzen, was als Hinweis darauf zu werten ist, dass an einer weiter entfernten neuen Fixationsposition weniger Vorinformation aus der vorherigen Fixation zur Verfügung steht. Trotz dieses ersten Hinweises soll im vorliegenden Experiment die periphere Erkennungsleistung zusätzlich direkt getestet werden.

7.1 Periphere Buchstabenerkennung: Theoretischer Hintergrund

Eine klassische Definition der visuellen Spanne (*visual span*) findet sich bei O'Regan (1990) und bezeichnet dort die Distanz in beide Richtungen des Fixationspunktes, innerhalb der Buchstaben einer bestimmten Größe noch erkannt werden können. Da beim normalen Lesen Buchstaben immer noch von anderen Buchstaben flankiert werden, ist die visuelle Spanne dabei reduziert. Von der visuellen Spanne muss die sogenannte Wahrnehmungsspanne (*perceptual span*) im Sinne von McConkie & Rayner (1975) unterschieden werden, die eher funktional in Bezug auf das Lesen definiert ist und zusätzlich zur Buchstabenerkennung die Detektion von Wortlängeninformation und der Position von Leerzeichen mit einschließt. Diese Spanne erstreckt sich nach Rayner & McConkie (1976) etwa 15 Buchstaben nach rechts sowie 4 Buchstaben nach links. In der Leseforschung wird heute diese Wahrnehmungsspanne aufgrund verschiedener Informationstypen, wie z.B. der orthographischen, semantischen oder Wortlängeninformation unterschieden (vgl. Radach, 2003). Eine wichtige Methode zu ihrer Überprüfung ist das sogenannte „moving-window“-Paradigma. Dabei wird in Abhängigkeit vom Fixationsort immer nur ein bestimmter (variabel großer) Ausschnitt des zu lesenden Textes dargeboten. Wenn dieser Ausschnitt eine kritische Grenze überschreitet, sind keine Einbußen des Leseverhaltens mehr messbar, so dass angenommen werden kann, dass der *perceptual span* überschritten wurde (vgl. Rayner, 1998, für eine Übersicht der Befunde). Alternativ zur visuellen Spanne sind ebenfalls die Begriffe „useful field of view“ (UFOV) bzw. „functional field of view“ (FFOV) geläufig. Ball et al. (1988) definieren die UFOV als den gesamten visuellen Bereich, innerhalb dessen ohne Augen- oder Kopfbewegungen Information aufgenommen werden kann und liefern gleichzeitig ein spezifiziertes Verfahren zur Erfassung des UFOV. Vor allem in Untersuchungen zur Verkehrspsychologie wird im Zusammenhang mit einem möglichen „Tunnelblick“ bei der gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Aufgaben häufig vom FFOV gesprochen (z.B. Crundall et al., 1999).

Mitte der 80er Jahre wurde eine Debatte darüber geführt, inwieweit unterschiedliche Leistungen der peripheren Buchstabenerkennung mit Dyslexien zusammenhängen könnten (Geiger & Lettvin, 1987). Nachfolgende Experimente replizierten einen solchen Zusammenhang jedoch nicht (Klein et al., 1990). Neuere Studien versuchen eine Verbindung zwischen den Profilen der visuellen Spanne und der Lesegeschwindigkeit nachzuweisen. In einer Untersuchung von Chung et al. (2004) wird postuliert, dass für die Lesegeschwindigkeit die visuelle Spanne einen zentralen Flaschenhals darstellt, dessen Kapazität sich jedoch trainieren lasse (vgl. auch Legge et al., 2001).

Eine Zusammenfassung der Einflüsse auf die Leistung bei der peripheren Buchstabenerkennung ist in einer neueren Studie von MacKeben (1999) festgehalten. Es zeigte sich eine Leistungsverbesserung durch die Präsentation von Hinweisreizen etwa eine Sekunde vor Zielreizpräsentation (Cueing). Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass die Erkennung von auf der Horizontalen angeordneten Buchstaben am besten ausfiel. Darüber hinaus sind große interindividuelle Unterschiede anzutreffen, während innerhalb einer Person die Leistung von Kontrast und Größe der Zeichen, der Präsentationsdauer sowie von der zusätzlichen kognitiven Belastung abhängt. Der letztere Befund konnte in anderen Kontexten bestätigt werden: Aus der Lese- und auch der Verkehrsforschung ist bekannt, dass bei höherer mentaler Belastung oder bei älteren Menschen die Fähigkeit zur Extraktion von Information aus der Peripherie abnimmt (vgl. z.B. Rayner, 1998; Crundall et al., 1999).

Experimente von Radach, Huckauf & Heller (1999) konnten in einem dual task-Paradigma zeigen, dass die Erkennensleistung von peripher dargebotenen Buchstaben, deren Erkennung durch Flankierbuchstaben erschwert wurde, direkt in Bezug zur Genauigkeit der nachfolgenden Sakkade zu dem zu erkennenden Zielbuchstaben stand. Die Buchstaben wurden dabei nur so kurz präsentiert, dass bei Beendigung der Sakkade kein visueller Input mehr vorhanden sein konnte. Dieser Befund bestätigt die enge Kopplung von Aufmerksamkeitsprozessen zum Zweck der Erkennung (selection for recognition) und okulomotorischen Vorbereitungsprozessen (selection for action). Dieser Interpretation liegt ein Verständnis von Aufmerksamkeit als einem Selektionsprozess zugrunde, der aufgrund verschiedener Zielstellungen, nämlich Erkennung und Motorik, unterteilt werden kann².

² vgl. auch Deubel & Schneider (1996) für inzwischen klassische Befunde zur engen Kopplung von Aufmerksamkeit und prämotorischen Prozessen.

Aus dem im vorherigen Abschnitt Gesagten ergibt sich in Zusammenhang mit den Ergebnissen aus der visuellen Suche bezüglich möglicher Defizite der THC-Gruppe in dieser Aufgabe folgende zentrale Hypothese:

H1: Die Erkennensleistung bezüglich kurzzeitig dargebotener Buchstaben in der Peripherie ist in der THC-Gruppe gegenüber der Kontrollgruppe vermindert, insbesondere bei den weiter entfernt dargebotenen Reizen.

Im Anschluss an die Ergebnisse aus der Prosakkaden-Aufgabe, dass visuell geführte Sakkaden für die THC-Gruppe genauso präzise sind wie in der Kontrollgruppe, lässt sich folgende zweite Hypothese aufstellen:

H2: Die Sakkadenamplituden in dieser Aufgabe sind in der THC-Gruppe nicht signifikant von denen der Kontrollgruppe verschieden.

Da es sich um direkte Reaktionen auf periphere Reize handelt, sollten sich auch die Latenzunterschiede aus der Pro- und Antisakkadenaufgabe replizieren lassen. Daher wird folgende Hypothese aufgestellt:

H3: Die sakkadischen Reaktionszeiten sind in der THC-Gruppe signifikant verlängert gegenüber der Kontrollgruppe.

7.2 Methode

Die Probanden sowie die Apparatur entsprechen denen der vorhergehenden Experimente (vgl. Kapitel 2.2.1 und 2.2.3).

Die Probanden blickten während eines Durchgangs für 1500 ms auf einen zentralen Fixationspunkt. Danach erschien an einer von 4 Positionen (3° oder 6° links bzw. rechts) für 90 ms ein Buchstabe, der durch ein Quadrat maskiert wurde. Dieser Maskierreiz wurde 800 ms dargeboten. Die Hälfte der Durchgänge bestand aus Overlap-Durchgängen und die andere aus Gap-Durchgängen mit einer Gap-Periode von 200 ms wie in der Pro- und Antisakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3 und 4). Die Probanden wurden instruiert, zusätzlich zum Erkennen des Buchstabens eine Sakkade zu dem Quadrat auszuführen. Die Präsentation des Buchstabens war

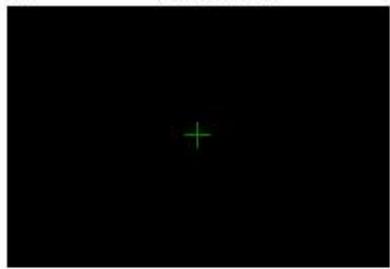
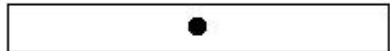
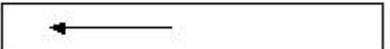
so kurz, dass keine Sakkade am Zielort ankommen konnte, während der Buchstabe noch zu sehen war. Nach dem Erlöschen des Quadrats sollten die Probanden wieder auf das zentrale Fixationskreuz in der Mitte schauen, das für 1000 ms dargeboten wurde. Danach erschien eine virtuelle Tastatur auf dem Monitor, auf der alle 10 möglichen Buchstaben des Experimentes (A, C, D, H, I, K, R, S, V, W) sowie ein Fragezeichen („?“) enthalten waren, die mit den Cursorstasten der tatsächlichen Tastatur von den Probanden angesteuert werden konnten. Per Leertaste wurde der durch die Cursorbewegung gewählte Buchstabe bestätigt. Damit war der Durchgang beendet und der nächste wurde wieder mit der Präsentation des zentralen Fixationskreuzes begonnen (vgl. Abbildung 7.1). Die dargebotenen Buchstaben bestanden aus 10 weitgehend unähnlichen Buchstaben in Courier-Schrift³. Die Buchstaben sollten möglichst unähnlich sein, damit potentielle Leistungsunterschiede auf periphere visuelle und nicht orthographische Verarbeitungsprozesse (Buchstabenverwechslungen) zurückzuführen sind. Die Probanden waren instruiert, das Fragezeichen nur dann auszuwählen, wenn sie nicht einmal die geringste Vermutung darüber hatten, welchen Buchstaben sie zuvor gesehen hatten. Durch diese Instruktion sollte insgesamt eine eher reaktionsfreudige Antworttendenz (laxes Kriterium) erzeugt werden, da einige Probanden sich trotz deutlich überzufälliger Trefferquote niemals absolut sicher waren. Insgesamt bestand jedes Experiment aus 240 Durchgängen, in denen die Bedingungen quasirandomisiert dargeboten wurden und dauerte etwa 45 Minuten. Die 240 Durchgänge wurden in 8 Blöcke zu je 30 Durchgängen unterteilt, um den Probanden Gelegenheit zu Pausen zu geben. Vor diesen Experimental-Blöcken wurde in einem umfangreichen Probekblock (ca. 5-10 Minuten) das Experiment ausführlich erklärt und trainiert, bis die Probanden die Instruktion verstanden und die ersten Buchstaben richtig erkannten.

Die Darbietungsdauer der Buchstaben wurde in umfangreichen Vorexperimenten so bestimmt, dass die Antwortgenauigkeiten über mehrere Personen maximal diagnostisch war, also in keiner der beiden Exzentrizitätsbedingungen ein Boden- oder Deckeneffekt produziert wurde.

³ Derselbe Schrifttyp wurde auch im Leseexperiment (Kapitel 8) verwendet.

Periphere Buchstabenerkennung (Gap):

Screenshots und korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)

1 1500 ms  	2 200 ms (Gap)  
3 90 ms  	4 800 ms  
5 1000 ms  	6 X ms (bis Tastendruck)  

Periphere Buchstabenerkennung (Overlap):

Screenshots und korrespondierende Blickbewegungen (*darunter*)

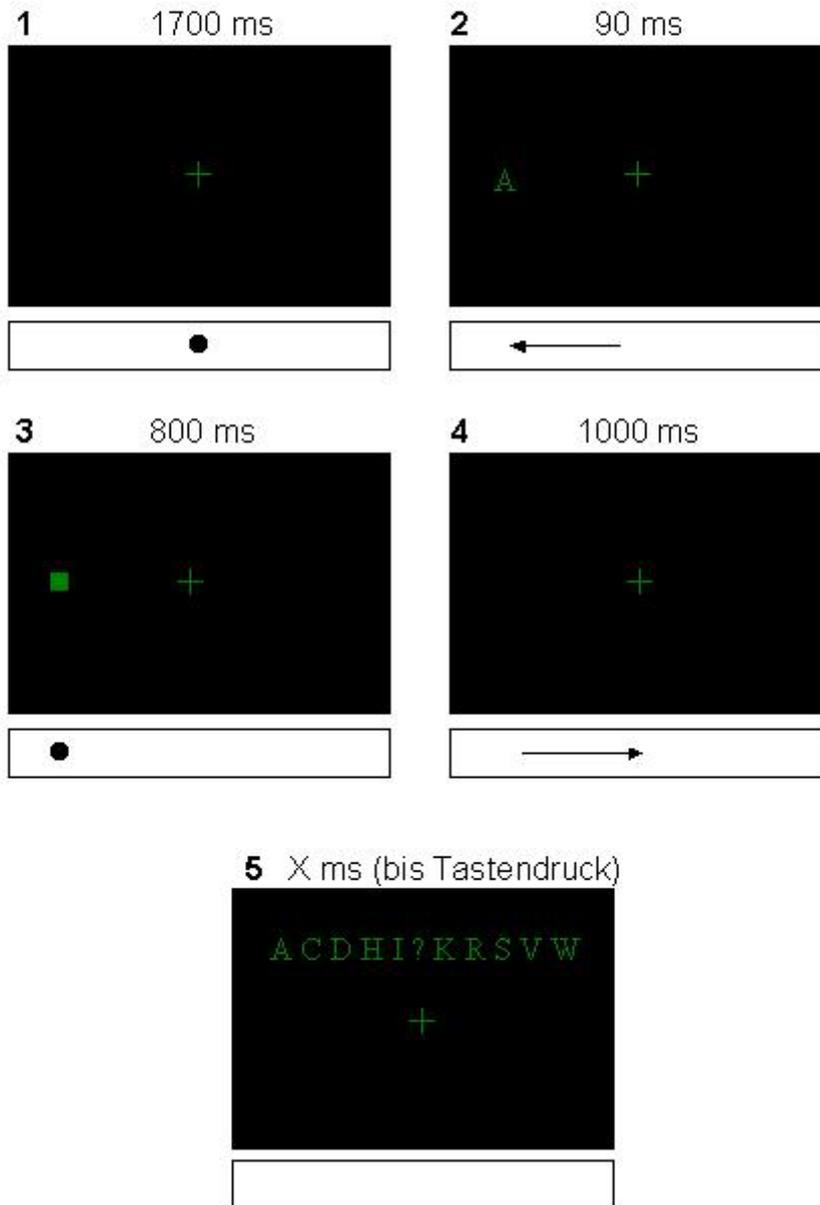


Abbildung 7.1: Paradigma der peripheren Buchstabenerkennung: Ablauf eines Gap- (vorige Seite) bzw. Overlap-Durchgangs (oben) mit links erscheinendem Zielreiz. Die Reize der Screenshots sind verhältnismäßig größer als im Original. Angegeben sind jeweils die Darbietungszeiten (oben) sowie die instruierten Blickbewegungen (darunter). In Abbildung 5 muss der Proband mit den Pfeiltasten der Tastatur den richtigen Buchstaben ansteuern und bestätigen.

7.3 Ergebnisse

Leider sind zwei Datensätze aus der Kontrollgruppe in diesem Experiment aus technischen Gründen unvollständig. Um eine maximale Vergleichbarkeit mit den vorigen Experimenten zu

ermöglichen, sollen diese zwei Probanden nicht ersetzt werden, so dass sich die nachfolgend dargestellten Ergebnisse nur auf 18 Kontrollprobanden beziehen.

Erkennungsleistung, Sakkadenamplituden & Latenzen

Zur Prüfung der Haupteffekte „Bedingung“ (Gap vs. Overlap), Exzentrizität und Gruppe auf die abhängigen Variablen Erkennungsleistung, Sakkadenamplitude und Latenz wurde eine dreifaktorielle ANOVA durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Ergebnisse der peripheren Buchstabenerkennung in den Overlap- und Gap-Durchgängen zu 3° und 6° entfernten Zielreizen. Die Mittelwerte sind jeweils für die THC- und Kontrollgruppe angegeben. Standardabweichungen sind in Klammern notiert.

Bedingung / Parameter	3° Exzentrizität		6° Exzentrizität		
	Kontrolle	THC	Kontrolle	THC	
Overlap	% richtige Antworten	70,0 (17,2)	69,5 (17,8)	42,3 (15,1)	45,1 (16,0)
	Sakkadenamplitude (°)	2,89 (0,28)	2,92 (0,30)	5,57 (0,40)	5,52 (0,72)
	Sakkadenlatenz (ms)	186,13 (31)	182,36 (37)	187,77 (35)	187,37 (38)
Gap	% richtige Antworten	73,7 (15,7)	76,4 (16,3)	44,2 (15,2)	45,6 (19,6)
	Sakkadenamplitude (°)	2,83 (0,25)	2,87 (0,21)	2,83 (0,25)	2,87 (0,21)
	Sakkadenlatenz (ms)	147,35 (23)	151,44 (31)	145,35 (27)	149,47 (28)

Die interessanteste Variable ist die Buchstabenerkennungsleistung in Abhängigkeit von der Buchstabenexzentrizität, gemittelt über alle Bedingungen. Im Mittel erkannte die Kontrollgruppe von den 3° entfernten Reizen 71,9% (s=16), die THC-Gruppe 72,9% (s=16,6). Bei den 6° entfernten Reizen hat die Kontrollgruppe 43,3% (s=14,6), die THC-Gruppe 45,3% (s=17,4) erkannt (vgl. Abbildung 7.2).

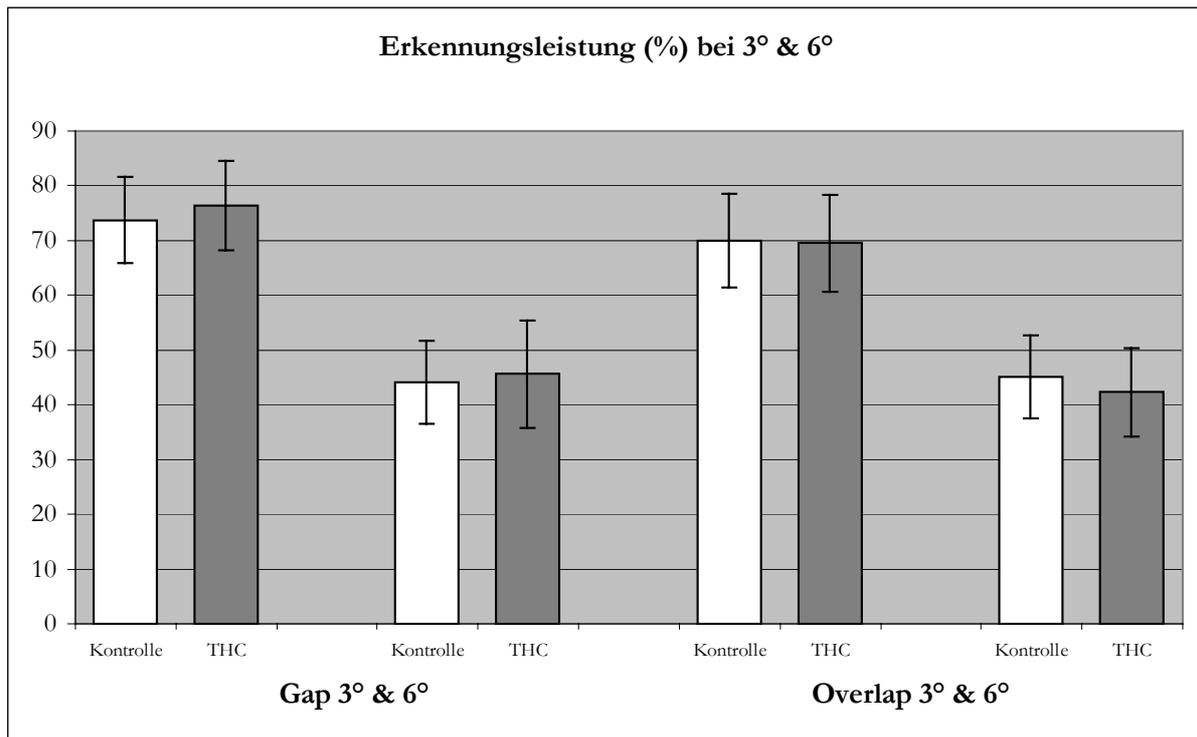


Abbildung 7.2: Erkennungsleistung bei einer Zielreizentfernung von 3° und 6° in Abhängigkeit von Gap- und Overlap-Durchgängen für die Kontroll- und THC-Gruppe. Die Gruppenunterschiede sind in keiner Bedingung signifikant (vgl. Text). Die Erkennungsleistung ist für die Gap-Durchgänge im Vergleich zur Overlap-Bedingung signifikant erhöht.

Bezüglich der Erkennungsleistung fand sich ein signifikanter Effekt der „Bedingung“ (Gap vs. Overlap: $F(1,36) = 13,36$; $p < 0,01$) und der Exzentrizität ($F(1,36) = 571$; $p < 0,01$), nicht aber der Gruppe ($F(1,36) = 0,09$; $p > 0,05$). Die Interaktionen zwischen dem Faktor Gruppe und den beiden anderen Faktoren waren nicht signifikant, wohl aber die Interaktion zwischen Exzentrizität und „Bedingung“ (Gap vs. Overlap: $F(1,36) = 4,66$; $p < 0,05$): Der Gap-Effekt ist signifikant größer bei 3° als bei 6° Exzentrizität. Insgesamt konnte damit ein Gruppenunterschied bezüglich der Erkennungsleistung (Hypothese 1) nicht bestätigt werden. Da dieses Experiment zum ersten Mal die Erkennungsleistung von Buchstaben in Abhängigkeit von einer Gap-Bedingung messbar macht, seien die diesbezüglichen Ergebnisse genauer berichtet. Über alle Probanden beträgt die Erkennungsleistung für die 3° entfernten Buchstaben in der Overlap-Bedingung 69,8% ($s = 17,3$) und in der Gap-Bedingung 75,1% ($s = 15,9$). Die Erkennungsleistung für die 6° entfernten Buchstaben beträgt in der Overlap-Bedingung 43,7% ($s = 15,4$) und in der Gap-Bedingung 45,0% ($s = 17,4$). Dieser Effekt ist für die 3° entfernten Buchstaben als einfacher Haupteffekt (EHE, $\alpha = 0,05$ Bonferroni-adjustiert) signifikant ($t = 4,21$), nicht jedoch für die 6°-Bedingung ($t = 0,91$).

Bezüglich der Sakkadenlatenz (vgl. Abbildung 7.3) fand sich ein signifikanter Effekt der „Bedingung“ (Gap vs. Overlap: $F(1,36) = 272$; $p < 0,01$), aber nicht der Exzentrizität ($F(1,36) = 0,21$; $p > 0,05$), und ebenfalls nicht der Gruppe ($F(1,36) = 0,01$; $p > 0,05$), womit sich Hypothese 3 nicht bestätigt. Keine der Interaktionen war signifikant.

Bezüglich der Sakkadenamplitude (vgl. Abbildung 7.4) fand sich kein signifikanter Effekt der „Bedingung“ (Gap vs. Overlap: $F(1,36) = 0,18$; $p > 0,05$), wohl aber der Exzentrizität ($F(1,36) = 4,54$; $p < 0,05$), aber nicht der Gruppe ($F(1,36) = 0,04$; $p > 0,05$). Keine der Interaktionen war signifikant.

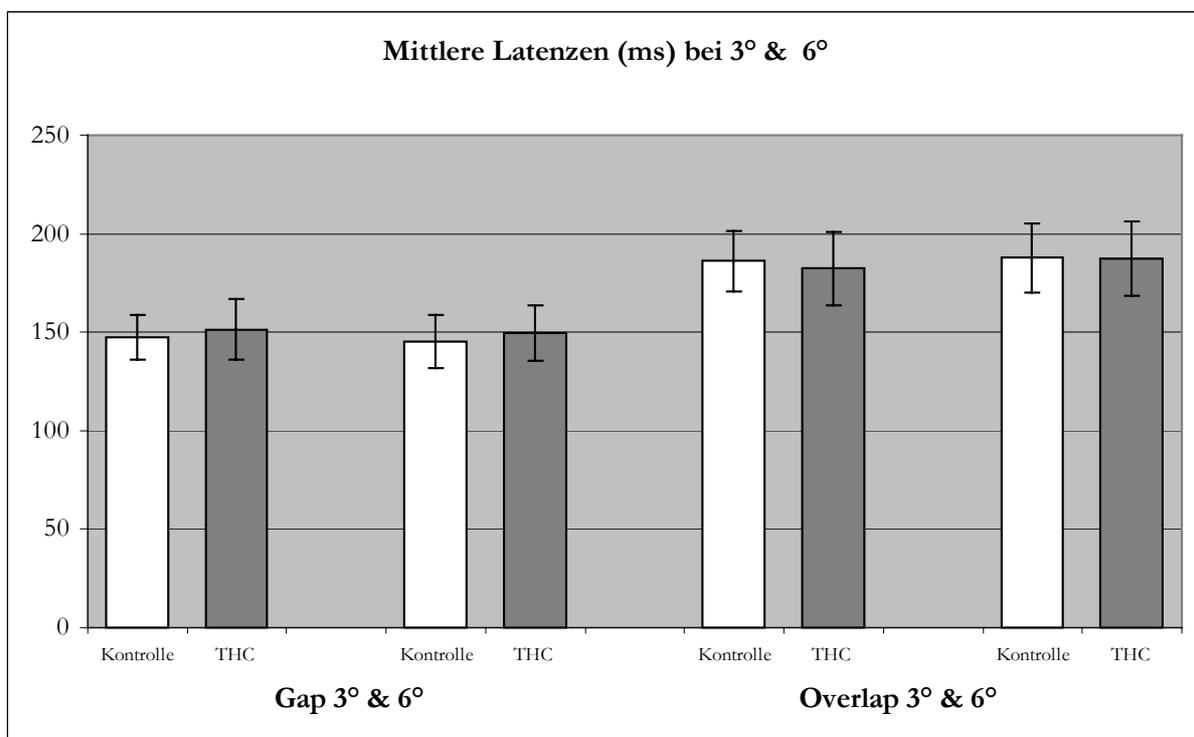


Abbildung 7.3: Mittlere sakkadische Latenzen bei einer Zielreizentfernung von 3° und 6° in Abhängigkeit von Gap- und Overlap-Durchgängen für die Kontroll- und THC-Gruppe. Die Gruppenunterschiede sind in keiner Bedingung signifikant (vgl. Text).

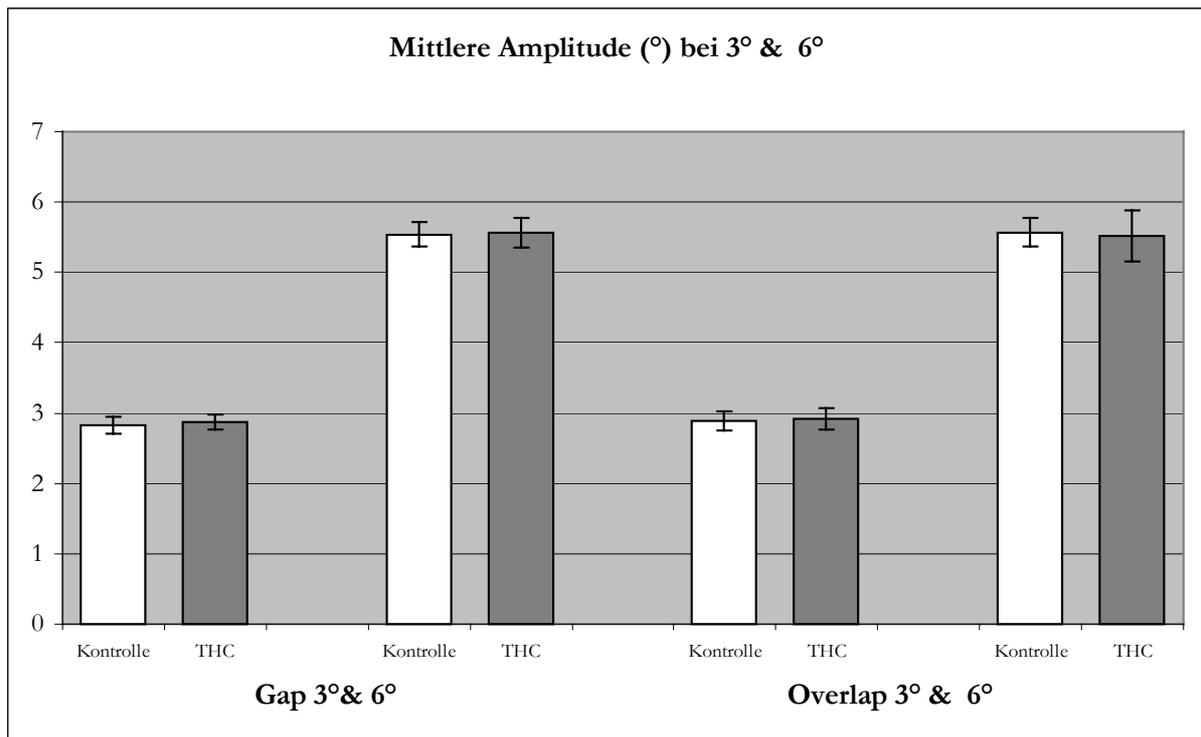


Abbildung 7.4: Mittlere Amplitude bei einer Zielreizentfernung von 3° und 6° in Abhängigkeit von Gap- und Overlap-Durchgängen für die Kontroll- und THC-Gruppe. Die Gruppenunterschiede sind in keiner Bedingung signifikant (vgl. Text).

Bezüglich keiner der Variablen Sakkadenamplitude und –latenz ist somit ein signifikanter Gruppenunterschied vorhanden. Damit kann die zweite Hypothese bestätigt werden, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen bezüglich der Sakkadenamplituden besteht (vgl. Abbildung 7.4). Die dritte Hypothese, dass die THC-Gruppe längere sakkadische Reaktionszeiten aufweist, kann nicht bestätigt werden (vgl. Abbildung 7.3).

weitere Ergebnisse

Interessant sind weiterhin die Ergebnisse bezüglich des Einflusses der Richtung der Sakkade auf die Anzahl korrekter Antworten sowie die Sakkadenamplitude (s. Tabelle 7.2). Es besteht kein Richtungseffekt bezüglich der Antwortgenauigkeit, wohl aber bezüglich der Sakkadenamplitude. Sakkaden nach links sind signifikant um etwa 1/4° länger und damit näher am Zielreiz als Sakkaden nach rechts.

Tabelle 7.2: Richtungseffekte auf Antwortgenauigkeit und Sakkadenamplitude bei der peripheren Buchstabenerkennung. Standardabweichungen sind in Klammern notiert. Signifikante t-Werte bei $\alpha = 0,05$ sind mit „*“ markiert.

Bedingung / Parameter		links	rechts	t-Wert (df=38)
3° Exzentrizität	% korrekt	71,6 (18)	73,3 (15)	1,26
	Amplitude (°)	3,00 (0,22)	2,75 (0,29)	6,47 *
6° Exzentrizität	% korrekt	43,9 (16)	44,8 (17)	0,53
	Amplitude (°)	5,66 (0,41)	5,44 (0,47)	5,13 *

Zur Ermittlung möglicher *time on task*-Effekte auf die interessierenden Parameter Sakkadenamplitude, Antwortgenauigkeit und Latenzen wurden die Mittelwerte aus den ersten 60 Durchgängen von den Mittelwerten der letzten 60 Durchgänge abgezogen. Damit konnten Differenzwerte der genannten Parameter gebildet werden, und zwar getrennt für die Overlap- und Gap-Bedingungen sowie die beiden Exzentrizitäten. Im Mittel veränderten sich diese Parameter jedoch nicht signifikant, und es konnten keine Gruppenunterschiede festgestellt werden.

Ein weiterer Parameter, der sich in dieser Aufgabe untersuchen lässt, ist die Sakkadengeschwindigkeit. Es ist bekannt, dass die Sakkadengeschwindigkeit als ein Parameter für Müdigkeit gelten kann. In dieser Aufgabe, die durch eine hohe Schwierigkeit und eine lange Dauer (ca. 45 Minuten) gekennzeichnet ist, lohnt sich daher eine Analyse der Sakkadengeschwindigkeiten der zu den Zielreizen gerichteten Sakkaden. Die Sakkaden zurück zum Fixationspunkt in der Mitte lassen sich nicht auswerten, da in vielen Fällen die Probanden entgegen der Instruktion nicht zurückgekehrt sind, sondern in der Peripherie auf das Erscheinen der virtuellen Tastatur gewartet haben. Die maximale Geschwindigkeit verringert sich in der 3°-Bedingung von 238°/s (42) auf 230°/s (44) und in der 6°-Bedingung von 345°/s (57) auf 340°/s (61). Der Unterschied in der 3°-Bedingung ist über alle Probanden signifikant ($t(39) = 2,26$, $p < 0,05$), aber nicht in der 6°-Bedingung ($t(39) = 0,98$, $p > 0,05$). Weder in der 3°-Bedingung ($t(38) = 0,35$; $p > 0,05$) noch in der 6°-Bedingung ($t(38) = 0,25$, $p > 0,05$) ist jedoch ein Gruppenunterschied festzustellen.

Zuletzt wurden punktbiserial Korrelationen zwischen der Genauigkeit der Sakkaden relativ zum Zielreiz und der Erkennungsleistung berechnet⁴. Weder für die 3°-Bedingung ($r_{pb} = -0,032$) noch

⁴ Die angegebenen Korrelationen beziehen sich auf Mittelwerte der für jeden Probanden einzeln berechneten Korrelationen.

für die 6°-Bedingung ($r_{pb} = 0,014$) besteht ein signifikanter Zusammenhang. Auch der Zusammenhang von Erkennungsleistung und Sakkadenlatenz ist nicht signifikant (3°: $r_{pb} = -.09$, 6°: $r_{pb} = -.04$). Demgegenüber sind die Korrelationen von der Sakkadenlatenz und der Sakkadengenauigkeit für die 3°-Bedingung ($r_{pb} = -.350$) und für die 6°-Bedingung ($r_{pb} = -.422$) signifikant. Dies bedeutet, dass eine genauere Sakkade mit einer höheren Latenz einhergeht.

7.4 Diskussion

Das Experiment zur peripheren Buchstabenerkennung sollte der Einschätzung dienen, inwieweit die visuelle Spanne bei den Cannabisprobanden geringer ausfällt als bei den Kontrollprobanden. Eine Bestätigung der diesbezüglichen Hypothese 1 hätte eine Erklärung für die schlechtere Leistung der THC-User in der visuellen Suche bilden können. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass diese Hypothese nicht bestätigt werden kann. Damit kann festgehalten werden, dass zwischen den Gruppen keine nachweisbaren Unterschiede bezüglich der visuellen Spanne bestehen.

Ebenso unterscheidet sich die Sakkadenamplitude nicht signifikant zwischen den Gruppen. Dies wäre aufgrund der Ergebnisse aus dem Prosakkadenparadigma (vgl. Kapitel 3) auch nicht zu erwarten gewesen, da es sich um zielgerichtete visuell geführte Sakkaden handelt. Somit kann Hypothese 2 als bestätigt gelten.

Weiterhin diskussionswürdig sind die Ergebnisse zur Latenz. Auch hierbei zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Aufgrund der Ergebnisse aus der Prosakkadenaufgabe (Kapitel 3) hätte jedoch gemäß Hypothese 3 erwartet werden können, dass sich hier eine Verlangsamung der Reaktionszeit für die THC-Gruppe zeigt. Betrachtet man die absoluten Werte, so sind diese ungefähr mit den Werten aus der Prosakkadenaufgabe vergleichbar, sowohl in der Overlap- als auch in der Gap-Bedingung. Dennoch ist zu bedenken, dass diese Aufgabe subjektiv als deutlich schwieriger empfunden wurde, da die Erkennungsaufgabe zu der einfachen sakkadischen Reaktion hinzutritt. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang außerdem, dass einige Probanden während des Versuchs mehrmals dazu aufgefordert werden mussten, die Sakkade zu den Zielreizen tatsächlich auszuführen, da diese bisweilen über mehrere Durchgänge ausblieb. Dieses Verhalten führte aufgrund der kurzen Darbietungszeit der Buchstaben nicht notwendig zu einer Leistungsverringerung, da die Buchstaben bei Ankunft der Sakkade immer schon maskiert waren. Aus dieser Tatsache lässt sich erkennen, dass bei diesem Experiment nicht im strengen

Sinn von reflexiven Sakkaden gesprochen werden kann und daher nicht die entsprechenden Effekte wie in der Prosakkadenaufgabe erwartet werden können. Außerdem zeigten schon die Ergebnisse zu den single step-Durchgängen in der double step-Aufgabe (Kapitel 6.3), dass durch einen komplexeren Kontext sowie veränderte Bedingungen Reaktionszeitunterschiede zwischen den Gruppen nivelliert werden können.

Ein weiterer Erklärungsaspekt, der bereits in der Pro- und Antisakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3 und 4) angesprochen wurde, ist ein möglicherweise stärkerer *time on task*-Effekt der THC-Gruppe. In den Experimenten aus Kapitel 3 und 4 trat ein solcher Effekt in keiner Gruppe auf, was jedoch die Möglichkeit offen ließ, dass aufgrund der Kürze dieser Experimente ein solcher Effekt nicht unbedingt zum Tragen kommen müsste (s. Kapitel 3.5 sowie 4.4). Die vorliegende ist jedoch die längste unter allen durchgeführten Aufgaben, und eine entsprechende Erschöpfung äußerten die Probanden im Nachhinein dem Versuchsleiter gegenüber. Daher scheint diese Aufgabe besonders geeignet, mögliche Effekte abzubilden. Dennoch konnten hier keine Ermüdungseffekte bezüglich der Amplitude, Latenz und Antwortgenauigkeit nachgewiesen werden. Nur bei der Sakkadengeschwindigkeit konnte eine Verlangsamung über alle Durchgänge hinweg festgestellt werden, Unterschiede zwischen den Gruppen sind aber nicht zu berichten. Aus diesem Grund und mit Hinblick auf die Ergebnisse aus den Pro- und Antisakkadenaufgaben erscheint es unwahrscheinlich, dass zwischen den Gruppen Unterschiede in der Ermüdbarkeit bestehen.

Die übrigen Ergebnisse sind vor allem aus grundlagenorientierter Sicht interessant. Da in dieser Aufgabe erstmals eine Erkennenaufgabe mit einer Overlap-/Gap-Sakkadenaufgabe kombiniert wurde, ist es eine interessante Frage, ob die Gap-Bedingung nicht nur die Reaktionszeiten verkürzt, sondern darüber hinaus auch die Erkennensleistung verbessert. Tatsächlich sprechen die Ergebnisse insgesamt für eine solche Verbesserung der Erkennensleistung in der Gap-Bedingung, auch wenn dieser Effekt nur in der 3°-Bedingung signifikant ist. Dass der Effekt in der 6°-Bedingung nicht signifikant ist, lässt sich jedoch möglicherweise dadurch erklären, dass hier die Aufgabe so schwierig ist, dass der Gap-Effekt nicht auf die Erkennensleistung durchschlagen kann. Es bleibt aber dennoch festzuhalten, dass eine Gap-Periode nicht nur die Latenz verkürzt, sondern ebenfalls die Erkennensleistung verbessert. Offensichtlich bewirkt die Gap-Periode nicht nur eine effizientere motorische Ablösung der Fixation, sondern auch der Aufmerksamkeit, die zur Buchstabenerkennung an die Peripherie verlagert werden muss. Dies würde bedeuten, dass sich der Gap-Effekt nicht nur auf Reaktionsprozesse, sondern auch auf Wahrnehmungsprozesse auswirkt. Es könnte vor diesem Hintergrund von einer beschleunigten

Aufmerksamkeitsverschiebung (im Sinne einer *selection for recognition*) gesprochen werden, die mit der motorischen Vorbereitung (*selection for action*) einhergeht⁵. Dieses Ergebnis geht zudem über die Befunde von MacKeben (1999) hinaus, wo eine Verbesserung der Erkennungsleistung für Buchstaben bei Verwendung eines Cues etwa eine Sekunde vor der Zielreizdarbietung festgestellt wurde (vgl. Kapitel 7.1). Allerdings konnte im Gegensatz zu Radach et al. (1999) nicht gezeigt werden, dass zwischen der Genauigkeit der Sakkade und der Erkennungsleistung ein Zusammenhang besteht. Demgegenüber besteht ein Zusammenhang zwischen der Sakkadenlatenz und der Genauigkeit. Gute Erkennungsleistungen zeichnen sich durch eine geringere Sakkadenlatenz aus. Offensichtlich besteht hierbei kein klassischer Geschwindigkeits-Genauigkeits-Trade-off. Möglicherweise sind beide Parameter gleichsinnig sensibel für Motivationsprozesse, doch lässt sich diese Vermutung anhand der Daten nicht abschließend klären.

Interessant sind zuletzt die untersuchten Richtungseffekte in dieser Aufgabe. Aufgrund der Ergebnisse in der Prosakkadenaufgabe (vgl. Kap. 3) würde man erwarten, dass Sakkaden nach rechts schneller ausgeführt werden. Dieses Ergebnis kann hier nicht bestätigt werden. Möglicherweise nivelliert die höhere Schwierigkeit dieser Aufgabe diese eher subtilen Effekte. Dennoch zeigt sich ein Effekt der Zielreizrichtung auf die Sakkadenamplitude, und zwar sind Sakkaden nach rechts in beiden Bedingungen signifikant kürzer als solche nach links. Dieser Befund widerspricht den in Kapitel 3.4 berichteten Befunden, dass bei Prosakkaden Richtungseffekte auf Latenzen, aber nicht auf Amplituden gefunden werden. Da der Effekt auf die Amplituden jedoch nur in der Buchstabenerkennungsaufgabe aufgetreten ist, scheint eine befriedigende und konsistente Interpretation hierzu nicht möglich und bedarf weiterer Studien.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass dieses Experiment keine Unterschiede zwischen den Gruppen bezüglich der visuellen Spanne hat hervortreten lassen. Daher können die Reaktionszeitunterschiede aus der visuellen Suche (vgl. Kapitel 2) nicht auf einen Unterschied in der visuellen Spanne zurückgeführt werden. Neben diesem Ergebnis stellt die Aufgabe zudem ein interessantes neues Paradigma vor, mit dem sich grundlegende Aufmerksamkeitsmechanismen untersuchen lassen. Die diesbezüglichen Ergebnisse sind theoretisch interessant und sind es wert, in nachfolgenden Experimenten genauer untersucht zu werden, so dass die Zusammenhänge von Sakkadengenauigkeit, -amplitude und -latenz mit Erkennungsprozessen genauer spezifiziert werden können.

⁵ Diese Unterscheidung zweier Aufmerksamkeitskonzepte wird eingehender diskutiert z.B. bei Radach et al. (1999), wo sich in Anlehnung an die Befunde von Deubel & Schneider (1996) ebenfalls Hinweise auf eine enge Kopplung von diesen zwei Aufmerksamkeitsprozessen finden ließen (vgl. Kapitel 7.1).

8. Experiment 7: Ein Leseexperiment

Ausgehend von den Befunden zur visuellen Suche (vgl. Kapitel 2) wurden in den darauffolgenden, bereits berichteten Experimenten systematisch grundlegende Teilaspekte der visuellen Informationsverarbeitung und Okulomotorik untersucht. Die berichteten Effekte in diesen Experimenten konnten ein konsistentes Muster von Defiziten zum Vorschein bringen. Darüber hinausgehend scheint die Frage berechtigt, inwieweit sich die eher subtilen Einschränkungen im Alltag auswirken können. Die Aufgabe zur visuellen Suche stellt unter dieser Betrachtungsweise bereits einen Schritt in die richtige Richtung dar, da sie einer alltagsrelevanten Aufgabe nahe kommt, doch auch hier ist die Repräsentativität der Aufgabe nur mit Abstrichen gegeben, da alltägliche Prozesse des Suchens sich weitaus komplexer gestalten.

Um diesen Einschränkungen zu entgehen, wurde nach einer Aufgabe gesucht, die einerseits für das tägliche Leben von hoher Relevanz und andererseits ohne eine präzise Steuerung der Blickbewegungen nicht zu leisten ist. Eine Aufgabe, die beide Bedingungen erfüllt, ist das Lesen. Erleichternd zur Entscheidung, eine Leseaufgabe in die Experimentalserie einzubeziehen, trug die große Erfahrung bezüglich experimenteller Leseforschung am Aachener Institut für Psychologie der RWTH bei (Radach, 2002).

8.1 Grundlagen der Blickbewegungen beim Lesen

Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über einige in der Leseforschung etablierte Parameter der Blickbewegungsmessung gegeben werden. Dies bildet einen Anschluss an die bereits dargelegten Grundlagen zur Okulomotorik im Kapitel 1.4 sowie an die Darlegung des Modells der Sakkadengenerierung von Findlay & Walker (1999) in Kapitel 3.1.1. Neben globalen Parametern wie die Dauer und die Anzahl von Fixationen sollen in diesem Experiment vor allem Wirkungen auf spezifische Parameter bezüglich einzelner Wörter untersucht werden. In diese Richtung weisen mittlerweile viele neuere Studien (vgl. Rayner, 1998; Kennedy, Heller, Radach & Pynte, 2000; Hyönä, Radach & Deubel, 2003), in denen Effekte auf genau spezifizierte Targetwörter unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden.

In diesem Zusammenhang interessant erscheint eine Untersuchung der möglichen Wirkung von Cannabis auf Effekte, die in der Leseforschung bereits gut etabliert, methodisch gesichert sowie häufig repliziert sind. Sie lassen sich grob einteilen in okulomotorisch basierte (*low level*) und durch

kognitive Prozesse (*high level*) beeinflusste Effekte. Dazu werden exemplarisch zwei Befunde ausführlicher beschrieben. Der erste ist die *low level* fundierte Abhängigkeit der initialen Landeposition einer Sakkade im Wort von der Wortlänge und der Startdistanz der Sakkade (Radach & McConkie, 1998). Der zweite Befund ist der sehr oft reproduzierte Einfluss der Worthäufigkeit auf Fixationsdauern (Inhoff, 1984; Rayner & Duffy, 1986; vgl. Harley, 1995). Durch die Untersuchung beider Prozesse lässt sich eine genauere Aussage über die Art und Weise der Wirkung von Cannabis auf Teilkomponenten des Leseprozesses machen. Unterschiede im Worthäufigkeitseffekt zwischen den Gruppen lassen auf unterschiedliche kognitive Verarbeitungsprozesse wie die Wortverarbeitung schließen, während Unterschiede bezüglich des Wortlängeneffektes auf Beeinträchtigungen der grundlegenden automatisierten Routinen hindeuten, also auf Ebene 3 des Modells von Findlay & Walker (1999, vgl. Kapitel 3.1.1). Bevor auf eine detailliertere Beschreibung der entsprechenden experimentellen Manipulationen eingegangen wird, sollen im Folgenden relevante Blickbewegungsparameter beim Lesen beschrieben werden.

8.1.1 Blickbewegungen beim Lesen

Beim Lesen bewegen sich die Augen nicht ebenmäßig und mit konstanter Geschwindigkeit, sondern in Sakkaden von links nach rechts über die Textzeile. Sakkaden und Fixationen beruhen auf weitgehend unabhängigen neuronalen Mechanismen (Rayner & McConkie, 1976; Rayner & Pollatsek, 1981), wenn auch neuere Untersuchungen Interaktionen zwischen räumlichen und zeitlichen Aspekten der Okulomotorik nahelegen (Radach & Heller, 2000). Während einer Fixation wird neue Information aufgenommen (zeitlicher Aspekt), während eine Sakkade neue Information in den Bereich der Fovea bringt (räumlicher Aspekt).

Die Länge von Sakkaden beim Lesen ist variabel und kovariiert u.a. mit der Größe der Buchstaben des Lesematerials, weshalb sie zumeist in Buchstabeneinheiten gemessen wird. Aber auch bei einer konstanten Buchstabengröße treten unterschiedlich lange Sakkaden auf, was sowohl von inhaltlichen oder physikalischen Merkmalen des Textmaterials als auch vom Lesenden selbst oder sogar der Aufgabenstellung abhängen kann (Huestegge, 2000). Beim Lesen von englischen oder deutschen Texten beträgt die mittlere Sakkadenlänge 7-9 Buchstabeneinheiten, eine Fixation dauert im Durchschnitt 200-250 ms (Heller, 1982).

Ebenfalls abhängig von der Buchstabengröße wird der sogenannte *perceptual span* angegeben. Dieser Begriff bezeichnet den Bereich, in dem beim Lesen während einer Fixation Information aufgenommen werden kann¹. Bei Sprachen, in denen das Alphabet benutzt wird und die Leserichtung von links nach rechts verläuft, erstreckt sich dieser Bereich etwa 14-15 Buchstaben nach rechts und 3-4 Buchstaben nach links (vgl. McConkie & Rayner, 1975, 1976). In Sprachen mit umgekehrter Leserichtung ist der *perceptual span* entsprechend links vom Fixationsort größer als rechts. Innerhalb dieses Bereiches können Informationen über die Wortlänge, jedoch nicht über die Buchstaben extrahiert werden. Die Buchstabenidentifikation an sich ist nur bis etwa 7-8 Buchstaben nach rechts und ca. 3 nach links möglich. Der Bereich der möglichen Worterkennung wird als *word identification span* bezeichnet (Underwood & McConkie, 1985). An diesen Unterscheidungen ist leicht zu erkennen, dass die Größe einer Wahrnehmungsspanne nur in Bezug auf einen spezifizierten Informationstyp sinnvoll ist.

Im folgenden sollen noch einige Begriffsbestimmungen vorgenommen werden, die in der Leseforschung üblicherweise verwendet werden. Wenn Personen einen Text lesen, ist das Leseverhalten niemals ganz regelmäßig in dem Sinne, dass sukzessiv mit ähnlichen Sakkadenlängen Zeile für Zeile gelesen wird. Stattdessen können Sakkaden nicht nur von links nach rechts (*Progressionen*), sondern neben den notwendigen Zeilensprüngen auch von rechts nach links zu bereits gelesenen Material zurück verlaufen (*Regressionen*). Außerdem kann eine Sakkade durchaus nur innerhalb eines Wortes verlaufen, was man *Intrawortsakkade* (im Gegensatz zur *Interwortsakkade*) nennt und eine *Refixation* des Wortes zur Folge hat. Solche kurzen Intrawortsakkaden können u.U. auf Verarbeitungsprobleme mit dem fixierten Wort hinweisen. Die erste Fixation auf einem Wort wird als *initiale Fixation* (bzw. *first fixation*) bezeichnet. Wenn auf eine initiale Fixation eine (oder mehrere) Refixationen desselben Wortes folgen, nennt man die Gesamtzeit dieser Fixationen bis zur ersten Sakkade aus dem Wort hinaus die *Blickdauer* (*gaze duration*) im ersten Lesedurchgang für dieses Wort. Die Gesamtlesezeit für ein Wort (inklusive Interwortregressionen) wird als *Gesamtlesezeit* (*total reading time*) bezeichnet. Wird ein Wort insgesamt nur einmal fixiert, so spricht man von einer *Einzelfixationsdauer* (*single fixation duration*). Die Ursachen für Regressionen können motorische Korrekturzwänge (für kleinere Regressionen) oder Defizite im Textverständnis sein, so dass ein Rückblick zu bereits gelesenen Wörtern notwendig wird (*second pass*-Lesen)².

¹ Vgl. Kapitel 7.1 zu einer Abgrenzung des *perceptual span* von verwandten Konzepten wie der visuellen Spanne oder des *useful field of view*.

² Zur Definition komplexer Blickbewegungsmaße siehe Inhoff & Radach (1998) sowie Murray (2000).

In aufgezeichneten Blickbewegungsmustern finden sich bis zu 10-15% Regressionen (Rayner, 1998), wobei dieser Wert auf Basis von einzeiligen englischen Sätzen erhoben wurde. Der prozentuale Anteil von Regressionen an der Gesamtzahl der Sakkaden in einem großen Datensatz von Radach & McConkie (1998) beläuft sich auf deutlich über 16%, wobei nur Sakkaden gezählt wurden, die innerhalb derselben Zeile starten und landen. Diese Werte beruhen auf Lesedaten von zusammenhängenden Texten und werden von neueren Untersuchungen bestätigt (Vitu, 2003). Etwa zwei Drittel dieser Regressionen sind Interwortregressionen. Die Häufigkeit von Regressionen ist abhängig von Faktoren wie Textschwierigkeit, Leseinstruktion und der Lesekompetenz eines Lesers (Heller, 1982).

Man kann anhand der Blickbewegungen wie bereits angedeutet gute von schlechten Lesern unterscheiden: gute Leser machen weniger und genauere Regressionen (im Sinne der Wahl der zu fixierenden vorigen Textstelle) als schlechte Leser. Gute Leser scheinen sich dabei u.a. durch besseres *spatial coding*, d.i. einer besseren Merkfähigkeit für die räumliche Position bereits gelesener Wörter, von schlechten Lesern zu unterscheiden (vgl. Frazier & Rayner, 1982; Kennedy, 1983; Kennedy & Murray, 1987; Murray & Kennedy, 1988; vgl. auch Rayner, 1998). Auf Indikatoren für ein solches spatial coding wird in Kapitel 8.1.2.3 näher eingegangen. Nach diesen terminologischen Klärungen sollen im Folgenden die räumlichen und zeitlichen Aspekte der Blickbewegungssteuerung beim Lesen nacheinander dargestellt werden.

8.1.2 Räumliche Aspekte der Steuerung von Blickbewegungen beim Lesen

Bei der Blickbewegungssteuerung ist der räumliche Aspekt allgemein dafür verantwortlich, von wo nach wo eine Sakkade verläuft. Dabei muss grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Prozessen unterschieden werden (vgl. Radach & McConkie, 1998), was sich auch in allen aktuellen Modellen des Lesens niederschlägt (z.B. Reichle, Rayner & Pollatsek, 2003; Reilly & Radach, 2003). Der erste Prozess ist die Selektion eines bestimmten Wortes als Fixationsziel, der zweite die Determination der Fixationsposition innerhalb des ausgewählten Wortes. Weit verbreitet ist der Standpunkt, dass räumliche Aspekte vor allem von sensorischen (low level) Faktoren beeinflusst werden (z.B. O'Regan, 1992); wenige Studien weisen darüber hinaus auf einen ergänzenden Effekt von high level-Informationen hin (z.B. Hyönä, Niemi & Underwood, 1989)³. Die entsprechenden Befunde werden im nächsten Kapitel ausführlicher referiert.

³ Beispiele für die hier als „high level-Faktoren“ bezeichneten Einflussgrößen sind lexikalische Information, also die Entscheidung der Frage, ob es sich bei einem bestimmten Buchstabenkomplex um ein Wort handelt, oder

8.1.2.1 Selektion von Wörtern als Fixationsziele

Innerhalb des letzten Jahrzehnts lassen sich zwei Positionen zu der Frage ausmachen, welches Wort während des Leseprozesses als nächstes fixiert werden soll. Diese Frage ist in der einschlägigen Literatur als Problem der Fixationswahrscheinlichkeit (bzw. *word skipping*) bekannt. Dabei lassen sich primär die folgenden gegenüberstehenden Meinungen ausmachen: 1.) die Wahl des nächsten zu fixierenden Wortes geschieht aufgrund von sogenannten low level-Informationen, worunter Parameter wie z.B. Wortlänge oder Entfernung fallen (O'Regan, 1990) oder 2.) aufgrund parafovealer lexikalischer (high level-) Information (z.B. Rayner & Pollatsek, 1989; Rayner, Reichle & Pollatsek, 2000). Die letztere Annahme ist insofern von Bedeutung, als dass sie eine wichtige Grundlage einer Reihe von Modellen zur Augenbewegungskontrolle darstellt, den sogenannten „sequential attention models“ (vgl. z.B. Reichle et al., 2003).

Die Rolle von low level-Faktoren bei der Wahl eines zu fixierenden Wortes wurde zuerst von Kerr (1992) quantifiziert (vgl. auch McConkie, Kerr & Dyre 1994), dessen Analyse eines großen Materials von Lesedaten ergab, dass die Fixationswahrscheinlichkeit eines Wortes sehr gut aufgrund von nur zwei Faktoren vorhergesagt werden kann: der Länge der für eine Fixation in Frage kommenden Wörter und der Entfernung dieser Wörter von der vorhergehenden Fixation. In einer Analyse zur Wahrscheinlichkeit, ein Wort zu überspringen, fanden Vitu, O'Regan, Inhoff & Topolski (1995), dass diese Wahrscheinlichkeit für einbuchstabile Wörter bei 80%, für dreibuchstabile bei 60%, für fünfbuchstabile bei 30% und für siebenbuchstabile bei 10% liegt. Acht- bis zehnbuchstabile Wörter wurden so gut wie immer fixiert. Wenn anstelle sinnvoller Sätze eine Abfolge des Buchstaben "z" dargeboten wird, bleibt das Ergebnis bei gleichem Layout etwa dasselbe. Ein schwacher Hinweis auf einen Einfluss der Fixationsdauer auf die Fixationswahrscheinlichkeit des nachfolgenden Wortes wurde von Pollatsek, Rayner & Balota (1986) gefunden. In weiteren Studien konnte dieser Effekt allerdings nicht repliziert werden (McConkie, Kerr & Dyre, 1994; Radach & Heller, 2000; Vonk, Radach & van Rijn, 2000; Engbert & Kliegl, 2003b).

Doch auch für den Einfluss von high level-Faktoren auf die Fixationswahrscheinlichkeit gibt es Indizien. Linguistische Eigenschaften (z.B. Worthäufigkeit) modulieren dabei die Wahrscheinlichkeit, ein Wort zu überspringen (Rayner & Fischer, 1996; Henderson & Ferreira, 1993; Inhoff & Topolski, 1994). Häufige Wörter werden öfter übersprungen als seltene. Unter

semantische Information, also die Verarbeitung der Bedeutung des Wortes. Beispiele für „low level-Faktoren“ sind die Wortlänge oder die aktuelle Entfernung von einem bestimmten Wort (*launch site*).

der Interpretation, dass häufige Wörter leichter zu verarbeiten sind, kann behauptet werden, dass leichtere Wörter eher übersprungen werden. Auch die Vorhersagbarkeit eines Wortes aus dem Kontext verringert die Fixationswahrscheinlichkeit des Wortes (z.B. Rayner & Well, 1996; Balota, Pollatsek & Rayner, 1985).

Die Kontroverse, ob nun low level- oder high level-Informationen zur Wahl des Targetwortes entscheidend sind, wurde weitgehend entschieden durch eine von Brysbaert & Vitu (1998) durchgeführte Metaanalyse diverser Satzleseexperimente. Sie konnten zeigen, dass nur ein relativ geringer Anteil der Skippingvarianz (4% für Einfachheit des Wortes, 11% für Kontext) durch kognitive (also high level) Faktoren erklärt wird. Der daraus folgende hohe Anteil der low level-Faktoren zur Varianzaufklärung sollte jedoch nicht über die Bedeutsamkeit der high level-Faktoren hinwegtäuschen.

Die Kriterien für eine Entscheidung zur Refixation eines Wortes sind ebenfalls untersucht worden. Die Wahrscheinlichkeit einer Refixation ist minimal, wenn die initiale Fixation eines Wortes in der Wortmitte (bei 5-9-buchstabigen Wörtern) bzw. leicht links der Mitte für längere Wörter liegt. Bei zunehmender Entfernung der initialen Fixation von der Wortmitte steigt die Refixationswahrscheinlichkeit U-förmig an (McConkie, Kerr, Reddix, Zola & Jacobs, 1989; O'Regan, 1990; Radach, 1996). Diese Ergebnisse können im Sinne einer optimalen Landeposition des Auges in der Wortmitte interpretieren werden⁴.

8.1.2.2 Determinanten der Fixationspositionen innerhalb eines Wortes

Nach der Wahl des als nächstes zu fixierenden Wortes stellt sich die Frage nach der Determination der Fixationsposition *innerhalb* dieses Wortes. Es soll also im folgenden nicht darum gehen, *was* fixiert wird, sondern *wo* genau innerhalb des bereits gewählten Wortes fixiert wird. Die Wortgrenzen dienen dabei als Indikator für die Länge eines Wortes. Sie sind definiert durch die Leerstellen zwischen den Wörtern. In Experimenten von McConkie & Rayner (1975), Rayner (1986) und Pollatsek & Rayner (1982) wurde die Wichtigkeit der Leerstellen zwischen den Wörtern für die Blickbewegungssteuerung bewiesen. Wenn keine Leerstellen zur Verfügung stehen, reduziert sich die Sakkadenlänge erheblich (Rayner et al., 1998). Dennoch zeigen Untersuchungen zu anderen alphabetischen Schriftsystemen wie der Thai-Schrift, dass

⁴ Vgl. zur optimalen Landeposition auch das nachfolgende Kapitel.

wortbasierte Lesemuster auch aufgrund anderer Informationsquellen als den Leerzeichen möglich sind (Reilly & Radach, 2003).

Wenn ein Wort als Ziel gewählt wurde, muss daraufhin die intendierte Landeposition innerhalb des Wortes zur entsprechenden Parametrisierung und Ausführung der Sakkade bestimmt werden. Als optimale Landeposition (*optimal viewing position*) einer Sakkade innerhalb eines Wortes gilt in etwa die Wortmitte. Diese Annahme wird durch eine Reihe tachistoskopischer Versuche sowie klassischer Worterkennungspfadparadigmen gestützt (siehe hierzu O'Regan & Jacobs, 1992; Nazir, Heller & Sussmann, 1992; Brysbaert, Vitu & Schroyens, 1996): kurz dargebotene Wörter werden um so schneller und genauer erkannt, je mehr sie in der Mitte oder knapp links davon fixiert werden. Daten der Leseforschung unterstützen diese Annahme. Es konnte gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit zur Refixation eines Wortes minimal ist, wenn dieses zunächst etwa in der Mitte fixiert wurde (McConkie et al., 1989; Vitu, O'Regan & Mittau, 1990; Radach & Kempe, 1993; Rayner, Sereno & Raney, 1996). Ein weiterer Hinweis zu dieser optimalen Fixationsposition ist schließlich die Genauigkeit, mit der Interwortregressionen etwa in der Mitte der Zielwörter landen (Radach & McConkie, 1998).

Wird jedoch die tatsächlich bevorzugte Landeposition (*preferred viewing position*) innerhalb eines Zielwortes betrachtet, so ergibt sich, dass diese innerhalb einer Gauß'schen Verteilung ihr Maximum etwa auf halbem Weg zwischen Wortanfang und Wortmitte des Zielwortes konstituiert, was einem Undershoot im Vergleich zur optimalen Fixationsposition entsprechen würde (Rayner, 1979). Neuere Untersuchungen zur Interdependenz von optimaler Landeposition in Worterkennungsexperimenten und bevorzugter Landeposition beim Lesen deuten eher in die Richtung einer hohen Variabilität, aber weitgehenden Unabhängigkeit dieser Merkmale innerhalb der untersuchten Probanden (Haubfleisch, 2004; Gresse, 2004; Radach et al., 2004).

Bereits 1988 konnten McConkie et al. zeigen, dass die bevorzugte Landeposition vor allem durch die zwei low level-Faktoren „Startdistanz der zum Wort führenden Sakkade“ und „Wortlänge“ aufgeklärt werden kann. Nachfolgende Untersuchungen konnten die Ergebnisse replizieren und erweiterten die Faktoren noch um die weniger einflussreichen Variablen „Position in der Zeile“ und „vorgehendes Fixationsmuster“ (Radach & Kempe, 1993; McConkie, Kerr & Dyre, 1994; Radach & McConkie, 1998). Zusätzliche Forschungsergebnisse von Radach & Heller (2000) konnten einen Einfluss der Fixations- und Blickdauer auf dem vorhergehenden Wort auf die initiale Fixationsposition im Zielwort nachweisen. Diese Effekte waren allerdings gering und nur signifikant unter der Bedingung, dass die vorhergehende Fixation eine Refixation war.

8.1.2.3 Die mittlere initiale Fixationsposition (*preferred viewing position*)

In diesem Abschnitt soll auf die Quantifizierung des Einflusses der wichtigsten Parameter auf die initiale Fixationsposition im Wort noch etwas genauer eingegangen werden. Wie bereits beschrieben wurde von McConkie et al. (1988) nachgewiesen, dass die Startdistanz der zum Wort führenden Sakkade entscheidend für die initiale Fixationsposition ist. Eine Sakkade, die in kurzer Entfernung zum Zielwort startet, weist eher eine Tendenz zum Overshoot relativ zur Targetmitte auf, während Sakkaden, die weit vom weg vom Target starten, eher zum Undershoot tendieren. Radach & McConkie (1998) konnten diese Vermutung durch eine präzise Quantifizierung bestätigen. Auf der Basis eines großen Lesematerials, bei der Probanden sehr lange Textpassagen zu lesen hatten, konnten sie eine lineare Beziehung zwischen der Startdistanz einer Sakkade relativ zum Wort und der Landeposition im Wort nachweisen. Eine Verkürzung der Startdistanz um eine Buchstabeneinheit geht einher mit der Verlängerung der Landeposition in positiver Richtung um 0,4-0,5 Buchstabeneinheiten (siehe Abbildung 8.1). Eine Erhöhung der Wortlänge ändert nichts an der Steigung, sondern am y-Achsen-Abschnitt der Funktion. Bei gleichbleibender Startentfernung der Sakkade ist die Fixationsposition im Zielwort bei einer Verlängerung des Zielwortes um einen Buchstaben um 0,2 Buchstabeneinheiten nach rechts verschoben.

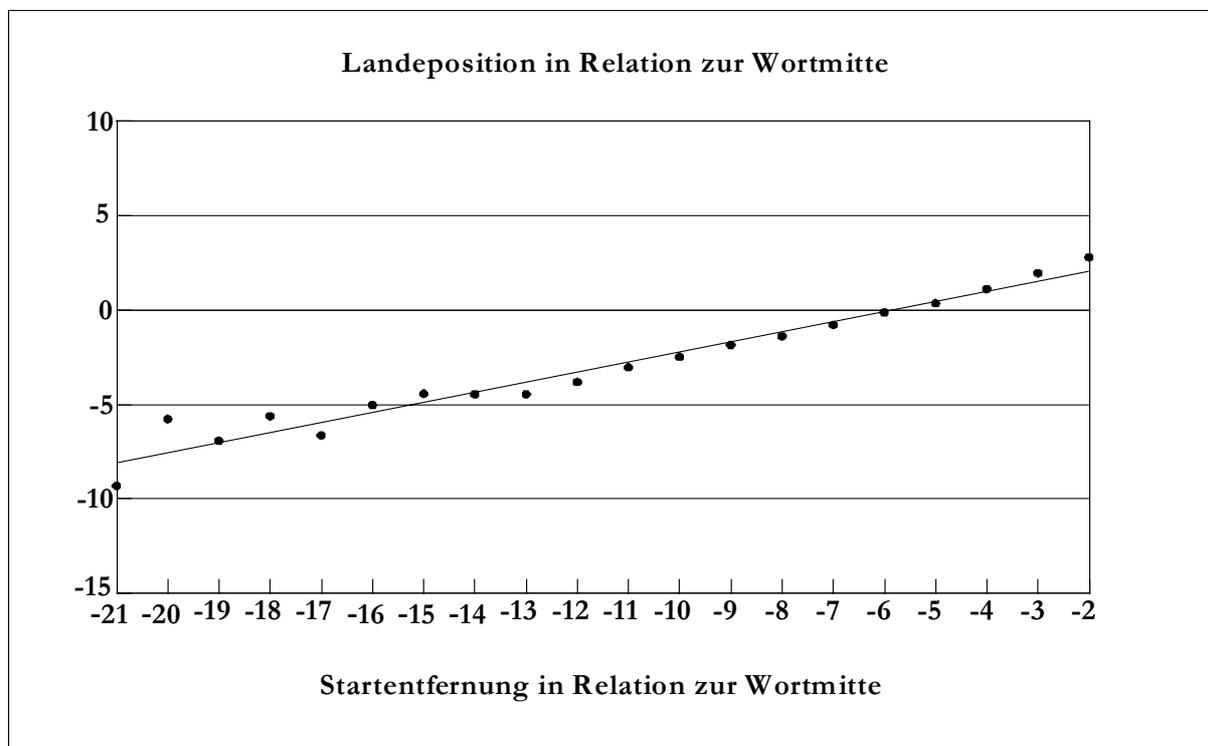


Abbildung 8.1: Die geschätzte durchschnittliche Landeposition initialer Sakkaden als eine Funktion der Startentfernung. Die Startentfernung ist in Bezug auf die Wortmitte von 9-11-buchstabigen Wörtern angegeben. Ab Startentfernungen von 5 Buchstaben und weniger sind daher auch die Fälle miteinbezogen, bei denen die Sakkade innerhalb desselben Wortes gestartet wurde (nach Radach & McConkie, 1998).

Die nachgewiesene Linearität konnte bis zu einer Sakkadenlänge von 21 Buchstabeneinheiten relativ zur Zielwortmitte nachgewiesen werden und erstreckt sich somit über den gesamten Bereich von in Leseexperimenten gemessenen Sakkadenlängen. Dies kann als Hinweis gewertet werden, dass dieses Phänomen eher auf visumotorischen als auf wahrnehmungsbezogenen Prinzipien beruht (Poulton, 1981). Zudem sind die Ergebnisse inkompatibel mit Erklärungsansätzen zur bevorzugten Fixationsposition von O'Regan (1990), Vitu (1991, „center of gravity“-These) sowie von Rayner, Sereno & Raney (1996, „parafoveale Buchstabenidentifikation“), auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden soll (für einen Überblick vgl. z.B. Rayner, 1998). Die lineare Landepositionsfunktion wurde von Vonk, Radach & van Rijn (2000) auch in einem kontrollierten Satzleseexperiment repliziert.

Die Landepositionsfunktion gilt nicht nur für progressive Interwortsakkaden. Radach & McConkie (1998) konnten in ihrer Studie auch zeigen, dass progressive Intrawortsakkaden den gleichen linearen Verlauf aufweisen. Dazu verglichen sie progressive Sakkaden innerhalb eines Wortes und progressive Sakkaden zwischen Wörtern in ihrem Datensatz unter der Fragestellung, ob sich die mittleren Landepositionen von Sakkaden innerhalb eines Wortes und zwischen Wörtern unterscheiden. Die dargestellte „landing position function“ ist linear und weist somit keine Unterschiede zwischen Interwort- und Intrawort-Sakkaden auf (vgl. Abbildung 8.1). Die Studie von Radach & McConkie ergibt also keinen Beleg für einen Unterschied in der Determination von Landepositionen für initiale Fixationen und Refixationen, während bei Interwortregressionen zwar eine hohe Fehlervarianz bei der Landeposition, aber interessanterweise keine systematische Abhängigkeit von der Startdistanz der Sakkade zu verzeichnen war. Dies deutet auf andere Prozesse in der Parametrisierung von Interwortregressionen hin, deren Zielposition möglicherweise aus einem Gedächtnis für Wortpositionen abgerufen wird. Da sich für die THC-Gruppe in der visuellen Suche sowie in den Anti- und memory guided-Sakkadenaufgaben Hinweise für ein gestörtes visuell-räumliches Arbeitsgedächtnis gehäuft haben, scheint eine Analyse der Landepositionen für Interwortprogressionen und Interwortregressionen beim Lesen besonders aufschlussreich.

Als Ursache für die Landepositionsfunktion der Progressionen (s.o.) wurde bereits ein Distanzeffekt vermutet, der bei muskulären Systemen oft beobachtet werden kann (McConkie et al., 1988; Kapoula & Robinson, 1986; Rosenbaum, 1991), nämlich dass bei nahen Zielen die Bewegung zu weit und bei fernen zu kurz ausfällt. Gemäß dieser Interpretation bildet die Mitte eines in der Peripherie wahrgenommenen Wortes das Sakkadenziel (wobei das Wort aufgrund der abfallenden Schleistung des Auges in der Peripherie eher als von Leerstellen umgrenzter „Blob“

gesehen wird). Diese Wortmitte bildet nun das intendierte Ziel, und der Distanzeffekt wäre ein Ergebnis allgemeiner Charakteristika von Muskelbewegungen. Was an dieser Interpretation zweifeln lässt ist die Tatsache, dass bei Interwortregressionen ebenso Muskeln zum Einsatz kommen, diese das für Muskelsysteme typische Verhalten jedoch nicht zeigen. Eine angemessene Erklärung des Distanzeffektes müsste diese Erkenntnisse miteinbeziehen und steht bis dato noch aus (vgl. Inhoff & Weger, 2004, für neuere Untersuchungen zu diesem Thema).

In der vorliegenden Untersuchung soll deshalb die oben genannte initiale Fixationsposition ebenfalls als abhängige Variable fungieren, da die beschriebenen Effekte gut bestätigte Beispiele für einen *low level*-Einfluß auf Blickbewegungsparameter darstellen. Darüber hinaus weisen neuere Arbeiten (Huestegge, 2000 sowie Demir, 2003) darauf hin, dass die initiale Fixationsposition ebenfalls sensitiv für globale strategische Prozesse sein kann. So werden unter einer schwereren Leseaufgabe sowie bei lautem Lesen eher Fixationsorte zu Beginn eines Wortes angesteuert. Einen weiteren, wenn auch geringen Einfluss auf initiale Fixationsposition können auch orthographische Faktoren wie die Regularität von Wortanfängen haben (Hyönä, 1995; Olawsky, 1999; Vonk, Radach & von Rijn, 2000). Da die THC-Gruppe in den Experimenten zur Sakkadensteuerung bei nicht-visuell geführten Sakkaden (vgl. Kapitel 4 und 5) verlängerte Sakkaden aufwies, könnte sich diese Tendenz auch beim Lesen niederschlagen, da auch hier die Sakkaden nicht wie z.B. in der Prosakkadenaufgabe visuell unterstützt werden (vgl. Kapitel 3).

8.1.3 Zeitliche Aspekte der Steuerung von Blickbewegungen beim Lesen

Nachdem ausführlich der Einfluss der *low level*-Variablen auf räumliche Parameter dargestellt wurde, sollen nun zeitliche Parameter wie z.B. initiale Fixationszeiten oder Blickdauern diskutiert werden. Zeitliche Aspekte der Blickbewegungssteuerung werden im Gegensatz zu den räumlichen vorrangig von kognitiven (*high level*) Faktoren beeinflusst (z.B. Rayner & Pollatsek, 1989). Zunächst wird jedoch eingegangen auf typische *low level*-Einflüsse.

Die Wortlänge ist ein Beispiel für eine *low level*-Variable, die Einfluß auf die Blickzeit hat. Bei ansteigender Wortlänge steigt auch die Blickzeit (Just & Carpenter, 1980; Rayner et al., 1996). Dieser Effekt entsteht vor allem aufgrund der ansteigenden Häufigkeit von Refixationen bei einem langen Wort (Blanchard, 1985). Einige weitere Untersuchungen weisen auf einen Einfluss räumlicher Parameter auf zeitliche hin. So existiert bspw. eine systematische Beziehung zwischen der Startentfernung einer Sakkade und der nachfolgenden Fixationsdauer (Heller & Müller, 1983;

Pollatsek, Rayner & Balota, 1986; Radach & Heller, 2000). In einer Versuchsanordnung von Heller & Müller (1983) wurden Leerstellen innerhalb von Textzeilen eingefügt, um die Entfernung zwischen Zielwort und dem vorhergehenden Wort zu variieren. Dabei wurde eine erhöhte Sakkadenlänge und eine längere Fixationsdauer auf dem Zielwort gefunden. Radach & Heller (2000) analysierten einen großen Korpus von Lesedaten, wobei auch ein signifikanter Einfluss der räumlichen Parameter auf die zeitlichen gefunden wurde: Die Verarbeitungszeit auf der aktuellen Fixation ließ sich darstellen als eine Funktion der Entfernung zur vorherigen Fixationsposition. Eine größere Startentfernung ging mit einer längeren folgenden Fixationsdauer einher. Offensichtlich steht die Effektivität der parafovealen Vorverarbeitung während des Lesens in direktem Bezug zur Exzentrizität des Zielwortes (vgl. auch Vitu et al., 2001). Dieser Zusammenhang wurde bereits bei der Analyse der visuellen Suchaufgabe genutzt (vgl. Kapitel 2.3.3).

Die Mehrzahl der Untersuchungen zu zeitlichen Parametern beim Lesen beschäftigt sich mit dem Einfluss von *high level*-Variablen auf dem Niveau der Wort- und Satzverarbeitung. So werden aus dem vorherigen Kontext vorhersagbare Wörter kürzer fixiert und häufiger übersprungen als nicht so leicht vorhersagbare (Ehrlich & Rayner, 1981; Rayner & Well, 1996). Auch ein Einfluss der Häufigkeit des Wortanfangs auf die Fixationsdauer wurde festgestellt (Lima & Inhoff, 1985). Sie zeigten den Probanden Sätze, in denen eine von zwei Zielwortarten auf der Zielwortposition präsentiert wurden (z.B. *dwarf* versus *clown*). Beide Wörter waren gleich häufig und in gleichem Maße aus dem Kontext vorhersagbar. Jedoch war das initiale Trigramm (die ersten drei Buchstaben des Wortes) bei *dwarf* selten, bei *clown* hingegen häufiger. Das Ergebnis war ein Anstieg der Fixationsdauer auf Wörtern mit orthographisch irregulärem Wortanfang. Leser verarbeiten häufig die ersten Buchstaben eines Wortes (und manchmal alle Buchstaben des nächsten Wortes) vor, während sie noch das vorhergehende Wort fixieren (z.B. Balota, Pollatsek & Rayner, 1985; Lima & Inhoff, 1985; Lima, 1987; Inhoff, 1989a; Henderson & Ferreira, 1990). Diese parafoveale Vorverarbeitung zeigt sich sowohl in einer Verkürzung der initialen Fixationsdauer auf dem (in der vorigen Fixation bereits vorverarbeiteten) Wort als auch der Blickzeit. Bei diesem sogenannten „*preview benefit*“ (Rayner & Pollatsek, 1987; Rayner, 1998) haben semantische und morphologische Informationen jedoch kaum Einfluss auf die Fixationsdauern (vgl. Rayner, Balota & Pollatsek, 1986; Lima, 1987).

Die genannten Effekte werden allgemein dahingehend interpretiert, dass die Blickzeiten die Schwierigkeit der Wortverarbeitung reflektieren (für einen ausführlichen Überblick siehe z.B. Inhoff & Radach, 1998). Einen weiteren Hinweis für diesen Zusammenhang bietet vor allem der

Worthäufigkeitseffekt, der im folgenden genauer beschrieben werden soll, da er für die vorliegende Untersuchung als vielleicht am besten erforschter und replizierter Effekt eines kognitiven (high level) Einflusses auf Blickbewegungen analysiert werden soll (vgl. Harley, 1995). Die Blickbewegungsmuster der THC-Gruppe beim Lesen erlauben so Rückschlüsse auf die Funktionalität der Wortverarbeitung.

8.1.3.1 Der Worthäufigkeitseffekt

Bereits 1935 wurde von Preston (vgl. Morrison & Ellis, 1995) festgestellt, dass eine unterschiedliche Häufigkeit der Wörter die Geschwindigkeit und Genauigkeit der Worterkennung beeinflusst. Mittels einer frühen Wortfrequenzliste von Thorndike (1931) wurden Wortbenennungslatenzen ermittelt und eine Differenz zwischen hoch- und niedrigfrequenten Wörtern von über 100 ms bestimmt. In der Folgezeit sind eine große Anzahl von Replikationen dieses Effektes erschienen (für einen Überblick siehe z.B. Morrison & Ellis, 1995).

Die Untersuchung des Einflusses der Worthäufigkeit auf Blickbewegungsparameter war eine logische Folge dieser Entwicklung. Dabei konnte gezeigt werden, dass häufigere Wörter kürzer fixiert werden als seltenere (Rayner, 1977; Just & Carpenter, 1980). In diesen Untersuchungen wurde allerdings die Wortlänge nicht kontrolliert, und es ließ sich einwenden, dass Worthäufigkeit negativ mit der Wortlänge korreliert. Da bei längeren Wörtern oft mehrere Fixationen auftreten, könnte der Anstieg der Blickzeiten lediglich ein Effekt der Wortlänge gewesen sein (vgl. Kliegl, Olsen & Davidson, 1982, für dieses Argument).

Jedoch konnte daraufhin gezeigt werden, dass der Effekt der Wortfrequenz auch unter Konstanthaltung der Wortlänge nachzuweisen war (Rayner & Duffy, 1986). Außerdem wurden die Silbenanzahl sowie die orthographische Regularität der Zielwörter kontrolliert (Häufigkeit von Buchstaben sowie 2-/3-Buchstabenkombinationen). Rayner & Duffy zeigten den Probanden in ihrem Experiment Sätze mit kritischen Zielwörtern, die entweder häufig (> 35 Wörter pro Million, $M = 122,3$) oder selten (< 10 Wörter pro Million, $M = 5,1$) waren. Die Blickdauern für das jeweilige Targetwort (330 ms gegenüber 243 ms) und sogar für das nachfolgende Wort (296 ms gegenüber 259 ms) waren für seltene Wörter signifikant länger. Für das Targetwort waren die Zeiten der ersten Fixation entsprechend erhöht (262 ms gegenüber 225 ms). Inhoff & Rayner (1986) konnten diese Effekte replizieren.

8.1.3.2 Probleme des Konzeptes der Worthäufigkeit

Das Konzept der Worthäufigkeit ist in der Vergangenheit oft kritisch hinterfragt worden, da Klärungsbedarf bezüglich der Prozesse, die für diesen Effekt verantwortlich sind, bestand. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass lange Zeit konfundierende Variablen wie z.B. Wortlänge oder orthographische Regularität (Buchstaben- oder Buchstabenkombinations-Häufigkeit) nicht kontrolliert wurden und somit die Rolle dieser Variablen als eigentliche Ursachen des gefundenen Effektes nicht auszuschließen waren (vgl. Kapitel 8.1.4). Zu dem Problem konfundierender Variablen sind zwei weitere wichtige Beiträge erschienen: Brown & Watson (1987) und Morrison et al. (1992) fanden Hinweise, dass das Alter, in dem ein Wort gelernt wird (*age of acquisition*), die eigentliche Wirkvariable des vermeintlichen Wortfrequenzeffektes ist. Demgegenüber fand Gernsbacher (1984), dass eher die Wortvertrautheit (*experiential familiarity*) verantwortlich sein sollte. In einer orthogonalen Variation der Faktoren (gedruckte) Worthäufigkeit und (geratete) Wortvertrautheit zeigte sich nur ein Effekt der Wortvertrautheit auf Worterkennungslatenzen. In neueren Studien fanden sich hingegen eher Hinweise darauf, dass alle drei Faktoren (Wortfrequenz, -vertrautheit und *age of acquisition*) in ähnlichem Ausmaß einen Einfluss auf Blickzeiten ausüben (Rayner et al., 2004).

Da in den Kapiteln 3 und 4 Experimente vorgestellt wurden, in denen generell längere sakkadische Latenzen bei einfachen okulomotorischen Aufgaben gefunden wurden, könnte ein analoges Muster auch beim Lesen zu erwarten sein, so dass generell höhere Fixationsdauern in der THC-Gruppe zu erwarten wären. Würden noch spezifische Effekte der Wortverarbeitung in der THC-Gruppe auftreten, sollten zusätzlich auch höhere Blickzeiten auf den in die Sätze eingebetteten Zielwörtern zu erwarten sein, und zwar nicht nur bei schweren, sondern auch bei leichten, hochfrequenten Wörtern. Sollte sich ein diesbezüglicher Gruppenunterschied nur bei den niedrigfrequenten Wörtern herausstellen, so könnte dieser auch auf ein geringeres Vokabular in der THC-Gruppe zurückgeführt werden. Aufgrund dieser Überlegungen sowie den Ausführungen zu den räumlichen Parametern sollen im nächsten Abschnitt entsprechende Hypothesen formuliert werden.

8.1.4 Hypothesen zum Gruppenvergleich

Bezüglich des Gruppenvergleichs zwischen der THC- und der Kontrollgruppe sollen auf der Basis der in den vorangegangenen Kapiteln geschilderten Befunde zwei allgemeinere Hypothesen

getestet werden. Aufgrund der Defizite in der zeitlichen Verarbeitung aus den Grundlagenexperimenten (vgl. Kapitel 3 und 4) ist Folgendes zu erwarten:

H1: Die THC-Gruppe weist beim Lesen erhöhte mittlere Fixationsdauern sowie generell erhöhte zeitliche Maße bezüglich der ausgewählten Zielwörter auf. Dieses Defizit sollte nicht nur bei schwierigen (niedrigfrequenten) und langen Wörtern, sondern auch bei leichten (hochfrequenten) und kurzen Wörtern sichtbar werden.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Experimenten zu nicht visuell geführten Sakkaden (vgl. Kapitel 4 und 5) sind außerdem Defizite in der räumlichen Verarbeitung als eine Entsprechung beim Lesen zu erwarten, da auch beim Lesen der Zielort von Sakkaden nicht wie bei Prosakkaden (vgl. Kapitel 3) visuell unterstützt wird. Daraus folgt folgende Hypothese:

H2: Die THC-Gruppe weist allgemein längere progressive Sakkaden auf als die Kontrollgruppe, was sich auch in nach rechts verschobenen mittleren initialen Landepositionen in den ausgewählten Zielwörtern gegenüber der Kontrollgruppe niederschlägt.

8.2 Methode

8.2.1 Versuchsdurchführung

An der Leseuntersuchung nahmen die gleichen Probanden wie in den bisher beschriebenen Experimenten teil. Auch die Messapparatur ist identisch (vgl. Kapitel 2.2.1 und 2.2.3). Insgesamt musste jeder Proband 96 Sätze sinnentnehmend lesen. Die Sätze standen untereinander in keinem fortlaufenden Zusammenhang. Um die Sinnentnahme beim Lesen zu sichern, wurden in unregelmäßigen Abständen detaillierte Verständnisfragen gestellt. Die Genauigkeit der Antworten auf die Fragen wurde ebenfalls erhoben, um ein Maß für das Leseverständnis zu erhalten⁵. In jedem zu lesenden Satz war ein Substantiv als Zielwort eingebettet. Die Zielwörter wurden gemäß einem 2x2-Plan bezüglich ihrer Wortfrequenz (hoch vs. niedrig) und ihrer Wortlänge (lang vs. kurz) variiert (vgl. Kapitel 8.2.2). Dies bedeutet, dass jeder Proband in jeder Bedingung 24 Wörter las. Bei der Wahl der zu lesenden Sätze wurde auf in unserem Labor bereits durchgeführte Leseexperimente zurückgegriffen. Es handelt sich somit um eine Teilmenge der in

⁵ Gemäß dem Vorgehen bei Huestegge (2000) wurden Fragen gestellt, zu deren Beantwortung längere Teilsätze mit mehreren Adjektiven und Substantiven erinnert werden müssen. Für die korrekte Nennung eines Substantivs bzw. Adjektivs wurde je ein Punkt vergeben.

Huestegge (2000) verwendeten Sätze, die eine Abhandlung über das Leben der Inuit zum Inhalt hatten.

Während der Durchführung saßen die Versuchspersonen auf einem unbeweglichen Stuhl vor einem Monitor. Der Versuch begann mit einigen Übungssätzen (Probekblock), um die Probanden an das Versuchdesign zu gewöhnen und die Aufgabe zu verdeutlichen. In diesem Übungsblock wurden – ebenso wie in dem Hauptexperiment – in unregelmäßigen Abständen Fragen zum Inhalt gestellt, um ein sinnentnehmendes Lesen zu erreichen und das Textverständnis zu erfassen. Insgesamt mussten die Probanden im Hauptexperiment 24 Fragen beantworten. Der Abstand der Versuchsperson vom Monitor betrug 71 cm, womit bei einer maximalen Länge der dargebotenen Sätze von 34,1 cm diese Distanz 27° Schinkel entspricht. Durch die gewählte Buchstabengröße entsprechen drei Buchstaben etwa einem Grad Schinkel. Das Erscheinen der Sätze wurde von den Versuchspersonen durch Betätigung der Leertaste der vor ihnen befindlichen Tastatur gesteuert. Während des Versuchs wurde in festen Intervallen insgesamt vier Mal eine Kalibrierung durchgeführt, bei der die Versuchspersonen instruiert wurden, möglichst sorgfältig und genau das jeweils präsentierte Kalibrationstarget („+“) zu fixieren. Eine Kalibrierung dauerte im Mittel etwa zwei Minuten, das gesamte Experiment nahm 40 Minuten in Anspruch. Nachdem die jeweilige Kalibrierung erfolgreich durchgeführt wurde, begann das Lesen. Der horizontale Median, auf dem die Targets und die Sätze präsentiert wurden, lag in Höhe der Augenwaagerechten. Auch während einer Kalibrierung war die für die Versuchspersonen einzig relevante Taste die Leertaste, mit der sie signalisierten, dass sie ein präsentiertes Fixationskreuz exakt in der Mitte (der Schnittstelle der beiden Linien) fixierten. Die Kalibrationstargets wurden jeweils zentral, 11° vom linken und vom rechten Bildschirmrand sowie abschließend wieder in der Mitte dargeboten. Eine Kalibrierung für einen Versuchsdurchgang wurde akzeptiert, wenn die Messabweichungen weniger als eine Buchstabeneinheit betragen.

Während des Experiments wurde die Stabilität der Kalibrierung geprüft, indem vor jedem Satz ein Fixationspunkt an der ersten Buchstabenposition dargeboten wurde, der sorgfältig fixiert werden sollte. Die Positionen der entsprechenden Fixationen wurden analysiert, so dass bei Abweichungen die Position aller Fixationen auf der Textzeile entsprechend verschoben werden konnten. Ein ähnliches Verfahren wird zwar vom Hersteller des Meßsystems (SR Research Inc., Toronto/Kanada) als automatische Option angeboten, wurde aber in der vorliegenden Arbeit zur Erhöhung der Präzision offline vom Versuchsleiter selbst durchgeführt. In den Pausen vor den erneuten Kalibrierungen bekamen die Versuchspersonen auf Wunsch das Kopfgestell

abgenommen, damit sie einige Minuten entspannen konnten. Der Ablauf eines Durchgangs ist in Abbildung 8.2 zusammengefasst.

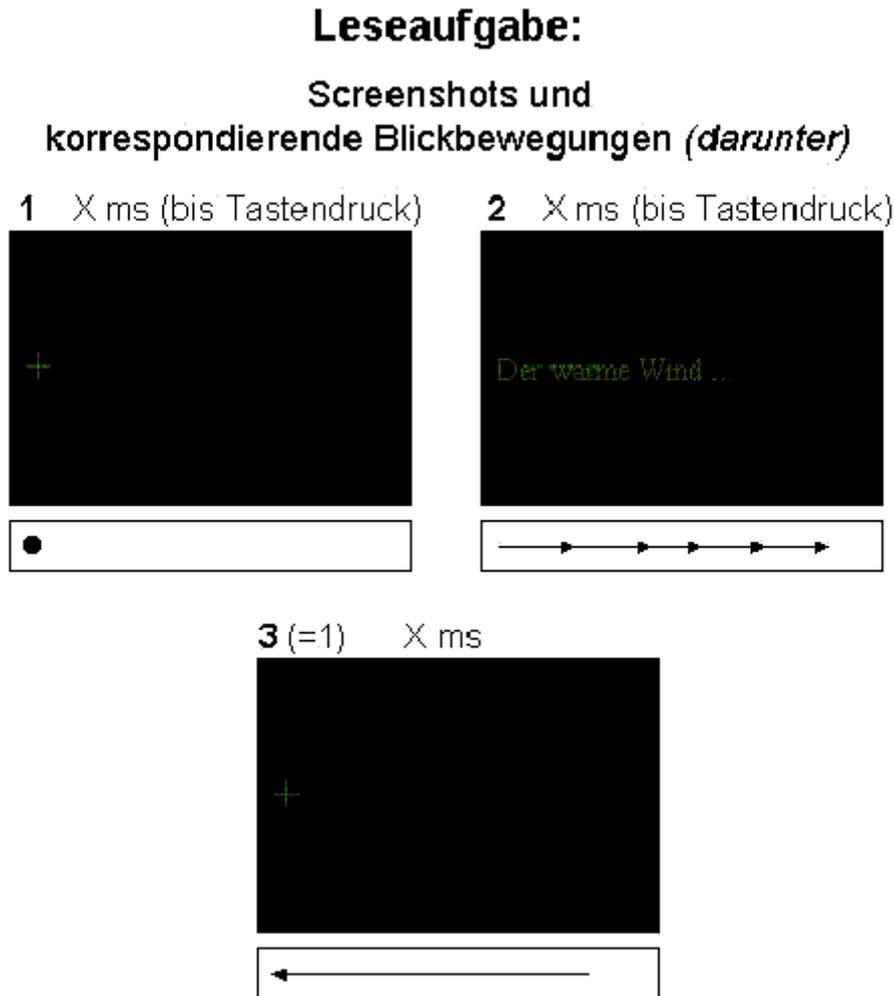


Abbildung 8.2: Leseaufgabe, Ablauf eines einzelnen Durchgangs. Die Reize der Screenshots sind verhältnismäßig größer als im Original. Angegeben sind jeweils die Darbietungszeiten (oben) sowie die instruierten Blickbewegungen (darunter). Für das tatsächlich verwendete Satzmaterial vgl. Anhang C.

8.2.2 Zielwortmaterial

Als Zielwörter dienten 96 Substantive, die bezüglich Ihrer Länge und Worthäufigkeit variiert wurden. Dies wurde durch eine je zweifache Abstufung der Wortlänge (4/5, 10/11 Buchstaben) und Worthäufigkeit (in den logarithmisch gestuften Ausprägungsbereichen <1 und >10 Wörter pro Million; durchschnittlich 0.5 & 130 pro Million) erreicht (siehe Huestegge, 2000; unter Verwendung von Celex, 1995). Damit können die Zielwörter vier Zellen zugeordnet werden. In

jeder Zelle befinden sich 24 Zielwörter (vgl. Anhang B). Da die Sätze aus Huestegge (2000) entnommen wurden, entspricht die gewählte Variation der Worthäufigkeit den dort bewährten Werten. Die Substantive (immer in ihrer Grundform) wurden eingebettet in einzeilige Aussagesätze (max. 82 Anschläge). Ihre Position variierte frei, sie stehen jedoch nie an den ersten oder letzten beiden Wortpositionen im Satz oder der Zeile. Vor den Substantiven stand immer ein 6-10-buchstabiges Adjektiv. Als Grundlage zur Erstellung des Satzmaterials dient ein Sachbuch über das Leben und die Geschichte der Inuit (Eskimos) von Jeier (1977).

Kontrolliert wurden zusätzlich die Anzahl der Silben und die Anzahl der morphologischen Komponenten (Celex, 1995; vgl. z. B. Rayner & Duffy, 1986 für ähnliche Kontrollvariablen). Diese Parameter haben in den Gruppen keine statistisch signifikanten Unterschiede in ihrer Ausprägung. Komposita aus mehreren Substantiven wurden nicht als Zielwörter akzeptiert, da diese das Leseverhalten signifikant beeinflussen (vgl. z.B. Inhoff, Brihl & Schwartz, 1996; Olawsky, 1999). Die nachfolgende Tabelle 8.1 stellt die Kennwerte in zusammenfassender Form für die Variablen Wortfrequenz, Silbenanzahl, Anzahl morphologischer Komponenten und Bigrammfrequenz dar⁶. Zum Mittelwertsvergleich dienten zweiseitige t-Tests, die bezüglich keiner der Variablen signifikante Unterschiede ergaben ($p > 0,05$ für alle Vergleiche).

Tabelle 8.1: Mittlere Wortfrequenzen (pro Million), Silbenanzahl, Anzahl morphologischer Komponenten und Bigrammfrequenzen innerhalb der 2x2 Zielwortklassen. Bei den Bigrammfrequenzen bezieht sich der erste Wert auf die Frequenz bezüglich der konkreten Wortform (*token*), der zweite auf die Häufigkeit des Worttyps (Grundform) insgesamt (*type*).

	Worthäufigkeit	kurze Wörter (4-5 Buchstaben)	lange Wörter (10-11 Buchstaben)
mittlere Wortfrequenz (pro Million)	niedrig	0,49	0,51
	hoch	174,87	132,77
mittlere Silbenanzahl	niedrig	1,46	3,54
	hoch	1,46	3,46
mittlere Anzahl der morphologischen Komponenten	niedrig	1,04	1,67
	hoch	1,13	1,79
mittlere Bigrammfrequenzen	niedrig	1958 / 5317	2364 / 4995
	hoch	2767 / 8649	2906 / 6188

⁶ Für eine vollständige Liste der genannten Parameter für die Zielwörter vgl. Anhang B

8.2.3 Rating der subjektiven Vertrautheit der Zielwörter

Um zusätzlich zur Wortfrequenz auch die subjektive Wortvertrautheit (Gernsbacher, 1984, vgl. Kapitel 8.1.5) zu berücksichtigen, wurde diese für die Targetwörter per Rating-Fragebogen ermittelt⁷. Insgesamt nahmen 20 Probanden an der Untersuchung teil. Keiner dieser Probanden absolvierte zugleich das vorliegende Experiment. Alle in der Hauptuntersuchung verwendeten Targetwörter wurden den Probanden (größtenteils Studenten im Alter von 18 bis 28 Jahren) neben einer großen Anzahl weiterer Wörter vorgelegt. Auf einer Skala von 1-9 (völlig unbekannt bis allgegenwärtig) sollte für jedes Wort ein Urteil abgegeben werden, indem der entsprechende Wert angekreuzt wurde. Die Probanden wurden neben der schriftlichen Instruktion (siehe Anhang D) zusätzlich noch einmal sorgfältig mündlich instruiert, um ein Verständnis im Sinne des Konstruktes „Vertrautheit“ sicherzustellen. Das Ausfüllen des Fragebogens dauerte ungefähr 1,5 Stunden. Die Ergebnisse dieses Ratings sind in Tabelle 8.2 abzulesen.

Tabelle 8.2: Mittelwerte der Ratingergebnisse zur Wortvertrautheit innerhalb der Zielwortklassen (Standardabweichung in Klammern). Die Skala reichte von 1 (allgegenwärtig) bis 9 (völlig unbekannt).

mittlere Ratingwerte	kurze Wörter	lange Wörter
Wortvertrautheit	(4-5 Buchstaben)	(10- 11 Buchstaben)
niedrige Häufigkeit	4,64 (0,67)	4,54 (0,61)
hohe Häufigkeit	2,38 (0,54)	2,33 (0,35)

Innerhalb der jeweiligen Häufigkeitsklassen sind diese Ratingwerte nicht signifikant voneinander verschieden ($p > 0,05$). Die Korrelation zwischen den Ratingwerten und der Wortfrequenz beträgt $r = 0,617$ und ist erwartungsgemäß signifikant ($p < 0,01$). Einige Zielwörter, die im Rating völlig anders beurteilt wurden als ihre Celex-Frequenz vermuten ließ, wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen und gegen „unauffälligere“ ersetzt. Dabei handelte es sich wohl um personengruppenspezifische Effekte: Wörter wie „Stress“ oder „Referat“ sind der untersuchten Population (Studenten) offensichtlich vertrauter, als die nur auf gedruckten Textstichproben des Celex (1995) beruhenden Wortfrequenzwerte vermuten lassen.

⁷ Herzlichen Dank an Claudia Fahrenkrug für die Durchführung dieses Ratings; für den Fragebogen siehe Anhang D.

8.3 Ergebnisse

Das Textverständnis, ermittelt durch den Antwortscore auf die unregelmäßig auftretenden Fragen zum gelesenen Text liegt in der THC-Gruppe mit 53,95 Punkten ($s = 9,43$) signifikant niedriger als in der Kontrollgruppe (59,25 Punkte, $s = 8,44$; $t(38) = 1,87$; $p < 0,05$). Der erreichbare Maximalwert lag bei 68 Punkten⁸.

Die Ergebnisdarstellung bezüglich der Blickbewegungsparameter erfolgt in zwei Stufen. Einige wichtige Variablen wie z.B. die Fixationswahrscheinlichkeit, die Häufigkeit von Regressionen etc. können nur sinnvoll gewonnen werden, wenn der gesamte Datensatz betrachtet wird. Für die Analyse z.B. der Landepositionen sowie der differenzierten wortbasierten zeitlichen Parameter ist es hingegen notwendig, sich auf die kontrollierten Zielwörter zu beschränken. Daher wird im ersten Schritt der Ergebnisdarstellung auf den gesamten Datensatz zurückgegriffen (8.3.2), während im zweiten Teil nur die Zielwörter betrachtet werden (8.3.3).

8.3.1 Ausreißerkriterien

Bei der *Analyse des gesamten Datensatzes*, also aller gelesenen Wörter inklusive der Zielwörter, wurden die ersten beiden Wörter sowie das letzte Wort in jeder Zeile aus der Auswertung genommen. Beim Betrachten der ersten Wörter einer Zeile sind Effekte des Zeilenrücksprungs beteiligt, während auf dem letzten Wort eines Satzes oft länger verweilt wird, um den Satz insgesamt zu verarbeiten. Diese für die jeweiligen Wörter unspezifischen Effekte sind durch diese Auswertungsbeschränkungen ausgeschlossen. Außerdem wurden ausschließlich Fixationsdauern zwischen 50 und 1000 ms in die Auswertung integriert. Zu kurze Fixationen dienen nicht der Informationsaufnahme, während zu lange Fixationen vermutlich auf Messfehler zurückzuführen sind. Sakkaden mit einer Amplitude von mehr als 50 Buchstaben (was einer Sakkade über nahezu den gesamten Satz entspricht) sowie einer maximalen Geschwindigkeit von $< 10^\circ$ pro Sekunde wurden aus der Auswertung ausgeschlossen, da diese Phänomene ebenfalls eher auf Messfehler hindeuten. Es wurden nur gelesene Sätze mit > 4 Fixationen sowie einer Mindestlesezeit von zwei Sekunden in die Auswertung aufgenommen, da die Probanden bisweilen versehentlich früher als intendiert die Taste drückten, die zum Erscheinen des nächsten Satzes führte. Die genannten Ausreißerkriterien sind auf der Basis einer Sichtung der jeweiligen

⁸ Vgl. Kapitel 8.2.1 zum Verfahren der Ermittlung des individuellen Punktescores.

Rohdatenverteilungen sowie der genannten inhaltlichen Erwägungen gewonnen. Durch diese eher groben Kriterien reduziert sich die Anzahl der ausgewerteten Wörter insgesamt von 35045 auf 27638.

Bei der *Analyse der Zielwörter* wurden zunächst alle Wörter aus der Analyse entfernt, bei denen während der ersten Fixation ein Blinzeln auftrat, was bei 1,4% der Daten der Fall war. Fixationsdauern unter 50 ms (1,2%) sowie über 1000 ms (0,8%) wurden ebenfalls aus der Analyse ausgeschlossen (1,2%). Dasselbe gilt für Sakkadenamplituden > 50 Buchstaben (1,2%). Insgesamt wurden durch diese Kriterien 4% des Datensatzes bzgl. der Zielwörter nicht berücksichtigt. Dabei ist zu beachten, dass bei Nichtentsprechung einer der vorgenannten Kriterien nicht das gesamte Wort aus der Analyse genommen wurde, sondern nur die betroffene Fixation. Diese Entscheidung wurde aufgrund der Überlegung getroffen, dass z.B. bei einer einzigen ungewöhnlichen Fixationszeit auf einem Wort nicht alle anderen Informationen, die dieses Wort betreffen, verloren gehen sollten. Eine weitere Ausreißeranalyse wurde daher vorgenommen, nachdem der Datensatz für die einzelnen Wörter aggregiert wurde. Es wurden Gesamtlesezeiten für Wörter von mehr als 5 Sekunden ausgeschlossen, da bei solchen Blickzeiten zu erwarten ist, dass das Wort nicht verstanden bzw. die übliche Leseroutine aus anderen Gründen unterbrochen wurde. Bei der Anzahl der Blicke pro Wort wurden aufgrund der Rohwertesichtung nur Extremwerte ausgeschlossen, d.h. Wörter mit mehr als 16 Fixationen bzw. mehr als 9 Blicken. Insgesamt betreffen diese Kriterien nur 0,8% der Wörter. Die Anwendung der genannten Restriktionen hat zu Folge, dass bei fast allen Probanden jeweils 20 oder mehr Wörter (von maximal 24 pro Zelle) in allen Bedingungen in die Auswertung eingehen. Nur bei den kurzen Wörtern kommt es vermutlich aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit zum Überspringen bei einigen wenigen Probanden dazu, dass weniger Wörter in die Auswertung eingehen, wobei das Minimum bei 17 Wörtern liegt. Damit ist die Basis für eine repräsentative Analyse der Ergebnisse gesichert.

8.3.2 Gesamtdatenmenge (alle Wörter)

Der Maximalwert für die Anzahl der Fixationen pro Satz beträgt 59 (über alle Probanden und Sätze), jeder Satz wurde in weniger als 10 Sekunden gelesen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die zeitlichen und räumlichen Parameter in Abhängigkeit von der Gruppenzugehörigkeit sind zusammen mit den statistischen Kenngrößen in den untenstehenden Tabellen wiedergegeben, falls sie im Text nicht zusätzlich referiert werden.

8.3.2.1 Zeitliche Parameter

Die THC-Gruppe benötigte signifikant mehr Zeit zum Lesen eines Satzes (3534 ms; s = 364) gegenüber der Kontrollgruppe (3243 ms; s = 556; $t(38) = 1,93$; $p < 0,05$). Die mittlere Fixationsdauer in der THC-Gruppe war mit 248 ms um ca. 17 ms gegenüber der Kontrollgruppe signifikant erhöht. Dies bestätigt einen Teil der Hypothese 1. Die Anzahl kurzer Fixationen mit einer Dauer von unter 120 ms unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen und betrug etwa 2% aller Fixationen. Die Geschwindigkeiten für Sakkaden von im Mittel 6° , bei deren Berechnung alle Sakkaden zwischen 5° und 7° einbezogen wurden, unterschied sich ebenfalls nicht signifikant zwischen den Gruppen. Dieser Bereich wurde gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen in den Pro- und Antisakkadenaufgaben zu gewährleisten (vgl. Kapitel 3 und 4).

Tabelle 8.3: Allgemeine zeitliche Parameter in der Leseaufgabe. Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern). Die mittlere Maximalgeschwindigkeit der Sakkaden wurde für die Sakkadenlängen von 5° bis 7° berechnet. Die t-Werte beziehen sich auf den Gruppenvergleich, signifikante Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ gekennzeichnet.

<i>Zeitliche Parameter</i>	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38)
Satzlesedauer (ms)	3243 (364)	3534 (556)	1,93*
Mittlere Fixationsdauer (ms)	231,39 (19,72)	248,26 (27,05)	2,25*
Mittlere sakkadische Maximalgeschwindigkeit (ms)	169,03 (23,80)	185,10 (101,40)	0,69
Anteil kurzer Fixationen < 120 ms (%)	2 (1,2)	2 (1,0)	0,81

8.3.2.2 Räumliche Parameter

Die THC-Gruppe benötigte im Mittel etwa 1,5 Fixationen mehr zum Lesen eines Satzes (12,95; s = 2) als die Kontrollgruppe mit im Mittel 11,59 (s = 1,8) Fixationen ($t(38) = 2,23$; $p < 0,05$). Die mittlere Länge progressiver Sakkaden betrug knapp 7 Buchstaben, was einem Schinkel von $2,3^\circ$ entspricht und unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen. Dieser Befund unterstützt daher nicht die Hypothese 2. Die mittlere Länge regressiver Sakkaden hingegen war in der THC-Gruppe mit 6,4 Buchstaben signifikant geringer als in der Kontrollgruppe (9,5

Buchstaben). Der Unterschied entspricht ungefähr 1° Schwinkel. Im Mittel wurden von der Kontrollgruppe etwa 22% aller Wörter übersprungen, was sich nicht signifikant von 19% übersprungenen Wörtern in der THC-Gruppe unterscheidet. Die Regressionsrate war in der THC-Gruppe mit 26% aller Sakkaden signifikant höher als in der Kontrollgruppe (18%).

Tabelle 8.4: Allgemeine räumliche Parameter in der Leseaufgabe. Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern). Die t-Werte beziehen sich auf den Gruppenvergleich, signifikante Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ gekennzeichnet.

<i>Räumliche Parameter</i>	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)	t-Wert (df=38)
Mittlere Amplitude ($^\circ$) (Progressionen)	6,90 (1,50)	6,63 (1,15)	0,62
Mittlere Amplitude ($^\circ$) (Regressionen)	9,52 (6,14)	6,37 (2,43)	2,14*
Anteil Regressionen (%)	18 (13)	26 (11)	-2,03*
Fixationswahrscheinlichkeit (%)	78 (10)	81 (8)	1,20

8.3.3 Zielwörter

In diesem Abschnitt wird nur die Auswertung bezüglich der Zielwörter berichtet. Die Definitionen der einzelnen Parameter wurden in Abschnitt 8.1 ausführlich dargelegt. Aufgrund der Vielfalt an räumlichen und zeitlichen Parametern soll in diesem Abschnitt nicht jeder Parameter und nicht jede Zielwortbedingung einzeln berichtet werden. Die entsprechenden Daten sind den jeweiligen Tabellen zu entnehmen. Daher wird der Ergebnisbericht eine Übersicht der Resultate insoweit geben, als dies zur Beurteilung der Hypothesen 1 und 2 notwendig ist. Die statistische Absicherung erfolgte durch eine dreifaktorielle ANOVA mit zwei Messwiederholungsfaktoren (Wortfrequenz und –länge) sowie dem Gruppenfaktor.

8.3.3.1 Zeitliche Parameter

Grundsätzlich zeigten sich erwartungsgemäß signifikante Effekte der Wortlänge und -frequenz auf alle zeitlichen Parameter. Dies sind im einzelnen die Einzelfixationsdauer, die initiale Fixationsdauer, die Blickzeit und die Gesamtlesezeit. Längere bzw. niedrigfrequente Wörter werden mit signifikant erhöhten zeitlichen Parametern gelesen als kurze bzw. hochfrequente

Wörter. Bezüglich der Blick- und Gesamtlesezeit sind diese Effekte noch ausgeprägter als bei der initialen Fixationsdauer (vgl. Tabelle 8.5). Außerdem besteht bezüglich der Frequenz und Länge bei allen zeitlichen Parametern eine signifikante Interaktion, d.h. bei den seltenen Wörtern ist der Frequenzeffekt ausgeprägter als bei den häufigen Wörtern. Die relevanten statistischen Kennwerte sind in Tabelle 8.6 wiedergegeben. Die einzelnen Ergebnisse zu den zeitlichen Parametern sind in Abbildung 8.3 in einer Übersicht dargestellt.

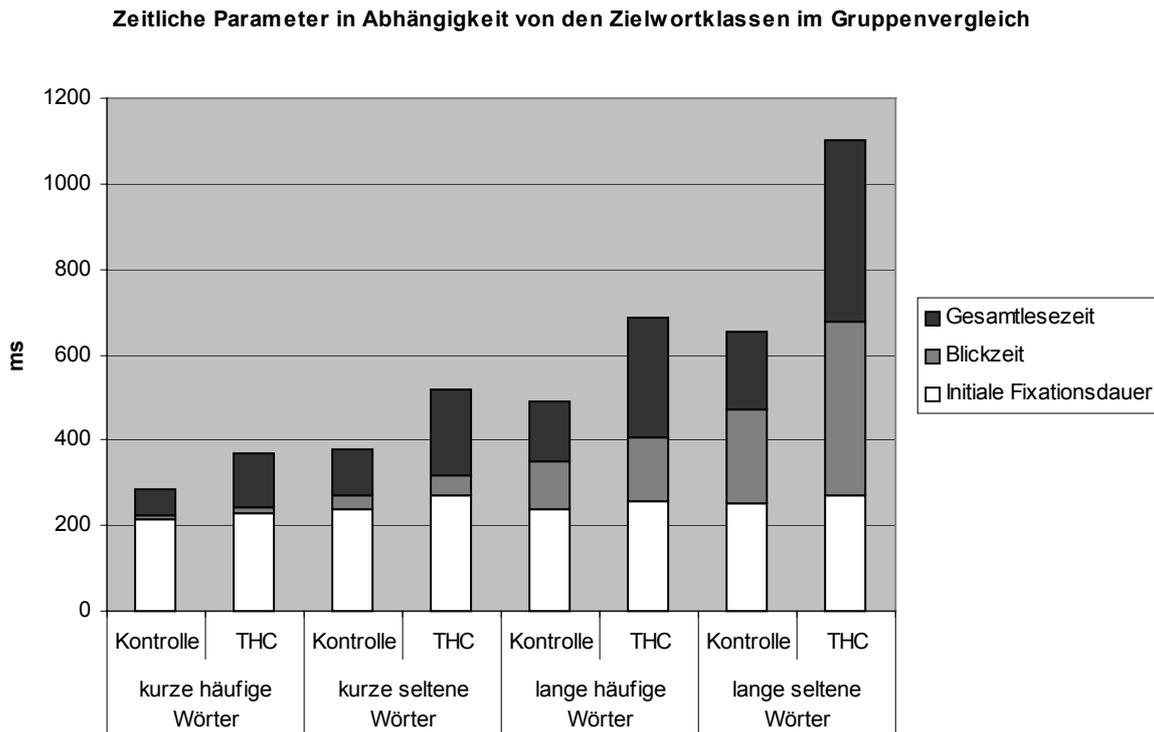


Abbildung 8.3: Zeitliche Parameter (ms) der zielwortbasierten Auswertung der Leseaufgabe für die Kontroll- und THC-Gruppe. Die gesamte Balkenhöhe entspricht der Gesamtlesezeit und setzt sich zusammen aus der initialen Fixationsdauer, den Refixationen sowie dem erneuten Lesen. Die Werte sind dargestellt in Abhängigkeit von den verschiedenen Zielwortklassen. Für die jeweiligen Standardabweichungen vgl. Tabelle 8.5.

Alle genannten zeitlichen Parameter sind in der THC-Gruppe gegenüber der Kontrollgruppe signifikant erhöht. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass bezüglich der Gesamtlesezeiten die THC-Gruppe die Zielwörter insgesamt mindestens 30% (bei kurzen hochfrequenten Wörtern) und bis zu 70% (bei langen, niedrigfrequenten Wörtern) länger liest als die Kontrollgruppe. Damit wird Hypothese 1 insgesamt bestätigt. Außerdem bestehen signifikante Interaktionen des Gruppenfaktors sowohl mit der Frequenz als auch mit der Wortlänge (vgl. Tabelle 8.6). Dies bedeutet, dass die Längen- und Frequenzeffekte auf zeitliche Parameter in der THC-Gruppe generell stärker ausgeprägt sind als in der Kontrollgruppe. Eine Ausnahme bildet hier nur der

Längeneffekt auf die initiale Fixationsdauer, der sich nicht signifikant zwischen den Gruppen unterscheidet (vgl. Tabelle 8.6). Diese Interaktionen werden in Kapitel 8.3.3.4 noch eingehender analysiert. Die globalen mittleren Fixationsdauern auf den Zielwörtern⁹ beträgt 231 ms (s = 19 ms) in der Kontrollgruppe und 248 ms (s = 27 ms) in der THC-Gruppe. Dieser Unterschied ist signifikant ($t(38) = 2,49; p < 0,01$).

Tabelle 8.5: Zeitliche Parameter (ms) der zielwortbasierten Auswertung des Leseexperiments für die vier bezüglich Wortlänge und –frequenz variierten Wortgruppen. Gegenübergestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) für die Kontroll- und die THC-Gruppe.

Mittlere zeitliche Parameter für *kurze häufige* Zielwörter (ms)

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Einzelfixationsdauer	213,93 (21,77)	230,50 (27,77)
Initiale Fixationsdauer	213,50 (17,02)	228,59 (27,71)
Blickzeit	223,51 (21,84)	243,86 (32,31)
Gesamtlesezeit	283,73 (68,65)	367,88 (164,49)

Mittlere zeitliche Parameter für *kurze seltene* Zielwörter (ms)

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Einzelfixationsdauer	233,25 (34,71)	273,37 (41,43)
Initiale Fixationsdauer	238,29 (32,22)	273,92 (41,83)
Blickzeit	272,69 (53,12)	317,34 (80,87)
Gesamtlesezeit	379,51 (126,01)	516,07 (253,55)

Mittlere zeitliche Parameter für *lange häufige* Zielwörter (ms)

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Einzelfixationsdauer	250,13 (52,79)	271,23 (43,34)
Initiale Fixationsdauer	238,97 (26,37)	257,05 (33,30)
Blickzeit	349,48 (86,71)	405,20 (102,72)
Gesamtlesezeit	492,02 (173,96)	686,32 (434,62)

Mittlere zeitliche Parameter für *lange seltene* Zielwörter (ms)

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Einzelfixationsdauer	272,10 (51,74)	344,53 (70,41)
Initiale Fixationsdauer	254,52 (27,74)	271,51 (37,13)
Blickzeit	472,04 (131,02)	677,48 (253,30)
Gesamtlesezeit	655,52 (2217,22)	1102,61 (556,12)

⁹ Diese Werte berücksichtigen also nicht den Typ der Fixation, also ob es sich um einer initiale Fixation, eine Refixation oder eine Fixation nach einer Interwortregression handelt.

Tabelle 8.6: Statistische Kennwerte (F-Werte) der dreifaktoriellen ANOVA bezüglich der zeitlichen Parameter. Signifikante F-Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ gekennzeichnet.

<i>F-Werte (1,38)</i>	UV Länge	UV Frequenz	UV Gruppe	Interaktion Länge – Frequenz	Interaktion Gruppe – Länge	Interaktion Gruppe – Frequenz
Einzelfixationsdauer	69,99*	26,24*	5,86*	5,14*	6,50*	5,52*
Initiale Fixationsdauer	16,72*	87,38*	7,88*	9,65*	0,54	4,14*
Blickzeit	146,07*	98,81*	7,87*	80,57*	7,84*	11,17*
Gesamtlesezeit	96,96*	80,93*	6,98*	40,62*	8,89*	11,11*

8.3.3.2 Fixationshäufigkeiten

In diesem Abschnitt wird die mittlere Anzahl von Fixationen im ersten Lesedurchgang als Maß für die Refixationshäufigkeit sowie die mittlere Gesamtfixationshäufigkeit berichtet. Damit hängt auch die mittlere Anzahl der Blicke zusammen, die gesondert ausgewiesen wird. Zuletzt wird auf die Anzahl besonders kurzer Fixationen eingegangen. Die jeweiligen Mittelwerte, Standardabweichungen und statistischen Kenngrößen sind in den Tabellen 8.7 und 8.8 zusammengestellt.

Längere Wörter werden sowohl im ersten Lesedurchgang als auch insgesamt statistisch signifikant häufiger fixiert als kurze. Dieser Effekt ist bei seltenen Wörtern stärker ausgeprägt (Interaktion). Seltene Wörter werden ebenfalls sowohl im ersten Lesedurchgang wie auch insgesamt signifikant häufiger fixiert als geläufige Wörter. Dieser Effekt ist für lange Wörter größer als für kurze und findet seinen Widerklang in der Anzahl der Blicke: Die mittlere Zahl der Blicke ist für lange Wörter höher als für kurze und für seltene höher als für häufige Wörter. Auch diese Effekte sind signifikant.

Bezüglich dieser drei Parameter sind die Häufigkeiten für die THC-Gruppe nominell höher als für die Kontrollgruppe, was die Ergebnisse zu den zeitlichen Parametern (vgl. Kapitel 8.3.3.1) widerspiegelt. Diese Gruppenunterschiede sind statistisch signifikant für die Gesamtanzahl der Fixationen pro Wort sowie für die Anzahl der Fixationen im ersten Durchgang (vgl. Tabelle 8.8 für die entsprechenden statistischen Kennwerte). Ersteres spiegelt die Ergebnisse zur Gesamtlesezeit wider, während letzteres auf eine erhöhte Refixationsrate zurückzuführen ist, die besonders bei den langen Wörtern in der THC-Gruppe im Vergleich zu den Kontrollprobanden

auftritt. Da in der Analyse der Prosakkaden die Häufigkeit von Express-Sakkaden erhoben wurde (vgl. Kapitel 3.4), sollte dieser Parameter in der Auswertung der Lesedaten ebenfalls berücksichtigt werden. Bezüglich aller Zielwortklassen besteht kein signifikanter Gruppenunterschied bezüglich der Häufigkeit besonders kurzer Fixationen unter 120 ms.

Tabelle 8.7: Mittlere Fixationshäufigkeiten der zielwortbasierten Auswertung des Leseexperiments für die vier bezüglich Wortlänge und -frequenz variierten Wortgruppen. Übersprungene Wörter gehen nicht in die Werte ein. Der Anteil kurzer Fixationsdauern bezieht sich auf solche unter 120 ms. Gegenübergestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) für die Kontroll- und die THC-Gruppe.

Mittlere Anzahl der Fixationen auf *kurzen seltenen* Zielwörtern

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Anzahl Fixationen (1. Durchgang)	1,18 (0,13)	1,21 (0,21)
mittlere Gesamtanzahl	1,65 (0,47)	2,02 (0,99)
Anzahl Blicke	1,48 (0,43)	1,74 (0,88)
Anteil kurzer Fixationsdauern (%)	5 (3)	4 (3)

Mittlere Anzahl der Fixationen auf *kurzen häufigen* Zielwörtern

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Anzahl Fixationen (1. Durchgang)	1,06 (0,53)	1,08 (0,83)
mittlere Gesamtanzahl	1,33 (0,28)	1,65 (0,81)
Anzahl Blicke	1,29 (0,30)	1,52 (0,72)
Anteil kurzer Fixationsdauern (%)	3 (5)	3 (3)

Mittlere Anzahl der Fixationen auf *langen seltenen* Zielwörtern

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Anzahl Fixationen (1. Durchgang)	2,07 (0,49)	2,67 (0,93)
mittlere Gesamtanzahl	2,80 (0,90)	4,34 (2,24)
Anzahl Blicke	1,59 (0,54)	2,05 (0,97)
Anteil kurzer Fixationsdauern (%)	6 (4)	5 (5)

Mittlere Anzahl der Fixationen auf *langen seltenen* Zielwörtern

	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
Anzahl Fixationen (1. Durchgang)	1,57 (0,33)	1,72 (0,45)
mittlere Gesamtanzahl	2,20 (0,74)	2,91 (1,78)
Anzahl Blicke	1,54 (0,50)	1,89 (1,08)
Anteil kurzer Fixationsdauern (%)	5 (4)	5 (4)

Tabelle 8.8: Statistische Kennwerte (F-Werte) der dreifaktoriellen ANOVA bezüglich der räumlichen Parameter. Signifikante F-Werte ($p < 0,05$) sind mit „*“ gekennzeichnet.

$F(1,38)$	UV Länge	UV Frequenz	UV Gruppe	Interaktion Länge – Frequenz	Interaktion Gruppe – Länge	Interaktion Gruppe – Frequenz
Anzahl Fixationen (1. Durchgang)	125,03*	98,17*	4,10*	92,26*	5,08*	7,21*
mittlere Gesamtanzahl	95,30*	90,03*	4,60*	59,12*	7,35*	9,51*
Anzahl Blicke	35,38*	20,44*	2,17	2,57	3,50	1,12
Anteil kurzer Fixationsdauern	10,50*	3,26	0,94	0,49	0,15	1,44

8.3.3.3 Die initiale Landeposition im Wort als räumlicher Parameter

Bezüglich der Landepositionen ist erwartungsgemäß ein deutlicher Effekt der Wortlänge zu verzeichnen. Bei den kurzen Wörtern landen die Probanden im Mittel knapp hinter der zweiten Buchstabenposition, während sie bei den langen Wörtern kurz vor der vierten Buchstabenposition landen ($F(1,38) = 214,10$; $p < 0,01$). Kleiner, aber ebenfalls signifikant ist auch ein Effekt der Wortfrequenz. Bei häufigen Wörtern landen die Probanden etwa 0,15 Buchstabeneinheiten weiter rechts im Wort ($F(1,38) = 7,67$; $p < 0,01$). Die jeweiligen Mittelwerte sind in Tabelle 8.9 wiedergegeben. Es gibt keine statistisch bedeutsame Interaktion zwischen den Variablen Frequenz und Länge. Die Gruppen unterscheiden sich nicht bezüglich ihrer initialen Landeposition ($F(1,38) = 0,09$; $p > 0,05$). Damit kann Hypothese 2 nicht bestätigt werden (vgl. Abbildung 8.4). Auch die Interaktionen zwischen den Variablen Gruppe und Länge bzw. Frequenz sind nicht signifikant. Im Anhang E finden sich für beide Gruppen zusätzlich die Landepositionsverteilungen für alle Zielwortklassen. Auch wenn dort in einigen Bedingungen die Verteilung für die THC-Gruppe nach rechts verschoben scheint, ist diese Tendenz statistisch nicht bedeutsam.

Tabelle 8.9: Initiale Landposition im Wort als räumlicher Parameter in Abhängigkeit von Wortlänge und Wortfrequenz für die Kontroll- und THC-Gruppe.

Mittlere Landeposition im Wort (Buchstaben)	Kontrollgruppe (SD)	THC-Gruppe (SD)
kurze seltene Wörter	2,32 (0,38)	2,31 (0,36)
kurze häufige Wörter	2,43 (0,37)	2,42 (0,29)
lange seltene Wörter	3,64 (0,81)	3,73 (0,84)
lange häufige Wörter	3,80 (0,77)	3,93 (0,85)

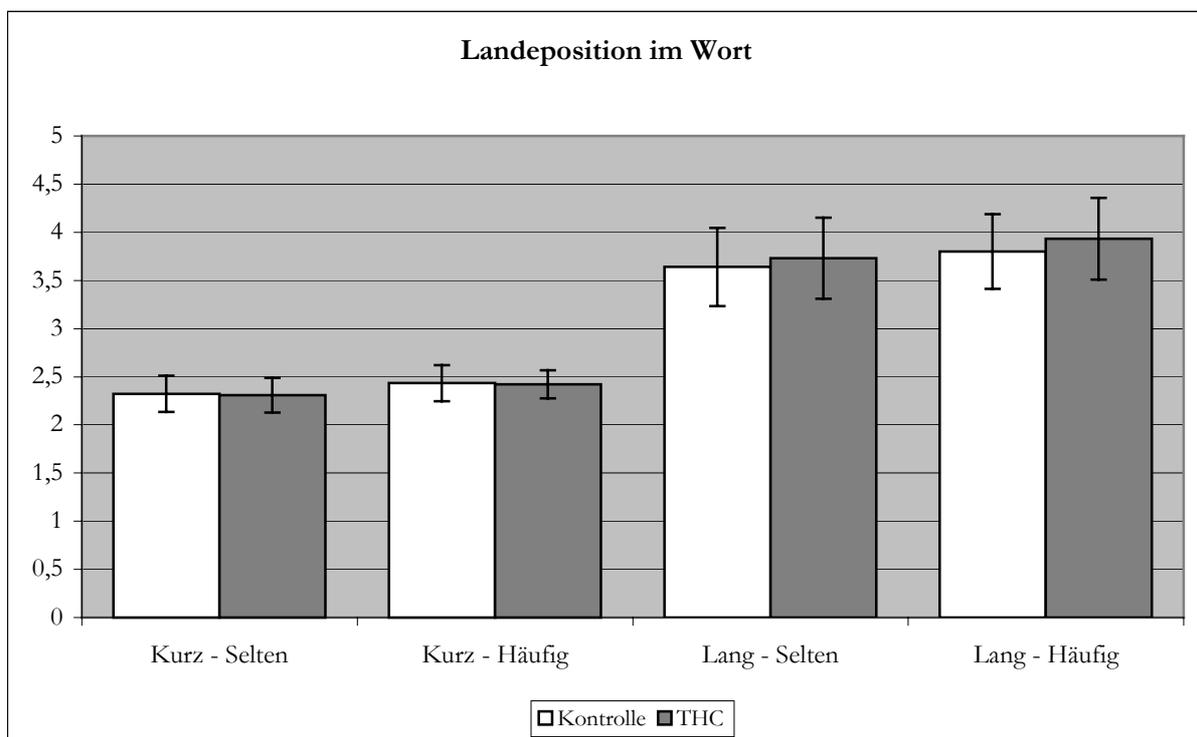


Abbildung 8.4: Mittlere Landeposition (Buchstabeneinheiten) in den Zielwörtern für die vier Wortklassen im Gruppenvergleich.

In Abbildung 8.5 sind die mittleren initialen Landepositionen in Abhängigkeit von der Startdistanz für Interwortprogressionen (links) und Interwortregressionen (rechts) abgetragen. Man erkennt deutlich die typische Linearität (vgl. Kapitel 8.1.2.3) bei den Progressionen, die für lange Wörter parallel nach oben verschoben ist. Für Interwortregressionen fehlt dieser lineare Zusammenhang. Mit einer höheren Streuung landen die Sakkaden in etwa in der Wortmitte der langen und kurzen Wörter. Wertet man die fehlende Linearität für die Interwortregressionen als Merkmal für ein spatial coding im Sinne von Gedächtnisinhalten, so lassen die Ergebnisse diesbezüglich nicht auf einen Gruppenunterschied schließen.

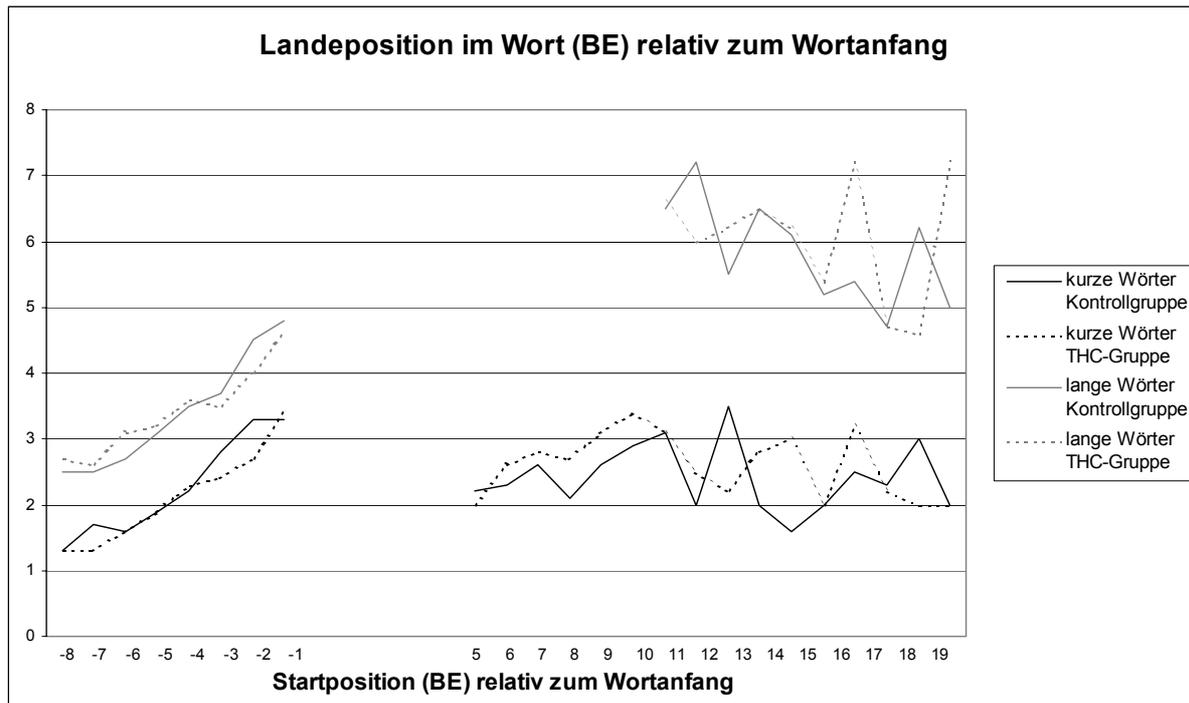


Abbildung 8.5: Mittlere Landeposition (Buchstabeneinheiten) relativ zum Wortanfang für Interwortprogressionen (links) und –regressionen (rechts) in den Zielwörtern in Abhängigkeit von der Wortlänge für beide Gruppen.

8.3.3.4 Der Wortlängen- und der Wortfrequenzeffekt im Gruppenvergleich

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse der Leseforschung eignen sich der Wortlängen und -frequenzeffekt für die Einschätzung separater Mechanismen in der Blickbewegungssteuerung beim Lesen (vgl. Kapitel 8.1). Gruppenunterschiede bezüglich des Wortfrequenzeffektes auf zeitliche Parameter, vor allem die Blickzeit, spiegeln Unterschiede in der Wortverarbeitung wider, während der Effekt der Wortlänge auf die Landeposition eher grundlegende okulomotorische Routinen abbildet. Um die in den Tabellen 8.6 und 8.8 ausgewiesenen Interaktionen des Gruppenfaktors mit den Faktoren Wortlänge bzw. -frequenz genauer interpretieren zu können, werden im Folgenden die einfachen Haupteffekte (EHE) genauer betrachtet und statistisch abgesichert.

Sowohl der Wortlängeneffekt als auch der Wortfrequenzeffekt auf die zeitlichen Parameter ist in der THC-Gruppe signifikant stärker ausgeprägt als in der Kontrollgruppe. Dies gilt bezüglich der Parameter Blickzeit und Gesamtlesezeit, bezüglich der initialen Fixationsdauer jedoch nur für den Frequenzeffekt (vgl. Tabellen 8.10 und 8.11). In einigen Bedingungen sind die Effekte dabei in

der THC-Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe mehr als doppelt so hoch. Gruppenunterschiede bezüglich der Effekte auf die zeitliche Verarbeitung beim Lesen (vgl. Hypothese 1) können damit deutlich bestätigt werden.

Tabelle 8.10: Längeneffekte auf zeitliche und räumliche Blickbewegungsparameter im Gruppenvergleich. Angegeben sind die Differenzen der jeweiligen abhängigen Variable zwischen langen und kurzen Wörtern, gemittelt über beide Frequenzbedingungen. Die t-Werte beziehen sich auf die einfachen Haupteffekte (EHE), signifikante Unterschiede ($p < 0,05$; Bonferroni-adjustiert) sind mit „*“ gekennzeichnet.

Längeneffekte <i>(Differenzwerte)</i>	Kurze Wörter (SD)	Lange Wörter (SD)	t-Wert (df=38)
initiale Fixationsdauer (ms)	20,85 (15,77)	14,52 (35,34)	0,73
Blickzeit (ms)	162,66 (81,33)	260,73 (133,90)	2,80*
Gesamtlesezeit (ms)	242,15 (113,91)	452,49 (294,21)	2,98*
mittlere Fixationsanzahl (%) (1. Durchgang)	0,70 (0,35)	1,05 (0,60)	2,26*
mittlere Gesamtanzahl an Fixationen (%)	1,01 (0,50)	1,79 (1,18)	2,71*
Anteil kurzer Fixationsdauern (%)	1 (3)	2 (4)	0,39
Anzahl Blicke	0,18 (0,23)	0,35 (0,32)	1,87
Landeposition im Wort (Buchstabeneinheiten)	1,34 (0,61)	1,47 (0,61)	0,64

Die Ergebnisse bezüglich der zeitlichen Parameter spiegeln sich ebenso in den Fixationshäufigkeiten im ersten Lesedurchgang sowie in der Anzahl der Blicke. Bezüglich aller Parameter sind die Längen- und Frequenzeffekte nominell höher in der THC-Gruppe als in der Kontrollgruppe. Diese Unterschiede sind allerdings nur für die Längeneffekte statistisch signifikant (vgl. Tabelle 8.10).

Da bezüglich der initialen Landepositionen bereits kein Haupteffekt des Faktors Gruppe nachgewiesen werden konnte (vgl. Kapitel 8.3.3.3), treten hierbei auch keine unterschiedlichen Effektgrößen für die Gruppen auf. Gruppenunterschiede im Wortlängeneffekt bezüglich der Landeposition im Wort konnten somit nicht nachgewiesen werden (vgl. Hypothese 2).

Tabelle 8.11: Frequenzeffekte auf zeitliche und räumliche Blickbewegungsparameter im Gruppenvergleich. Angegeben sind die Differenzen der jeweiligen abhängigen Variable zwischen seltenen und häufigen Wörtern, gemittelt über beide Längenbedingungen. Die t-Werte beziehen sich auf die einfachen Haupteffekte (EHE), signifikante Unterschiede ($p < 0,05$; Bonferroni-adjustiert) sind mit „*“ gekennzeichnet.

Frequenzeffekte <i>(Differenzwerte)</i>	Seltene Wörter (SD)	Häufige Wörter (SD)	t-Wert (df=38)
initiale Fixationsdauer (ms)	20,17 (17,06)	31,40 (17,82)	2,03*
Blickzeit (ms)	85,87 (46,25)	172,88 (106,83)	3,34*
Gesamtlesezeit (ms)	129,64 (83,02)	282,24 (187,16)	3,33*
mittlere Fixationsanzahl (%) (1. Durchgang)	0,31 (0,15)	0,53 (0,35)	2,69*
mittlere Gesamtanzahl an Fixationen (%)	0,46 (0,34)	0,90 (0,54)	3,08*
Anteil kurzer Fixationsdauern (%)	0,02 (0,04)	0,00 (0,03)	1,20
Anzahl Blicke	0,12 (0,25)	0,19 (0,18)	1,06
Landeposition im Wort (Buchstabeneinheiten)	-0,14 (2,8)	-0,16 (0,39)	0,21

8.4 Diskussion

Die Parameter bezüglich der Gesamtdatenmenge, in die alle gelesenen Wörter eingehen, bewegen sich im Bereich der bereits bekannten Werte aus Huestegge (2000), wo in einer vergleichbaren Versuchsanordnung mit denselben Sätzen im Mittel 14 Fixationen und 3181 ms benötigt wurden, um einen Satz zu lesen. Damit erfährt die Reliabilität der Blickbewegungsanalyse beim Lesen eine eindrucksvolle Bestätigung.

Die erhöhte Zeit der THC-Gruppe bezüglich der globalen Parameter lässt sich einerseits den verlängerten mittleren Fixationsdauern zurechnen und andererseits der signifikant erhöhten Regressionsrate. Diese Parameter deuten auf Defizite der basalen Sakkadensteuerung oder in der Wortverarbeitung hin. Die erhöhten mittleren Fixationszeiten werden bei der ausschließlichen Analyse der Zielwörter bestätigt, da auch dort die globalen mittleren Fixationszeiten signifikant höher waren. Die erhöhte Regressionsrate kann daher rühren, dass das Arbeitsgedächtnis bei den Cannabiskonsumenten gestört ist, so dass diese häufiger zu bereits gelesenen Wörtern zurückkehren müssen. Die Analyse der Landepositionen in Abhängigkeit von der Startdistanz der Sakkaden für Progressionen und Interwortregressionen konnte allerdings keine Unterschiede

zwischen den Gruppen zutage bringen. Ein Defizit im *spatial coding* von Wortpositionen hätte vermuten lassen, dass auch bei Interwortregressionen ein linearer Zusammenhang zwischen Startdistanz und Landeposition zum Vorschein kommen würde (vgl. Kapitel 8.1.2.3). Es bleibt allerdings anzumerken, dass die Existenz eines solchen *spatial coding* wie auch der mögliche Zusammenhang zu Arbeitsgedächtnisprozessen in der Literatur noch weitgehend ungeklärt geblieben ist.

Die Ergebnisse bezüglich der zeitlichen Parameter bei den Zielwörtern zeigen konsistent verlängerte Blick- und Gesamtlesedauern in der THC-Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die erhöhten Blickdauern könnten dabei Schwierigkeiten mit der lokalen Wortverarbeitung reflektieren, während die noch stärker erhöhten Gesamtlesezeiten eventuell Verständnisschwierigkeiten auf der Satzebene oder bezüglich der syntaktischen Struktur wiedergeben. Dieses Muster wird durch entsprechend erhöhte Fixationshäufigkeiten im ersten Lesedurchgang sowie insgesamt widergespiegelt. Generell führen mehrere Fixationen auf einem Wort automatisch zu einer höheren Blick- und Gesamtlesezeit (vgl. Kapitel 8.1). Die Schwierigkeiten bei der Wortverarbeitung führen außerdem dazu, dass der Wortfrequenzeffekt auf die zeitlichen Parameter in der THC-Gruppe größer ist, was durch die signifikante Interaktion der Faktoren Gruppe und Frequenz sichtbar wird.

Möglicherweise sind die generell erhöhten mittleren Fixationszeiten durch eine allgemeine zeitliche Trägheit des sakkadischen Systems mitbedingt, wie sie in den Grundlagenexperimenten bezüglich der Pro- und Antisakkaden nachgewiesen werden konnte (vgl. Kapitel 3 und 4). Dieser Effekt wird allerdings überlagert von einem größeren Defizit in der linguistischen Verarbeitung. Damit sind insgesamt drei unabhängige Quellen der schlechteren Leseleistung der THC-Gruppe anzunehmen: Einerseits eine grundlegende Verzögerung in der zeitlichen Verarbeitung des okulomotorischen Systems, eine allgemeine Verzögerung in der Wortverarbeitung sowie eine geringere Kapazität des Arbeitsgedächtnisses. Die Unterschiede zwischen den Gruppen in der linguistischen Verarbeitung können dabei nicht auf einen möglichen geringeren Wortschatz in der THC-Gruppe zurückgeführt werden. Obwohl dies nicht direkt getestet werden konnte, ist dieser Einwand nicht mit der Tatsache kompatibel, dass sich diese Defizite auch bei sehr leichten und kurzen Wörtern zeigen. Die Wörter dieser Gruppe bilden eine Extremgruppe hochvertrauter Wörter (s. Huestegge, 2000) und stellen geringe Anforderungen an den Wortschatz der hier untersuchten Stichprobe. Zudem zeichnen sich die hier untersuchten Cannabisprobanden durch eine überdurchschnittlich hohe Intelligenz aus (vgl. Kapitel 2.2.1).

Gegen Defizite in der räumlichen Steuerung sprechen die vergleichbaren Fixationswahrscheinlichkeiten beider Gruppen, die ähnlichen progressiven Sakkadenamplituden und vergleichbare Landepositionen im Wort. Da beim Lesen die Sakkaden nicht visuell geführt werden wie in der Prosakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 3), wäre eine Übertragung der räumlichen Defizite aus den Grundlagenexperimenten anzunehmen, die sich in den Experimenten 3 und 4 gezeigt haben (s. Kapitel 4 & 5). Offensichtlich werden diese Defizite nicht in der räumlichen Metrik der Blickbewegungen beim Lesen sichtbar. Es bleibt allerdings möglich, dass zwei gegenläufige Tendenzen einen Effekt auf räumlich Parameter nicht erkennbar werden lassen. Einerseits ist bekannt, dass unter erhöhten Anforderungen die initialen Landepositionen an den Wortanfang verschoben werden. Da aus den Ergebnissen eindeutig hervorgeht, dass die THC-Gruppe mit dem Lesen vor größere Schwierigkeiten gestellt ist, wäre also eine Verschiebung der Landeposition zum Wortanfang hin zu erwarten. Auf der anderen Seite haben die Grundlagenexperimente zu nicht-visuell geführten Sakkaden sowie die Ergebnisse zur visuellen Suche (vgl. Kapitel 2, 4 und 5) gezeigt, dass sich die THC-Gruppe durch eine allgemeine Hypermetrie nicht visuell geführter Sakkaden im Vergleich zur Kontrollgruppe auszeichnet. Dieser Befund würde erwarten lassen, dass die Landeposition im Wort eher nach rechts verschoben wird. Möglicherweise gleichen sich diese gegenläufigen Mechanismen dahingehend aus, dass keine Gruppenunterschiede für die initialen Landepositionen nachweisbar sind.

Insgesamt bleibt also festzuhalten, dass ähnliche Defizite, die in den Grundlagenexperimenten festgestellt werden konnten, sich auch in einer hoch alltagsrelevanten Aufgabe, nämlich dem Lesen, wiederholen. Vor allem bezüglich der zeitlichen Parameter konnten erhebliche Gruppenunterschiede nachgewiesen werden, die nicht durch Unterschiede im Wortschatz oder der Intelligenz erklärt werden können, sondern auf Probleme der linguistischen Verarbeitung einzelner Wörter und syntaktischer Strukturen hindeuten. Andererseits waren auch allgemein höhere Fixationsdauern zu verzeichnen, was für eine grundsätzliche Benachteiligung bei der zeitlichen Sakkadengenerierung in der THC-Gruppe spricht (vgl. Kapitel 3 und 4). Zuletzt fanden sich in der Analyse der Regressionen und des Antwortverhaltens ebenfalls Hinweise auf eine Beeinträchtigung des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Kapitel 2, 4 und 5). Offensichtlich haben chronische Cannabis-User mit frühem *age of onset* insgesamt beträchtliche Schwierigkeiten mit der Blicksteuerung sowie der Wortverarbeitung beim Lesen.

9. Zusammenfassung und Fazit

Nachdem alle Experimente in den vorhergehenden Kapiteln berichtet worden sind, soll hier eine Zusammenschau aller Experimente versucht und eine Einordnung in die aktuelle Forschungslage gegeben werden. Es wurde von dem Befund ausgegangen, dass langjährige Cannabiskonsumenten ohne akute Intoxikation auffällig in einer visuellen Suchaufgabe, jedoch nicht in anderen Aufgaben einer neuropsychologischen Testbatterie waren (Ehrenreich et al., 1999). Dieses Defizit betraf dabei nur Probanden, die vor ihrem 16. Lebensjahr mit dem Konsum begonnen haben. Eine naheliegende Interpretation zu der Tatsache, dass Defizite nur in der visuellen Suchaufgabe sichtbar wurden, war folgende: Da nur in dieser Aufgabe die effiziente Steuerung der Blicke notwendig ist, könnten diesbezügliche Probleme für die geringere Leistung verantwortlich sein (vgl. Kapitel 1). Daher hat sich die vorliegende Untersuchungsreihe mit dem Vergleich der Blicksteuerung zwischen einer Gruppe von Cannabiskonsumenten ohne akute Intoxikation mit frühem *age of onset* und Kontrollprobanden in verschiedenen Aufgaben beschäftigt. Die Auswahl einer neuen Stichprobe von THC-Usern wurde in Anlehnung an die Studie von Ehrenreich et al. mit großer Sorgfalt durchgeführt, da methodische Defizite früherer Experimente minimiert werden sollten. Vor allem wurde weitestgehend sichergestellt, dass die Cannabiskonsumenten keine oder nur unbedeutende Mengen anderer Drogen konsumierten und andererseits Probanden waren, die keine psychiatrischen Auffälligkeiten aufwiesen und als intelligente, erfolgreiche Menschen ihren Alltag bewältigten. Diese Kriterien wurden durch Blut- und Urinanalysen, psychiatrische und allgemeine Interviews sowie Intelligenzscreenings sichergestellt (vgl. Kapitel 2.2.1).

Den Ausgangspunkt bildete ein Experiment, in dem die gleiche visuelle Suchaufgabe anhand einer neuen Stichprobe von Cannabis- und Kontrollprobanden durchgeführt wurde, wobei zusätzlich das Blickverhalten registriert wurde (Kapitel 2). Diese Aufgabe hatte zwei Zielstellungen: Einerseits sollten die Ergebnisse von Ehrenreich et al. anhand einer neuen Stichprobe repliziert werden. Diese Replikation war eine notwendige Vorbedingung für die nachfolgenden Experimente und erschien notwendig, da besonders bezüglich der Erforschung von Langzeiteffekten von Cannabis Replikationen von Befunden in der Vergangenheit häufig fehlgeschlagen sind (vgl. Kapitel 1). Andererseits sollte direkt untersucht werden, welche Unterschiede im Blickverhalten für die Reaktionszeitunterschiede verantwortlich sein könnten. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Befunde von Ehrenreich et al. (1999) repliziert werden konnten. Durch die Analyse der Blickbewegungen zeigten sich Unterschiede auf mehreren Ebenen. Einerseits konnte gezeigt werden, dass die Anzahl von wiederholten Fixationen auf bereits

abgesuchten Reizen in dieser Aufgabe in der THC-Gruppe erhöht war, was für eine Beeinträchtigung des räumlichen Arbeitsgedächtnisses für bereits abgesuchte Positionen im Suchfeld spricht. Dieser Befund wird untermauert durch die bereits bekannten Effekte von Cannabis auf Gedächtnisprozesse (vgl. Kapitel 1). Andererseits war in der THC-Gruppe eine andere Strategie der Suche zu erkennen, die durch längere Sakkaden einerseits und ein eher sorgfältiges, mit mehr Fixationen pro Zeile operierendes Verhalten andererseits gekennzeichnet war. Insgesamt konnten also Unterschiede in der Blicksteuerung nachgewiesen werden, wobei aufgrund der Komplexität der visuellen Suchaufgabe nur bedingt Rückschlüsse auf gestörte Teilkomponenten möglich waren.

Um direkt verschiedene Teilleistungen der Blicksteuerung an der untersuchten THC-Gruppe zu testen, wurde das Rahmenmodell von Findlay & Walker (1999) zur Sakkadengenerierung herangezogen, um modellorientiert und systematisch einzelne Teilleistungen der visuellen Informationsverarbeitung und Okulomotorik überprüfen zu können (vgl. Kapitel 3.1). Die einfachste Komponente der Blicksteuerung ist das Ausführen einer Prosakkade zu einem in der Peripherie erscheinenden Zielreiz. Mit dieser Aufgabe lässt sich die basale zeitliche und räumliche Sakkadensteuerung überprüfen. Ergänzt wurde diese Aufgabe durch die Einführung einer sogenannten Gap-Bedingung, bei der u.a. spezifische Prozesse im Hirnstamm zu einer charakteristischen Verkürzung der Reaktionszeit führen (vgl. Kapitel 3.2). Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die THC-Gruppe in dieser Aufgabe ebenso gut wie die Kontrollprobanden in der Lage war, den Zielreiz mit einer Sakkade anzusteuern, dass sie jedoch in allen Bedingungen eine längere Latenz aufwies. Das Experiment deutet also in die Richtung einer Beeinträchtigung der zeitlichen Informationsverarbeitung bei der Sakkadengenerierung.

Nachdem mittels der Prosakkadenaufgabe die Fähigkeit zur Ausführung reflexhafter Sakkaden untersucht wurde, war die nachfolgende Antisakkadenaufgabe zur Untersuchung willentlicher Sakkaden geeignet (Kapitel 4). Bei dieser Aufgabe müssen Sakkaden zu in der Peripherie aufleuchtenden Reizen unterdrückt und stattdessen in entgegengesetzter Richtung mit derselben Amplitude ausgeführt werden. Auch in dieser Aufgabe zeigte sich eine Latenzverlängerung der THC-Gruppe, so dass dieser Befund als robust gelten kann. Zusätzlich waren aber auch die Sakkadenamplituden in dieser Aufgabe in der THC-Gruppe verlängert. Offensichtlich zeichnet sich die THC-Gruppe also auch durch ein Defizit in der räumlichen Sakkadengenerierung aus, das aber nur bei nicht visuell geführten Sakkaden zum Vorschein kommt.

Da bei der visuellen Suche die Ergebnisse für eine mögliche Beeinträchtigung des räumlichen Arbeitsgedächtnisses sprachen, wurde eine Aufgabe in die Untersuchungsreihe integriert, in der spezifisch für die Blicksteuerung relevante Gedächtnisprozesse abgebildet werden. Bei der sogenannten memory guided-Sakkadenaufgabe muss ebenfalls wie bei den Antisakkaden eine Reflexbewegung zu einem in der Peripherie aufleuchtenden Reiz unterdrückt werden, um dann eine gewisse Zeit nach Erlöschen des Reizes an dessen vormalige Position eine Sakkade auszuführen (Kapitel 5). In dieser Aufgabe konnten wie bei den Antisakkaden verlängerte Amplituden in der THC-Gruppe nachgewiesen werden. Dies bestätigt die Beeinträchtigung der räumlichen Steuerung nicht visuell geführter Sakkaden und legt nahe, dass diese Beeinträchtigung insgesamt durch ein mangelndes räumliches Arbeitsgedächtnis erklärt werden kann. In dieser Aufgabe, bei der eine verzögerte Reaktion erforderlich ist, zeigten sich im Gegensatz zu den bisher berichteten Experimenten keine Latenzverlängerungen. Dies deutet darauf hin, dass das zeitliche Defizit der THC-Gruppe aus den Pro- und Antisakkadenaufgaben nicht der Ausführung einer Sakkade zuzuschreiben ist, sondern eher dem zeitlich vorgelagerten Prozess der Zielauswahl und Parametrisierung.

Um die Fähigkeit des sakkadischen Systems einschätzen zu können, auf neu einkommende Information schnell und flexibel zu reagieren, wurde die THC-Gruppe in einem double step-Experiment mit der Kontrollgruppe verglichen (Experiment 6). In diesem Experiment erscheint in der Peripherie ein Zielreiz, und es beginnt die Programmierung einer Sakkade zu diesem Zielreiz. Während dieses Prozesses springt dieser Reiz in einigen Bedingungen weiter nach außen, so dass die ursprünglich programmierte Sakkade kurzfristig durch eine andere zu ersetzen ist. In Abhängigkeit von der Reprogrammierungszeit, also der Dauer zwischen dem Eintreffen der neuen Information und dem Beginn der Primärsakkade, ändert sich systematisch die Sakkadenamplitude. Wenn wenig Zeit zur Reprogrammierung verbleibt, landet die Sakkade eher auf der Position des ersten Reizes, während bei hinreichend langer Reprogrammierungszeit die Sakkade die äußere Position ansteuert. Dieser grundlegende Befund (vgl. Becker & Jürgens, 1979) konnte im vorliegenden Experiment bei allen Probanden bestätigt werden, doch fanden sich keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Damit scheint die Fähigkeit zur schnellen Verarbeitung neuer Information für die Blicksteuerung in der THC-Gruppe intakt zu sein.

Da sich in der visuellen Suchaufgabe bei der THC-Gruppe eine schlechtere Leistung und vermehrte Fixationen gezeigt haben, war eine mögliche Erklärung hierfür eine verminderte visuelle Spanne bei den THC-Probanden. Die visuelle Spanne bezeichnet den Bereich um eine Fixation, innerhalb dessen visuelle Information aufgenommen werden kann. Um diese Fähigkeit

bei den Probanden zu ermitteln, wurden den Probanden in unterschiedlichen Abständen in der Peripherie für sehr kurze Zeit Buchstaben präsentiert, die erkannt werden sollten (Kapitel 7). Zusätzlich wurden sie aufgefordert, an die Stelle des erscheinenden Buchstabens eine Sakkade auszuführen, wobei sichergestellt wurde, dass zum Zeitpunkt der Zielerreichung kein Buchstabe mehr zu sehen war. Auch in dieser Aufgabe zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Gruppen, so dass die visuelle Spanne bei den Cannabiskonsumenten nicht beeinträchtigt zu sein scheint und damit auch nicht zur Erklärung der Leistungsverminderung bei der visuellen Suche herangezogen werden kann.

In einem letzten Experiment sollte geklärt werden, inwieweit die beobachteten Defizite in den Grundlagenexperimenten relevant sein können für alltägliche Aufgaben, in denen eine funktionierende Blicksteuerung unabdingbar ist. Als eine solche Aufgabe wurde das Lesen von Sätzen ausgewählt (Kapitel 8). In diese Sätze eingebettet wurden Zielreizwörter, die bezüglich ihrer Wortfrequenz und Wortlänge systematisch variierten. Außerdem sollten die Probanden während des Versuchs detaillierte Verständnisfragen beantworten, die einerseits ein sinnentnehmendes Lesen sicherstellten und andererseits als Maß für das Leseverständnis verwendet wurden. Es zeigte sich, dass das Leseverständnis in der THC-Gruppe signifikant verringert war. Außerdem benötigte die Gruppe mehr Zeit zum Lesen. Eine genauere Analyse ergab, dass die Cannabiskonsumenten häufiger Wörter erneut anblickten, die bereits gelesen wurden. Dies deutet zusammen mit den schlechteren Antwortscores abermals auf eine Beeinträchtigung des Arbeitsgedächtnisses hin. Darüber hinaus waren die mittleren Fixationsdauern global erhöht, was mit den Latenzunterschieden aus der Pro- und Antisakkadenaufgabe (Kapitel 3 und 4) im Einklang steht. Offensichtlich äußern sich also die grundlegenden Defizite auch in komplexen Aufgaben. Bezüglich der Zielreizwörter konnte festgestellt werden, dass generell alle zeitlichen Parameter signifikant erhöht waren, so dass in einigen Bedingungen ein Wort insgesamt über 50% länger gelesen wurde als in der Kontrollgruppe. Dieser Befund deutet auf generelle Schwierigkeiten in der Wort- und Satzverarbeitung hin. Interessanterweise fanden sich diese Ergebnisse auch bei kurzen, sehr häufigen Wörtern, so dass ein möglicherweise kleinerer Wortschatz in der THC-Gruppe nicht zur Erklärung der Ergebnisse herangezogen werden kann. Effekte auf räumliche Parameter wie die Fixationswahrscheinlichkeiten oder die initiale Landeposition auf den Zielreizwörtern konnten nicht nachgewiesen werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich in der untersuchten THC-Gruppe mit frühem age of onset Defizite bezüglich grundlegender Fertigkeiten bei der räumlichen und zeitlichen

Sakkadensteuerung gezeigt haben. Die Defizite der räumlichen Verarbeitung sind vermutlich einem gestörten räumlichen Arbeitsgedächtnis anzulasten, worauf auch die erhöhten Reinspektionen bei der visuellen Suche und die vergrößerte Anzahl von Regressionen beim Lesen hindeuten.

Die Unterschiede aus den Grundlagenparadigmen (Kapitel 3 bis 5) sind trotz ihrer statistischen Signifikanz insgesamt eher subtil. Sie sind vergleichbar mit den Resultaten einer Studie zu Kurzzeiteffekten von Cannabis auf die Blickbewegungssteuerung (Ploner et al., 2002), so dass angenommen werden kann, dass Kurzzeiteffekte sich bei frühem langjährigem Konsum auch dauerhaft manifestieren können. In der genannten Studie zu Kurzzeiteffekten wurden zwölf gelegentlich Cannabis konsumierende Probanden gebeten, einmalig THC einzunehmen. Verglichen wurden Blickbewegungsparameter vor bzw. zwei Stunden nach der Einnahme anhand von Pro- und Antisakkaden sowie gedächtnisgesteuerten Sakkaden. Die Autoren fanden in der Prosakkadenaufgabe ebenfalls erhöhte Latenzen und keine Veränderungen der Amplitude. Außerdem konnten bezüglich der gedächtnisgesteuerten Sakkaden keine Latenzveränderungen, dafür aber verlängerte Sakkaden im Vergleich zur Kontrollbedingung festgestellt werden. Dies entspricht somit genau dem in Kapitel 3 und 5 berichteten Ergebnismuster. Allerdings fanden sie zusätzlich höhere Raten fehlerhafter Sakkaden in der Antisakkadenaufgabe sowie bei den gedächtnisgesteuerten Sakkaden, was auf beeinträchtigte Inhibitionsprozesse hindeutet. Dieser Befund scheint daher spezifisch für Akutintoxikationen zu sein und sich nicht langfristig zu manifestieren.

Da die neurophysiologischen Grundlagen des okulomotorischen Systems relativ gut bekannt sind, lassen sich aufgrund der Verhaltensdefizite Rückschlüsse auf möglicherweise beeinträchtigte Hirnregionen ziehen. Daher sollen nun Implikationen der verhaltensbezogenen Befunde auf mögliche neurophysiologische Dysfunktionen diskutiert werden. Dies geschieht vor allem vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.1 dargelegten Verteilungen des endogenen CB-1 Rezeptorsystems sowie der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Erkenntnisse zur neuronalen Steuerung von Blickbewegungen.

Die *Latenzunterschiede* zwischen den Gruppen, die nur in der Pro- und Antisakkadenaufgabe, jedoch nicht bei den verzögerten Reaktionen der memory guided-Sakkadenaufgabe auftraten, sind vermutlich den überlappenden Regionen zuzuordnen, die an räumlichen Aufmerksamkeitsprozessen und Sakkadenprogrammierungsprozessen beteiligt sind. Dies sind typischerweise der *frontale und parietale assoziative Cortex sowie die Basalganglien* (Corbetta et al., 1998;

Gitelman, 1999; Perry & Zeki, 2000). Außerdem sind auch die frontalen Augenfelder (für willentliche Sakkaden) und der intraparietale Sulcus (für reflexive Sakkaden) an den genannten Funktionen beteiligt, doch würde man bei einer diesbezüglichen Läsion auch z.B. erhöhte Latenzen in der memory guided-Sakkadenaufgabe (Gaymard et al., 1999) oder beeinträchtigte Inhibitionsprozesse erwarten. Eine Läsion der parietalen Augenfelder führt zwar zu Verlängerungen sakkadischer Latenzen, aber nicht bei willentlich gesteuerten Sakkaden wie z.B. Antisakkaden (vgl. Leigh & Kennard, 2004). Für eine Beteiligung der assoziativen Cortices spricht zudem die hohe Dichte an CB-1 Rezeptoren in diesen Regionen (Glass et al., 1997). Zudem könnten auch noch Regionen des *posterioren Parietalcortex* beteiligt sein, da dort ebenfalls die zeitliche Taktung visuell geführter Sakkaden gesteuert wird. Die fehlenden Unterschiede bezüglich des Gap-Effekts sprechen für funktionierende Colliculi Superiores.

Die Verlängerungen der *Sakkadenamplitude* traten nur bei nicht visuell geführten Sakkaden auf, so dass der späte für alle Sakkaden gemeinsame motorische Pfad vom Mittelhirn über Pons und Cerebellum intakt zu sein scheint, auch wenn die CB-1-Rezeptoren im Cerebellum sehr häufig sind. Möglicherweise betrifft dies jedoch cerebelläre Regionen, die nicht direkt an der Blicksteuerung beteiligt sind. Zudem wäre dabei auch eine Beeinträchtigung der main sequence zu erwarten gewesen. Wahrscheinlich ist somit eher eine Beeinträchtigung der *Basalganglien*, insbesondere der *Substantia Nigra pars reticulata* (SNpr), da gezeigt werden konnte, dass eine Läsion zu verlängerten Sakkaden führen kann (Rivaud-Pechoux et al., 2000) und dort andererseits eine besonders hohe CB-1-Rezeptorverteilung vorherrscht (s.o.). Da zur Programmierung der Sakkadenamplitude in der Antisakkadenaufgabe ebenso wie bei den memory guided-Sakkaden zumindest kurzfristig Arbeitsgedächtnisfunktionen beteiligt sein müssen (vgl. Kapitel 4 für dieses Argument), ist außerdem eine Problematik bezüglich des *dorsolateralen Präfrontalcortex* (DLPFC) wahrscheinlich. In dieser für räumliche Arbeitsgedächtnisprozesse verantwortlichen Region ist zudem die höchste Dichte an CB-1-Rezeptoren im gesamten Neocortex anzutreffen (Glass et al., 1997). Strukturen im medialen dorsalen Thalamus sowie die supplementärmotorischen Areale, die bei der Reprogrammierung von Sakkaden wichtig sind, scheinen aufgrund der problemlosen Ausführung der double step-Sakkaden intakt.

Bislang ist die Literatur uneindeutig, inwieweit die frontalen Augenfelder (FEF) zusammen mit den Basalganglien und dem DLPFC an Inhibitionsprozessen z.B. bei der Antisakkadenaufgabe beteiligt sind (vgl. Kapitel 3.1.2). Ploner et al. (2002) bringen in ihrer Kurzzeiteffektstudie die auch hier genannten Probleme bezüglich der SNpr sowie des DLPFC in Zusammenhang mit den in ihrer Studie zusätzlich gefundenen Defizite bei Inhibitionsleistungen, da beide Regionen

inhibierend auf die Colliculi Superiores einwirken. Da in der vorliegenden Langzeiteffektstudie keine Hinweise auf Störungen von Inhibitionsprozessen gefunden werden konnten, spricht dies eher für die Beteiligung der FEF an Inhibitions- und des DLPFC an Gedächtnisprozessen.

In der *visuellen Suche* können Defizite ebenfalls auf Störungen des *Parietalcortex* oder der *Basalganglien* zurückgeführt werden, da beide Regionen für ein effizientes, automatisiertes Suchen und zur Aufrechterhaltung des räumlichen Gedächtnisses für bereits abgesuchte Regionen verantwortlich sind (vgl. Kapitel 3.1.2). Alle hier genannten neurophysiologischen Hypothesen müssten allerdings zu ihrer Bestätigung direkt, z.B. mittels bildgebender Verfahren, in zukünftigen Experimenten getestet werden.

Die Ergebnisse zur visuellen Suche deuten bereits darauf hin, dass neben eher grundlegenden Defiziten der Blicksteuerung auch komplexere Informationsverarbeitungsprozesse betroffen zu sein scheinen. Dies belegen auch die beträchtlichen Beeinträchtigungen beim Lesen von Text. Es kann spekuliert werden, dass diese Einschränkungen möglicherweise eine Reaktion auf die basalen Probleme darstellen, etwa im Sinne einer Kompensationsbemühung. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die durch frühen intensiven Gebrauch von Cannabis nachweisbaren Langzeitdefizite hohe alltägliche Relevanz haben, weshalb insgesamt dringend zu empfehlen ist, zumindest Jugendliche im Alter von bis zu 16 Jahren von einem übermäßigen Konsum fernzuhalten. Es ist wahrscheinlich, dass in dieser Phase das Gehirn noch Reifungsprozessen unterliegt, die durch eine Zuführung exogener Cannabinoide dauerhaft gestört werden können. In die Richtung einer noch nicht vollständig abgeschlossenen Entwicklung des okulomotorischen Systems in diesem Alter deuten die Ergebnisse einer Querschnittsuntersuchung von Klein (1999) anhand ähnlicher Paradigmen, wie sie auch in dieser Untersuchungsreihe Verwendung fanden. Inwieweit auch bei einem späteren Einstiegsalter die hier berichteten Beeinträchtigungen entstehen können, bleibt eine offene Forschungsfrage.

Abschließend soll skizziert werden, in welchem Rahmen eine Fortführung der hier beschriebenen Studien dringlich erscheint. Die hier verwendete Untersuchungsmethode, also das Registrieren von Blickbewegungsparametern, stützt sich auf Verhaltensparameter. Unter Hinzuziehung der Literatur zu neurophysiologischen Grundlagen der Blickbewegungssteuerung (vgl. Kapitel 3.1.2) sowie der Distribution von Cannabinoidrezeptoren (vgl. Kapitel 1.1) konnte gemutmaßt werden, welche Gehirnareale für die berichteten Defizite verantwortlich sein könnten. Es wäre daher wünschenswert, mittels funktioneller bildgebender Verfahren anhand ausgewählter Probanden diese Hypothesen direkt zu prüfen. Hierzu steht inzwischen eine Technologie zur Verfügung, die

das Registrieren von Blickbewegungen im Kernspintomographen ermöglicht (vgl. Kapitel 3.1.2). Eine weitere lohnenswerte Vertiefung betrifft die Ergebnisse zum Leseexperiment. Zunächst wäre es wünschenswert, Akuteffekte von Cannabis auf das Leseverhalten zu studieren. Darüber hinaus könnte eine weitere Untersuchung einerseits anstelle von einzelnen Sätzen das Lesen von mehrzeiligen Textabschnitten beinhalten, da einige Probanden berichteten, dass ihnen das Ausführen von Zeilensprüngen besonders schwer fällt (vgl. Kapitel 8.4). Außerdem könnte dabei eine aufwändigere Begleitdiagnostik zur verbalen Intelligenz sowie speziell zum Wortschatz der Probanden ergänzend herangezogen werden. Weiterhin würde sich zur genaueren Analyse der Defizite im visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis ein komplexeres Design der gedächtnisgesteuerten Sakkadenaufgabe (vgl. Kapitel 5) anbieten, in der die Dauer des Behaltensintervalls systematisch variiert wird. Dieses Vorgehen würde erlauben, die Dynamik der Gedächtnisprozesse und der diesbezüglichen Störungen abzubilden. Zuletzt könnte versucht werden, die Ergebnisse zur visuellen Suche in alltagsnäheren und somit komplexeren Suchaufgaben zu studieren. Damit könnte abgeschätzt werden, inwieweit die diesbezüglichen Einschränkungen als für das tägliche Leben relevant einzuschätzen sind. Bei allen beschriebenen Ansätzen sollte das Versuchsdesign dabei um THC-Probanden ergänzt werden, die später als die hier untersuchten Personen begonnen haben, regelmäßig Cannabis zu konsumieren. Dadurch könnte die Rolle des *age of onset* bezüglich der Blicksteuerung und visuellen Informationsverarbeitung direkt untersucht werden, worauf hier aufgrund der restriktiven Auswahlkriterien für Probanden (vgl. Kapitel 2.2.1) verzichtet werden musste.

10. Literatur

- Abed, F. (1991). The influence of dimensionality on eye fixations. *Perception*, 20, 449-454.
- Adams, A.J., Brown, B., Haegerstrom-Portnoy, G., Flom, M.C. & Jones, R.T. (1978). Marijuana, alcohol, and combined drug effects on the time course of glare recovery. *Psychopharmacology*, 56, 81-86.
- Adams, A.J., Brown, B., Flom, M.C., Jones, R.T. & Jampolsky, A. (1975). Alcohol and marijuana effects on static visual acuity. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 52, 729-735.
- Abrams, R. A., Meyer, D. E. & Kornblum, S. (1989). Speed and accuracy of saccadic eye movements: Characteristics of impulse variability in the oculomotor system. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 529-543.
- Anderson, T.J., Jenkins, I.H., Brooks, D.J., Hawken, M.B., Frackowiak, R.S. & Kennard, C. (1994). Cortical control of saccades and fixation in man. A PET study. *Brain*, 117, 1073-1084.
- Andrews, T.J., & Coppola, D.M. (1999). Idiosyncratic characteristics of saccadic eye movements when viewing different visual environments. *Vision Research*, 39, 2947-2953.
- Ashton, C.H. (2001). Pharmacology and effects of cannabis: a brief review. *The British Journal of Psychiatry*, 178: 101-106.
- Baddeley A. (1983). Working memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 302, 311-324
- Baddeley, A.D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Ball, K.K., Beard, B.L., Roenker, D.L., Miller, R.L. & Griggs D. S. (1988). Age and visual search: expanding the useful field of view. *Journal of the Optical Society of America A*, 5(12), 2210-2219.
- Baloh R.W., Sharma S., Moskowitz H., Griffith, R. (1979). Effects of alcohol and marijuana on eye movements. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 50,18-23.
- Balota, D. A., Pollatsek, A. & Rayner, K. (1985). The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology*, 17, 364-390.
- Bahill, A. T., Clark, M., and Stark, L. (1975). The Main Sequence, a tool for studying human eye movements, *Mathematical Biosciences*, 24, 191-204
- Barash, S., Bracewell, R.M., Fogassi, L., Gnadt, J.W. & Andersen, R.A. (1991). Saccade-related activity in the lateral intraparietal area. I. Temporal properties; comparison with area 7a. *Journal of Neurophysiology*, 66(3), 1095-1108.
- Barash, S., Bracewell, R.M., Fogassi, L., Gnadt, J.W. & Andersen, R.A. (1991). Saccade-related activity in the lateral intraparietal area. II. Spatial properties. *Journal of Neurophysiology*, 66(3), 1109-24.

- Becker, W. (1989). The neurobiology of saccadic eye movements. *Metrics. Reviews of Oculomotor Research*, 3, 13-67.
- Becker, W. & Jürgens, R. (1979). An analysis of the saccadic system by means of double step stimuli. *Vision Research*, 19, 967-983.
- Bell, A.H., Everling, S. & Munoz, D.P. (2000). Influence of stimulus eccentricity and direction on characteristics of pro- and antisaccades in non-human primates. *Journal of Neurophysiology*, 84, 2595-2604.
- Berghaus, G. & Krüger, H.P. (1998). *Cannabis im Straßenverkehr*. Stuttgart: Fischer.
- Bhidayasiri, R., Somers, J.T., Kim, J-I., Ramat, S., Nayak, S. & Bokil, H.S. (2001). Ocular oscillations induced by shifts of the direction and depth of visual fixation. *Annals of Neurology*, 49, 24-28.
- Blanchard, H. E. (1985). A comparison of some processing measures based on eye movements. *Acta Psychologica*, 58, 1-15.
- Block, R.I., Farnham, S., Braverman, K., Noyes, R. Jr., & Ghoneim, M.M. (1990). Long-term marijuana use and subsequent effects on learning and cognitive functions related to school achievement: preliminary study. *NIDA Research Monograph Series*, 101, 96-111.
- Block, R.I. & Ghoneim, M.M. (1993). Effects of chronic marijuana use on human cognition. *Psychopharmacology*, 110, 219-228.
- Bloomfield, J.R. (1975). Theoretical approaches to visual search. In Drury, C.G. & Fox, J.G. (eds.), *Human Reliability in Quality Control*. 19-29. London: Taylor & Francis.
- Brandt, S.A., Ploner, C.J., Meyer, B.U., Leistner, S. & Villringer, A. (1998). Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation over dorsolateral prefrontal and posterior parietal cortex on memory-guided saccades. *Experimental Brain Research*, 188, 197-204.
- Braff, D.L., Silverton, L., Saccuzzo, D.P. & Janowsky, D.S. (1981). Impaired speed of visual information processing in marijuana intoxication. *American Journal of Psychiatry*, 138, 613-617.
- Braun, D., Weber, H., Mergner, T. & Schulte-Monting, J. (1992). Saccadic reaction times in patients with frontal and parietal lesions. *Brain*, 115, 1359-1386.
- Bronstein, A.M. & Kennard C. (1987). Predictive eye saccades are different from visually triggered saccades. *Vision Research*, 27, 517-520.
- Brown, E.L., Hecht, H. & Young, L.R. (2003). Sensorimotor aspects of high-speed artificial gravity: I. Sensory conflict in vestibular adaptation. *Journal of Vestibular Research*, 12, 271-282.
- Brown, G. D. A. & Watson, F. L. (1987). First in, first out: Word learning age and spoken word frequency as predictors of word familiarity and word naming latency. *Memory & Cognition*, 15, 208-216.
- Brown, B., Adams, A.J., Haegerstrom-Portnoy, G., Jones, R.T. & Flom, M.C. (1977). Pupil size after use of marijuana and alcohol. *American Journal of Ophthalmology*, 83, 350-354.

- Brysbart, M. & Vitu, F. (1998). Word skipping: Implications for theories of eye movement control in reading. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*, 125-148. Oxford, England: Elsevier.
- Brysbart, M., Vitu, F. and Schroyens, W. (1996). The right visual field advantage and the optimal viewing position effect: On the relation between foveal and parafoveal word recognition. *Neuropsychology*, 10, 385-395.
- Burman, D.D. & Bruce, C.J. (1997). Suppression of task-related saccades by electrical stimulation in the primate's frontal eye field. *Journal of Neurophysiology*, 77(5), 2252-67.
- Buswell, G.T. (1935). *How people look at pictures: A study of psychology of perception in art*. Chicago: University of Chicago Press.
- CELEX German Database (1995). Release D25. Computer software. Nijmegen: Centre for Lexical Information.
- Chait, L.D., Pierri, J. (1992). Effects of smoked marijuana on human performance: A critical review. In L. Murphy and A. Bartke (Eds.), *Marijuana/Cannabinoids: Neurobiology and Neurophysiology*, 387-424. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Cheser G. (1995). Cannabis and road safety: an outline of research studies to examine the effects of cannabis on driving skills and actual driving performance. In Road Safety Committee, Parliament of Victoria. *The effects of drugs (other than alcohol) on road safety*. Melbourne: Road Safety Committee, Parliament of Victoria, 67-96.
- Chung, S.T., Legge, G.E. & Cheung, S.H. (2004). Letter-recognition and reading speed in peripheral vision benefit from perceptual learning. *Vision Research*, 44, 695-709.
- Ciuffreda, K.J. & Tannen, B. (1995). *Eye movement basics for the clinician*. USA: Mosby.
- Cornelissen, F.W., Kimmig, H., Schira, M., Rutschmann, R.M., Maguire, R.P. & Broerse, A. (2002). Event-related fMRI responses in the human frontal eye fields in a randomized pro- and antisaccade task. *Experimental Brain Research*, 145, 270-274.
- Craig, G.L., Stelmach, L.B. & Tam, W.J. (1999). Control of reflexive and voluntary saccades in the gap effect. *Perception and Psychophysics*, 61 (5), 935-942.
- Crundall, D., Underwood, G. & Chapman, P. (1999). Driving expertise and the functional field of view. *Perception*, 28, 1075-1087.
- Demir, K. (2003). *Lautes und leises Lesen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit; Institut für Psychologie, RWTH Aachen.
- Derkinderen, P., Toutant, M., Burgaya, F., Le Bert, M., Siciliano, J.C., de Franciscis, V., Gelman, M., Girault, J.-A. (1996). Regulation of a Neuronal Form of Focal Adhesion Kinase by Anandamide. *Science*, 273, 1719-1722.
- DeSouza, J.F., Menon, R.S. & Everling, S. (2003). Preparatory set associated with prosaccades and anti-saccades in humans investigated with event-related FMRI. *Journal of Neurophysiology*, 89, 1016-1023.

- Deubel, H., O'Regan, K., & Radach, R. (2000). Attention, information processing and eye movement control. In A. Kennedy, R. Radach, D. Heller & J. Pynte (Eds). *Reading as a Perceptual Process*, 355-376. Elsevier: Oxford.
- Devane, W.A., Dysarc, F.A., Johnson, M.R., Melvin, L.S. & Howlett, A.C. (1988). Determination and characterization of a cannabinoid receptor in rat brain. *Molecular Pharmacology*, *34*, 605-613.
- Devane, W.A., Hanus, L., Breuer, A., Pertwee, R.G., Stevenson, L.A., Griffin, G., Gibson, D., Mandelbaum, A., Etinger, A. and Mechoulam, R. (1992). Isolation and Structure of a Brain Constituent that Binds to the Cannabinoid Receptor. *Science*, *258*, 1946-1949.
- Ditchburn, R. W. (1973). *Eye movements and visual perception*. Oxford: Oxford University Press.
- Doricchi, F., Perani, D., Incoccia, C., Grassi, F., Cappa, S.F., Bettinardi, V., Galati, G., Pizzamiglio, L. & Fazio, F. (1997). Neural control of fast-regular saccades and antisaccades: an investigation using positron emission tomography. *Experimental Brain Research*, *116* (1), 50-62.
- Dorris, M. C. & Munoz, D. P. (1995). A neuronal correlate for the gap effect on saccadic reaction times in the monkey. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 2558-2562.
- Duncan, J. & Humphreys, G.W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, *96*, 433-458.
- Ehrenreich, H., Rinn, T., Kunert, H.J., Moeller, M.R., Poser, W., Schilling, L., Gigerenzer, G. & Hoehle, M.R. (1999). Specific attentional dysfunction in adults following early start of cannabis use. *Psychopharmacology*, *142* (3): 295-301.
- Ehrlich, S. F. & Rayner, K. (1981). Contextual effects on word perception and eye movements during reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *20*, 641-655.
- Engbert, R., & Kliegl, R. (2003a). Microsaccades uncover the orientation of covert attention. *Vision Research*, *43*, 1035-1045
- Engbert, R., & Kliegl, R. (2003b). The game of word skipping: Who are the competitors? *Behavioral and Brain Sciences*, *26*, 481-482.
- Everling, S., Dorris, M. C. & Munoz, D. P. (1998). Reflex suppression in the anti-saccade task is dependent on prestimulus neural processes. *Journal of Neurophysiology*, *80*, 1584-1589.
- Everling, S., Dorris, M. C., Klein, R. M. & Munoz, D. P. (1999). Role of primate superior colliculus in preparation and execution of anti- and pro-saccades. *Journal of Neuroscience*, *19*, 2740-2754.
- Everling, S. & Fischer, B. (1998). The antisaccade: a review of basic research and clinical studies. *Neuropsychologia*, *36* (9), 885-899.
- Everling, S., Munoz, D.P. (2000). Neuronal correlates for preparatory set associated with pro-saccades and anti-saccades in the primate frontal eye field. *Journal of Neuroscience*, *20*(1), 387-400.

- Fant, R.V., Heishman, S.J., Bunker, E.B. & Pickworth, W.B. (1998). Acute and residual effects of marijuana in humans. *Pharmacology, Biochemistry, and Behavior*, 60(4), 777-84.
- Felblinger, J., Muri, R.M., Ozdoba, C., Schroth, G., Hess, C.W. & Boesch, C. (1996). Recordings of eye movements for stimulus control during fMRI by means of electro-oculographic methods. *Magnetic resonance in medicine*, 36(3), 410-4.
- Findlay, J.M. & Gilchrist, I.D. (1998). Spatial scale and saccade programming. *Perception*, 26(9), 1159-1167.
- Findlay, J.M., & Gilchrist, I.D. (2003). *Active Vision: The Psychology of Looking and Seeing*, Oxford: Oxford University Press
- Findlay, J.M. & Harris, L.R. (1984). Small saccades to double step targets moving in two dimensions. In Gale, A.G., Johnson, F. (Eds), *Theoretical and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Amsterdam, Elsevier, 71-78.
- Findlay, J.M., Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, 22 (4), 661-674.
- Fischer, M.H. (1999). An investigation of attention allocation during sequential eye movement tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 52, 649-677.
- Fischer, B. & Boch, R. (1983). Saccadic eye movements after extremely short reaction times in the monkey. *Brain Research*, 260, 21-26.
- Fischer, B. & Ramsperger, E. (1984). Human express saccades: extremely short reaction times of goal directed eye movements. *Experimental Brain Research*, 57, 191-195.
- Fischer, B. & Weber, H. (1993). Express saccades and visual attention. *Behavioural & Brain Sciences*, 16, 553-610.
- Fischer, B. & Weber, H. (1997). Effects of stimulus conditions on the performance of antisaccades in man. *Experimental Brain Research*, 116, 191-200.
- Fletcher, W.A., Sharpe, J.A. (1986). Saccadic eye movement dysfunction in Alzheimer's disease. *Annals of Neurology*, 20, 464-471.
- Fletcher, J.M., Page, J.B., Francis, D.J., Copeland, K., Naus, M.J., Davis, C.M., Morris, R., Krauskopf, D. & Satz, P. (1996). Cognitive correlates of long-term cannabis use in Costa Rican men. *Archives of General Psychiatry*, 53, 1051-1057.
- Flom, M.C., Brown, B., Adams, A.J. & Jones, R.T. (1976). Alcohol and marijuana effects on ocular tracking. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 53, 764-73.
- Flom, M.C., Adams, A.J. & Jones, R.T. (1975). Marijuana smoking and reduced pressure in human eyes: drug action or epiphenomenon? *Investigative Ophthalmology*, 14, 52-5.
- Forbes, A.K. & Klein, R.M. (1996). The magnitude of the fixation offset effect with endogenously and exogenously controlled saccades. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 344-352.

- Ford, A., White, C.T. & Lichtenstein, M. (1959). Analysis of eye movements during free search. *Journal of the Optical Society of America*, 49, 287-292.
- Frazier, L. & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology*, 14, 178-210.
- Fukushima, J., Fukushima, K., Chiba, T., Tanaka, S., Yamashita, I. & Kato, M. (1988). Disturbances of voluntary control of saccadic eye movements in schizophrenic patients. *Biological Psychiatry*, 23, 670-677.
- Funahashi, S., Bruce, C. J., and Goldman-Rakic, P. S. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 61, 331--349.
- Funahashi, S., Bruce, C.J. & Goldman-Rakic, P.S. (1991). Neuronal activity related to saccadic eye movements in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 65, 1464-1483.
- Fuster, J.M. (1991). The prefrontal cortex and its relation to behavior. *Progress in Brain Research*, 87, 201-11.
- Gaymard, B., Rivaud, S. & Pierrot-Deseilligny, C. (1993). Role of the left and right supplementary motor areas in memory-guided saccade sequences. *Annual Neurology*, 34, 404-406.
- Gaymard, B., Rivaud, S. & Pierrot-Deseilligny, C. (1994). Impairment of extraretinal eye position signals after central thalamic lesions in humans. *Experimental Brain Research*, 102, 1-9.
- Gaymard B., Ploner, C.J., Rivaud S., Vermersch, A.I. & Pierrot-Deseilligny, C. (1998). Cortical control of saccades. *Experimental Brain Research*, 123, 159-163.
- Gaymard B., Ploner, C.J., Rivaud-Pechoux, S. & Pierrot-Deseilligny, C. (1999). The frontal eye field is involved in spatial short-term memory but not in reflexive saccade inhibition. *Experimental Brain Research*, 129, 288-301.
- Gaymard, B., Lynch, J., Ploner, C.J., Condy, C. & Rivaud-Pechoux, S. (2003). The parietocollicular pathway: anatomical location and contribution to saccade generation. *European Journal of Neuroscience*, 17, 1518-1526.
- Geiger, G. & Lettvin, J.Y. (1987). Peripheral vision in persons with dyslexia. *New England Journal of Medicine*, 316, 1238-1243.
- Gernsbacher, M. A. (1984). Resolving 20 Years of inconsistent interactions between lexical familiarity and orthography, concreteness, and polysemy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113 (2), 256-281.
- Gilchrist, I.D., Csete, A.A.E. & Harvey, M. (1999). Evidence for strategic scanning in serial visual search. *Abstract at the 10th European Conference on Eye Movements*.
- Gilchrist, I.D. & Harvey, M. (2000). Refixation frequency and memory mechanisms in visual search. *Current Biology*, 10, 1209-1212.
- Gitelman, D.R., Parrish, T.B., Friston, K.J. & Mesulam, M.M. (2002). Functional anatomy of

- visual search; regional segregations within the frontal eye fields and effective connectivity of the superior colliculus. *Neuroimage*, 15, 970-982.
- Gonzalez, R., Carey, C. & Grant, I. (2002). Nonacute (Residual) Neuropsychological Effects of Cannabis Use: A Qualitative Analysis and Systematic Review. *Journal of Clinical Pharmacology*, 42, 48-57.
- Glass, M., Dragunow, M. & Faull, R.L.M. (1997). Cannabinoid receptors in the human brain: a detailed anatomical and quantitative autoradiographic study in fetal neonatal and adult human brain. *Neuroscience*, 27, 299-318.
- Gordon, I.E. (1969). Eye movements during search through printed lists. *Perceptual and Motor Skills*, 29, 683-686.
- Greenlee, M.W., Berg, H., Stuhr, V. & Mergner, T. (2000). Visual search and visual working memory in patients with chronic focal cortical lesions. *Vision Research*, 40, 3759-3773.
- Gresse, C. (2004). *Parafoveale Vorverarbeitung beim Lesen: Eine individuelle Quantifizierung und Analyse*. Unveröffentlichte Diplomarbeit; Institut für Psychologie, RWTH Aachen.
- Groner, R., Walder, F. & Groner, M. (1984). Looking at faces: Local and global aspects of scanpaths. In Gale, A.G. & Johnson, F. (Eds.), *Theoretical and applied aspects of eye movement research*. 523-533. Amsterdam: Elsevier.
- Groner, R. & Menz, C. (1985). The effect of stimulus characteristics, task requirements and individual differences on scanning patterns. In Groner, R., McConkie, G.W. & Menz, C. (eds.), *Eye movements and human information processing*. 239-250. Amsterdam: Elsevier.
- Guietton, D., Bachtel, H.A. & Douglas, R.M. (1985). Frontal lobe lesions in man cause difficulties in suppressing reflexive glances and in generating goal-directed saccades. *Experimental Brain Research*, 58, 455-472.
- Hall, W. & Solowij, N. (1998). Adverse effects of cannabis. *The Lancet*, 352, 1611-1616.
- Hallett, P.E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Research*, 18, 1279-1296.
- Hallett, P.E. & Adams, B.D. (1980). The predictability of saccadic latency in a novel voluntary oculomotor task. *Vision Research*, 20, 329-339.
- Hanes, D. P. & Schall, J. D. (1996). Neural control of voluntary movement initiation. *Science*, 274, 427-430.
- Harley, T. A. (1995). *The Psychology of language: From data to theory*. Sussex: Erlbaum.
- Hauptfleisch, F. M. (2004). *Fixationspositionen beim Lesen. Eine individuelle Analyse*. Unveröffentlichte Diplomarbeit; Institut für Psychologie, RWTH Aachen.
- Heide, W. & Kömpf, D. (1998). Combined deficits of saccades and visuo-spatial orientation after cortical lesions. *Experimental Brain Research*, 123, 164-171.

- Heide, W., Binkofski, F., Seitz, R.J., Posse, S., Nitschke, M.F., Freund, H.J. & Kompf D. (2001). Activation of frontoparietal cortices during memorized triple-step sequences of saccadic eye movements: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, *13*, 1177-1189.
- Heller, D. (1982). Eye movements in reading. In: Groner, R. & Fraisse, P. (eds.) *Cognition and Eye Movements*. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 139-154.
- Heller, D. & Lücke, S. (1987). Time related effects of alcohol on saccade velocity. In Lüer, G. & Lass, U. (eds.). *Proceedings of the the 4th ECEM*, 160-163. Göttingen: Hogrefe.
- Heller, D. & Müller, H. (1984). On the relationship between saccade size and fixation duration in reading. In R. Groner et al. (Eds.), *Eye movements and psychological functions: International views*. 287-302. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Henderson J. M. & Ferreira, F. (1990). Effects of foveal processing difficulty on the perceptual span in reading: Implications for attention and eye movement control. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*, 417-429.
- Henderson, J. M. & Ferreira, F. (1993). Eye movement control during reading: Fixation measures reflect foveal but not parafoveal processing difficulty. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *47*, 201-221.
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control in real-world scene perception. *Trends in Cognitive Science*, *7*, 498-504.
- Henik, A., Rafal, R. & Rhodes, D. (1994). Endogenously generated and visually guided saccades after lesions of the human frontal eye fields. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *6*, 400-411.
- Herkenham, M. (1991). Characterization and localization of cannabinoid receptors in brain: an in vitro technique using slide-mounted tissue sections. *NIDA Research Monograph*, *112*, 129-45.
- Herkenham, M. (1992). Cannabinoid receptor localization in brain: relationship to motor and reward systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *654*, 19-32.
- Herkenham, M., Lynn, A.B., Little, M.D., Johnson, M.R., Melvin, L.S., de Costa, B.R. & Rice, K.C. (1990). Cannabinoid receptor localization in the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *87*, 1932-1936.
- Herkenham, M., Lynn, A.B., de Costa, B.R. & Richfield, E.K. (1991a). Neuronal localization of cannabinoid receptors in the basal ganglia of the rat. *Brain Research*, *547*, 267-274.
- Herkenham, M., Lynn, A.B., Johnson, M.R., Melvin, L.S., de Costa, B.R. & Rice, K.C. (1991b). Characterization and localization of cannabinoid receptors in rat brain: A quantitative *in vitro* autoradiographic study. *Journal of Neuroscience*, *11*, 563-583.
- Herkenham, M. (1995). Localization of cannabinoid receptors in brain and periphery. In: R.G. Pertwee (Ed.), *Cannabinoid Receptors*. 145-166. New York: Academic Press.
- Hikosaka, O. & Wurtz, R.H. (1983). Visual and oculomotor functions of monkey substantia nigra pars reticulata: III. Memory-contingent visual and saccade responses. *Journal of Neurophysiology*, *49*, 1268-1284.

- Holdstock, L. & deWit, H. (1999). Ethanol impairs saccadic and smooth pursuit eye movements without producing self-reports of sedation. *Alcoholism, clinical and experimental research*, 23(4), 664-72.
- Hodgson, T.L., Mort, D., Chamberlain, M.M., Hutton, S.B., O'Neill, K.S. & Kennard C. (2002). Orbitofrontal cortex mediates inhibition of return. *Neuropsychologia*, 40, 1891-1901.
- Hooge, I.T. & Erkelens, C.J. (1996). Control of fixation duration in a simple search task. *Perception & Psychophysics*, 58(7), 969-76.
- Hooge, I.T. & Erkelens, C.J. (1998). Adjustment of fixation duration in visual search. *Vision Research*, 38(9), 1295-302.
- Hooge, I.T. & Erkelens, C.J. (1999). Peripheral vision and oculomotor control during visual search. *Vision Research*, 39(8), 1567-75.
- Hooge, I.T. & Frens, M.A. (2000). Inhibition of saccade return (ISR): spatio-temporal properties of saccade programming. *Vision Research*, 40(24), 3415-26.
- Horn W. *Leistungsprüfsystem L-P-S*, 2nd ed. Göttingen: Hogreve, 1983.
- Horowitz, T.S. & Wolfe, J.M. (1998). Visual search has no memory. *Nature*, 394, 575-577.
- Huestegge, L. (2000). *Zum Einfluss von Leseaufgabe und Lesematerial auf Blickbewegungsparameter beim Lesen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, RWTH Aachen.
- Husain, M., Parton, A., Hodgson, T.L., Mort, D. & Rees, G. (2003). Self-control during response conflict by human supplementary eye field. *Nature Neuroscience*, 6, 117-118.
- Husain, M., Mannan, S., Hodgson, T., Wojciulik, E., Driver, J. & Kennard, C. (2001). Impaired spatial working memory across saccades contributes to abnormal search in parietal neglect. *Brain*, 124 (5), 941-952.
- Hyönä, J., Niemi, P. & Underwood, G. (1989). Reading long words embedded in sentences: Informativeness of word halves affects eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 142-152.
- Hyönä, J. (1995). Do irregular letter combinations attract readers' eye movements? Evidence from fixation location in words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 68-81.
- Hyönä, J, Radach, R & Deubel, H (eds.). *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movements*. Amsterdam: Elsevier Science, 2002.
- Inhoff, A. W. (1984). Two stages of word processing during eye fixations in reading of prose. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23, 612-624.
- Inhoff, A. W. (1989a). Lexical access during eye fixations in reading: Are word access codes used to integrate lexical information across interword fixations? *Journal of Memory and Language*, 28, 444-461.
- Inhoff, A. W., Briihl, D. & Schwartz, J. (1996). Compound word effects differ in reading, online naming and delayed naming tasks. *Memory & Cognition*, 24, 466-476.

- Inhoff, A. W. & Radach, R. (1998). Definition and computation of oculomotor measures in the study of cognitive processes. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*, 29-54. Oxford, England: Elsevier.
- Inhoff, A. W. & Rayner, K. (1986). Parafoveal word processing during eye fixations in reading: Effects of word frequency. *Perception & Psychophysics*, 40, 431-439.
- Inhoff, A. W. & Topolski, R. (1994). Use of phonological codes during eye fixations in reading and in on-line delayed naming tasks. *Journal of Memory and Language*, 33, 689-713.
- Inhoff, A.W. & Weger, U. (in press). Memory for word location during reading: Eye movements to previously read words are spatially selective but not precise. *Memory & Cognition*.
- Jacobs, A. M. (1986). Eye movement control in visual search: how direct is visual span control? *Perception & Psychophysics*, 39, 47-58.
- Jeier, T. (1977). *Die Eskimos: Geschichte und Schicksal der Jäger im hohen Norden*. Düsseldorf: Econ Verlag.
- Johnson, M.R. & Melvin, L.S. (1986). The discovery of non-classical cannabinoid analgesics. In Mechoulam, R. (Ed.), *Cannabinoids as Therapeutic Agents*. 121-145. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc.
- Joy, J.E., Watson, S.R. & Benson, J.A. (1999). *Marijuana and Medicine. Assessing the Science Base*. Washington: National Academy Press.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological review*, 87, 329-354.
- Kapoula, Z. & Robinson, D. A. (1986). Saccadic undershoot is not inevitable: Saccades can be accurate. *Vision Research* 26, 735-743.
- Kapoula, Z., Isotalo, E., Muri, R.M., Bucci, M.P. & Rivaud-Pechoux, S. (2001). Effects of transcranial magnetic stimulation of the posterior parietal cortex on saccades and vergence. *Neuroreport*, 12, 4041-4046.
- Kennedy, A. (1983). On looking into space. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements and visual cognition: Scene perception and reading*. 379-396. New York: Springer-Verlag.
- Kennedy, A. & Murray, W. S. (1987). Spatial Coordinates and reading: Comments on Monk (1985). *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 39A, 649-656.
- Kennedy, A., Radach, R., Heller, D. and Pynte, J (Eds.). (2000). *Reading as a Perceptual Process*, Oxford: Elsevier.
- Kerr, P. W. (1992). *Eye movement control during reading: The selection of where to send the eyes*. Unpublished doctoral dissertation. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kimmig, H., Greenlee, M.W., Huethe, F. & Mergner, T. (1999). MR-eyetracker: a new method for eye movement recording in functional magnetic resonance imaging. *Experimental Brain Research*, 126(3), 443-9.

- Kimmig, H., Greenlee, M.W., Gondan, M., Schira, M., Kassubek, J. & Mergner, T. (2001). Relationship between saccadic eye movements and cortical activity as measured by fMRI: quantitative and qualitative aspects. *Experimental Brain Research*, 141(2), 184-94.
- Klein, R., Berry, G., Briand, K., D'Entremont, B. & Farmer, M. (1990). Letter identification declines with increasing retinal eccentricity at the same rate for normal and dyslexic readers. *Perception & Psychophysics*, 47, 601-606.
- Klein, R.M. (2000). Inhibition of return. *Trends in Cognitive Science*, 4, 138-147.
- Kliegl, R., Olsen, R. K. & Davidson, B. J. (1982). Regression analyses as a tool for studying reading processes: Comments on Just & Carpenter's eye fixation theory. *Memory & Cognition*, 10, 287-296.
- Kluwe, R.H. (1997). Intentionale Steuerung kognitiver Prozesse. *Kognitionswissenschaft*, 6, 53-69.
- Kobayashi, S., Lauwereyns, J., Koizumi, M., Sakagami, M. & Hikosaka, O. (2002). Influence of reward expectation on visuospatial processing in macaque lateral prefrontal cortex.. *Journal of Neurophysiology*, 87, 1488-1498.
- Krebs, M.J. (1975). Scanning patterns in real-time FLIR displays. *Proceedings of the Human Factors Society, 19th Annual Meeting*, 418-422.
- Kresser, R. (1996). *Gibt es „Expressfixationen“ beim Lesen?* Unveröffentlichte Diplomarbeit, RWTH Aachen
- Lebedev, S., Van Gelder P. & Tsui W.H. (1996). Square-root relation between main saccadic parameters. *Investigative Ophthalmology & Vision Science*, 37, 2750-2758.
- Legge, G.E., Mansfield, J.S. & Chung, S.T.L. (2001). Psychophysics of reading. XX: linking letter recognition to reading speed in central and peripheral vision. *Vision Research*, 41, 725-743
- Leigh, R.J. & Kennard, C. (2004). Using saccades as a research tool in the clinical Neurosciences. *Brain*, 127, 460-477.
- Leigh, R.J. & Zee, D.S. (1999) (Eds). *The neurology of eye movements*. 3rd Ed. New York: Oxford University Press.
- Leirer, V.O., Yesavage, J.A. & Morrow, D.G. (1991). Marijuana carry-over effects on aircraft pilot performance. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 62 : 221-227.
- Leon-Carrion, J. (1990). Mental performance in long-term heavy cannabis use: a preliminary report. *Psychological Report*, 67(3): 947-52.
- Levy, R. & Goldman-Rakic, P.S. (2000). Segregation of working memory functions within the dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, 133(1), 23-32.
- Levy-Schoen, A. & Blanc-Garin J. (1974). On oculomotor programming and perception. *Brain Research*, 71, 443-450.

- Lisberger, S.G., Fuchs, A.F., King, W.M. & Evinger, L.C. (1975). Effect of mean reaction time on saccadic responses to two-step stimuli with horizontal and vertical components. *Vision Research*, 15, 1021-1025.
- Lima, S. D. (1987). Morphological analysis in sentence reading. *Journal of Memory and Language*, 26, 84-99.
- Lima, S. D. & Inhoff, A. W. (1985). Lexical access during eye fixations in reading: Effects of word-initial letter sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 11, 272-285.
- Lyketsos, C.G., Garrett, E., Liang, K.Y. & Anthony, J.C. (1999). Cannabis use and cognitive decline in persons under 65 years of age. *American Journal of Epidemiology*, 149: 794-800.
- Machado, L. & Rafal, R. (2000). Control of eye movement reflexes. *Experimental Brain Research*, 135, 73-80.
- Mac Keben, M. (1999). Sustained focal attention and peripheral letter recognition. *Spatial Vision*, 12, 51-72.
- Mackworth, M.H. & Morandi, A.J. (1967). The gaze selects informative details within pictures. *Perception and Psychophysics*, 2, 547-552.
- Mannan, S., Ruddock, K.H. & Wooding, D.S.P. (1995). Automatic control of saccadic eye movements made in visual inspection of briefly presented 2-D images. *Spatial Vision*, 9, 363-368.
- Massen, Christina. (2002). *Exekutive Kontrolle und sakkadische Augenbewegungen: Inhibitionsmechanismen in der Antisakkadenaufgabe*. Psychologia universalis; N.R., Bd. 29. Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Matin, E. (1974). Saccadic suppression: a review and an analysis. *Psychological Bulletin*, 81(12), 899-917.
- Matsuda, L., Lolait, S.J., Brownstein, M.J., Young, A.C. & Bonner, T.I. (1990). Structure of a cannabinoid receptor and functional expression of the cloned cDNA. *Nature*, 346, 561-564.
- McConkie, G. W. (1981). Evaluating and reporting data quality in eye movement research. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 13, 97-106.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W. & Dyre, B. P. (1994). What are „normal“ eye movements during reading: Toward a mathematical description. In J. Ygge & G. Lennerstrand (Eds.), *Eye movements in reading*. 315-328. Oxford, England: Pergamon Press.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D. & Zola, D. (1988). Eye movement control during reading: I. The location of initial eye fixations in words. *Vision research*, 28, 1107-1118.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D., Zola, D. & Jacobs, A. M. (1989). Eye movement control during reading: II. Frequency of refixating a word. *Perception & Psychophysics*, 46, 245-253.

- McConkie, G. W. & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, *17*, 578-586
- McConkie, G. W. & Rayner, K. (1976). Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *8*, 365-368.
- McLaughlin, C.R. & Abood, M.E. (1993). Developmental expression of cannabinoid receptor mRNA. *Developmental Brain Research*, *76*, 75-78.
- Mechoulam, R., Ben-Shabat, S., Hanus, L., Ligumsky, M., Kaminski, N.S.A., Gopher, A., Almog, S., Martin, B.R., Compton, D., Pertwee, R.G., Griffin, G., Bayewitch, M., Barg, J. & Vogel, Z. (1995). Identification of an endogenous 2-monoglyceride, present in canine gut, that binds to cannabinoid receptors. *Biochemical Pharmacology*, *50*, 83-90.
- Megaw, E.D. & Richardson, J. (1979). Eye movements and industrial inspection. *Applied Ergonomics*, *10*, 145-154.
- Mendhiratta, S.S., Varma, V.K., Dang, R., Malhorta, A.K., Das, K. & Nehra, R. (1988). Cannabis and cognitive functions: a re-evaluation study. *British Journal of Addiction*, *83*, 749-753.
- Merriam, E.P., Colby, C.L., Thulborn, K.R., Luna, B., Olson, C.R. & Sweeney, J.A. (2001). Stimulus-response incompatibility activates cortex proximate to three eye fields. *Neuroimage*, *13*, 794-800.
- Millsaps, C.L., Azrin, R.L. & Mittenberg, W. (1994). Neuropsychological effects of chronic cannabis use on the memory and intelligence of adolescents. *Journal of Child and Adolescent Substance Abuse*, *3*(1), 47-55.
- Moeller, M.R., Doerr, G. & Warth, S. (1992). Simultaneous quantitation of delta-9-tetrahydrocannabinol (THC) and 11-nor-9-carboxy-delta-9-tetrahydrocannabinol (THC-COOH) in serum by GC/MS using deuterated internal standards and its application to a smoking study and forensic cases. *Journal of Forensic Sciences*, *37*, 969-983.
- Mokler, A. & Fischer, B. (1999). The recognition and correction of involuntary prosaccades in an antisaccade task. *Experimental Brain Research*, *125*, 511-516.
- Morrison, C. & Ellis, A. (1995). Roles of word frequency and age of acquisition in word naming and lexical decision. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, *21*(1), 116-133.
- Morrison, C., Ellis, A. & Quinlan, P.T. (1992). Age of Acquisition, not word frequency, affects object naming, not object recognition. *Memory & Cognition*, *20*, 705-714.
- Moschovakis, A.K. & Highstein, S.M. (1994). The anatomy and physiology of primate neurons that control rapid eye movements. *Annual Review of Neurosciences*, *17*, 465-88.
- Moser, H., Heide, W. & Kömpf, D. (1998). The effect of oral ethanol consumption on eye movements in healthy volunteers. *Journal of Neurology*, *245*, 542-550.
- Moskowitz, H. (1973). Psychological tests and drugs. *Pharmacopsychiatry*, *6*, 114-126.

- Mostofsky (2001). Oculomotor abnormalities in attention deficit hyperactivity disorder: A preliminary study. *Neurology*, 57, 423-430.
- Munoz, D.P. (2002) . Commentary: Saccadic eye movements: overview of neural circuitry. In: Hyönä, J., Munoz, D.P., Heide, W. & Radach, R. (eds.). *Progress in Brain Research*. Amsterdam: Elsevier.
- Munoz, D.P. & Fecteau, J.H. (2002). Vying for dominance: Dynamic interactions control visual fixation and saccadic initiation in the superior colliculus. In Hyönä, J., Munoz, D.P., Heide, W. and Radach, R. (eds.), *The Brain's Eye: Neurobiological and Clinical Aspects of Oculomotor Research. Progress in Brain Research*, Vol. 140, Elsevier, Amsterdam. S. 3-20.
- Munoz, D. P. & Wurtz, R. H. (1993). Fixation cells in monkey superior colliculus. I. Characteristics of cell discharge and II. Reversible activation and deactivation. *Journal of Neurophysiology*, 70, 559-589.
- Munro, S., Thomas, K.L., Abu-Shaar, M. (1993). Molecular characterization of a peripheral receptor for cannabinoids. *Nature*, 365, 61-65.
- Muri, R.M., Heid, O., NirKKo, A.C., Ozdoba, C., Felblinger, J., Schroth, G. & Hess, C.W. (1998). Functional organisation of saccades and antisaccades in the frontal lobe in humans: a study with echo planar functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 65(3), 374-7.
- Murray, W. S. (2000). Sentence processing: Issues and measures. In Kennedy, A., Radach, R., Heller, D. and Pynte, J (Eds.). *Reading as a Perceptual Process*, Oxford: Elsevier
- Murray, W. S. & Kennedy, A. (1988). Spatial Coding in the processing of anaphor by good and poor readers: Evidence from eye movement analyses. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 40A, 693-718.
- Nam, M.H., Park, S.H. & Choi, O. (1975). Saccadic eye movement characteristics to double-step stimuli. *Yonsei Medical Journal*, 16, 65-71.
- Nazir, T. A., Heller, D. & Sussmann, C. (1992). Letter visibility and word recognition: The optimal viewing position in printed words. *Perception & Psychophysics*, 52, 315-328.
- Nies, U. (1999). *Blickbewegungen und Detektion bei der Suche auf homogenen Flächen*. Aachen: Shaker.
- Noton, D. & Stark, L. (1971a). Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns. *Vision Research*, 11, 929-942.
- Noton, D. & Stark, L. (1971b). Scanpaths in eye movements during pattern perception. *Vision Research*, 11, 929-942.
- Nyffeler, T., Pierrot-Deseilligny, C., Pflugshaupt, T., von Wartburg, R., Hess, C.W., Müri, R.M. (2004). Parallel and serial processing components in memory-guided saccade control. A TMS study. *Experimental Brain Research*, 154, 109-112.
- O'Driscoll, G.A., Alpert, N.M., Matthyse, S.W., Levy, D.L., Rauch, S.L. & Holzman, P.S. (1995). Functional neuroanatomy of antisaccade eye movements investigated with positron

- emission tomography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(3), 925-929.
- Olawsky, H. (1999). *Zum Einfluß der orthographischen Regularität des Wortbeginns auf Lesesakkaden*. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der RWTH Aachen.
- O'Regan, J. K. (1990). Eye movements and reading. In E. Kowler (Ed.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes*. 395-453. Amsterdam: Elsevier.
- O'Regan, J. K. (1992). Optimal viewing position in words and the strategy-tactics theory of eye movements in reading. In Rayner, K. (ed.), *Eye movements and visual cognition: Scene perception and reading*. 333-354. New York: Springer-Verlag.
- O'Regan, K. and Jacobs, A.M. (1992). Optimal viewing position effects in word recognition: A challenge to current theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 185-197.
- Ottes, F.P., Van Gisbergen, J.A. & Eggermont, J.J. (1984). Metrics of saccade responses to visual double step stimuli: two different modes. *Vision Research*, 24, 1169-1179.
- Page, J.B., Fletcher, J. & True, W.R. (1988). Psychosociocultural perspectives on chronic cannabis use: the Costa Rican follow-up. *Journal of Psychoactive Drugs*, 20 (1): 57-65.
- Patrick, G. & Struve, F.A. (2000). Reduction of auditory P50 gating response in marijuana users: further supporting data. *Clinical Electroencephalography*, 31, 88-93.
- Paus, T., Petrides, M., Evans, A.C. & Meyer, E. (1993). Role of the human anterior cingulate cortex in the control of oculomotor, manual, and speech responses: a positron emission tomography study. *Journal of Neurophysiology*, 70(2), 453-69.
- Pertwee, R.G. (1997). Pharmacology of cannabinoid CB₁ and CB₂ receptors. *Pharmacology and Therapeutics*, 74, 129-180.
- Peterson, M.S., Kramer, A.F., Wang, R.F., Irwin, D.E. & McCarley, J.S. (2001). Visual Search has Memory. *Psychological Science*, 12(4), 287-292.
- Pierrot-Deseilligny, C., Rivaud, S., Gaymard, B. & Agid, Y. (1991). Cortical control of reflexive visually guided saccades. *Brain*, 114, 1473-1485.
- Pierrot-Deseilligny, C., Ploner, C.J., Muri, R.M., Gaymard, B. & Rivaud-Pechoux, S. (2002). Effects of cortical lesions on saccadic eye movements in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 956, 216-229.
- Pierrot-Deseilligny, C., Israel, I., Berthoz, A., Rivaud, S. & Gaymard, B. (1993). Role of the different frontal lobe areas in the control of the horizontal component of memory-guided saccades in man. *Experimental Brain Research*, 95, 166-171.
- Pierrot-Deseilligny, C., Muri, R.M., Ploner, C.J., Gaymard, B., Demeret, S. & Rivaud-Pechoux, S. (2003). Decisional role of the dorsolateral prefrontal cortex in ocular motor behaviour. *Brain*, 126, 1460-73.

- Ploner, C.J., Tschirch, A., Ostendorf, F., Dick, S., Gaymard, B.M., Rivaud-Pechoux, S., Sporkert, F., Pragst, F. & Stadelmann, A.M. (2002). Oculomotor effects of delta-9-tetrahydrocannabinol in humans: implications for the functional neuroanatomy of the brain cannabinoid system. *Cerebral Cortex*, 12, 1016-1023.
- Pollatsek, A. & Rayner, K. (1982). Eye movement control in reading: The role of word boundaries. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 817-833.
- Pollatsek, A., Rayner, K. & Balota, D.A. (1986). Inferences about eye movement control from the perceptual span in reading. *Perception & Psychophysics*, 40(2), 123-30.
- Ponsoda, V., Scott, D. & Findlay, J.M. (1995). A probability vector and transition matrix analysis of eye movements during visual search. *Acta Psychologica*, 88, 167-185.
- Pope, H.G. Jr., Gruber, A.J. & Yurgelun-Todd, D. (1995). The residual neuropsychological effects of cannabis. *Drug and Alcohol Dependence*, 38, 25-34.
- Pope, H.G. Jr. & Yurgelun-Todd, D. (1996). The residual cognitive effects of heavy marijuana use in college students. *JAMA*, 275, 521-527.
- Pope, H.G. Jr., Gruber, A.J., Hudson, J.I., Huestis, M.A. & Yurgelun-Todd, D. (2001). Neuropsychological Performance in Long-term Cannabis Users. *Archives of General Psychiatry*, 58: 909-915.
- Posner, M. I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In Bouma, H. & Bouwhuis, D.G. (eds.), *Attention and performance X*. 531-556. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Poulton, E. C. (1981). Human manual control. In Brooks, V. B. (Ed.) *Handbook of Physiology*, Sect. 1, Vol. II, Part 2, 1337-1389, Bethesda: American Physiology Society.
- Pratt, J., Bekkering, H., Abrams, R.A. & Adam, J. (1999). The Gap effect for spatially oriented responses. *Acta Psychologica*, 102, 1-12.
- Radach, R. (1996). *Blickbewegung beim Lesen: Psychologische Aspekte der Determination von Fixationspositionen*. Münster/New York: Waxmann.
- Radach, R. (1999). Top-down influences on saccade generation in cognitive tasks. *Behavioral and Brain Sciences*, 22 (4), 697-698.
- Radach, R. (2002). *Experimentelle Leseforschung: Blickbewegungen und Prozessmodelle*. Unveröffentlichte Habilitationsschrift an der RWTH-Aachen.
- Radach, R. & Heller, D. (2000). Relations between spatial and temporal aspects of eye movement control. In Kennedy, A., Radach, R., Heller, D. and Pynte, J (Eds.). *Reading as a Perceptual Process*, Oxford: Elsevier.
- Radach, R., Huckauf, A. & Heller, D. (1999). Associations and dissociations of attention and eye Movements in a letter identification paradigm. Abstract. *10th European Conference on Eye movements: Book of Abstracts*, Utrecht.

- Radach, R. & Kempe, V. (1993). An individual analysis of initial fixation positions in reading. In d'Ydewalle, G. & Van Rensbergen, J. (eds.), *Perception and cognition: Advances in eye movement research*. 213-226. Amsterdam: North Holland.
- Radach, R. & McConkie, G. W. (1998). Determinants of fixation positions in words during reading. In: Underwood, G. (ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*. 77-101. Oxford, England: Elsevier.
- Radach, R., Reilly, R & Vorstius, C. (2004). *Parafoveal Processing and "optimal" behavior in reading*. Talk on the 45th Annual Meeting of the Psychonomic Society, Minneapolis.
- Rayner, K. (1977). Visual attention in reading: Eye movements reflect cognitive processes. *Memory & Cognition*, 5, 443-448.
- Rayner, K. (1979). Eye guidance in reading: Fixation locations within words. *Perception*, 8, 21-30.
- Rayner, K. (1986). Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 41, 211-236.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124 (3), 372-422.
- Rayner, K., Balota, D. A. & Pollatsek, A. (1986). Against parafoveal semantic preprocessing during eye fixations in reading. *Canadian Journal of Psychology*, 40, 473-483.
- Rayner, K. & Duffy, S. A. (1986). Lexical complexity and fixation times in reading: Effects of word frequency, verb complexity and lexical ambiguity. *Memory & Cognition*, 14, 191-201.
- Rayner, K. & Fischer, M. H. (1996). Mindless reading revisited: Eye movements during reading and scanning are different. *Perception & Psychophysics*, 58, 734-747.
- Rayner, K., Fischer, M. & Pollatsek, A. (1998). Unspaced text interferes with both word identification and eye movement control. *Vision Research*, 38, 1129-1144.
- Rayner, K. & McConkie, G. W. (1976). What guides a readers eye movements. *Vision Research*, 16, 829-837.
- Rayner, K. & Pollatsek, A. (1981). Eye movement control during reading: Evidence for direct control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 33A, 351-373.
- Rayner, K. & Pollatsek, A. (1989). *The psychology of reading*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Rayner, K., Juhasz, B., Ashby, J. & Clifton, C. (2003). Inhibition of saccade return in reading. *Vision Research*, 43, 1027-1034.
- Rayner, K. & Raney, G. E. (1996). Eye movement control in reading and visual search: Effects of word frequency. *Psychonomic Bulletin and Review*, 3 (2), 245-248.
- Rayner, K., Reichle, W. & Pollatsek, A. (2000). Eye movement control in reading: Updating the EZ-reader model to account for initial fixation locations and refixations. In Kennedy, A., Radach, R., Heller, D. and Pynte, J (Eds.). *Reading as a Perceptual Process*. Oxford: Elsevier.

- Rayner, K., Sereno, S. C. & Raney, G. E. (1996). Eye movement control in reading: A comparison of two types of models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 22, 1188-1200.
- Rayner, K. & Well, A. D. (1996). Effects of contextual constraint on eye movements in reading: A further examination. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3, 504-509.
- Reichle, E.D., Rayner, K. & Pollatsek, A. (2003). The E-Z reader model of eye-movement control in reading: comparisons to other models. *Behavioral and Brain Sciences*, 26, 445-476.
- Reuter, B. & Kathmann, N. (2004). Using saccade tasks as a tool to analyze executive dysfunctions in schizophrenia. *Acta Psychologica*, 115, 255-269.
- Reilly, R.G. (2003). Reading text without spaces: The case of Thai script. *Talk on ECEM 12*. Dundee: Scotland
- Reilly, R. & Radach, R. (2003). Foundations of an interactive activation model of eye movement control in reading. In Hyönä, J., Radach, R. & Deubel, H. (Eds.). *The Mind's Eyes: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movements*. Oxford: Elsevier.
- Reuter-Lorenz, P.A., Hughes, H.C. & Fendrich, R. (1991). The reduction of saccadic latency by prior offset of the fixation point: An analysis of the gap effect. *Perception & Psychophysics*, 49 (2), 167-175.
- Reuter-Lorenz, P.A., Oonk, H.M., Barnes, L.L. & Hughes, H.C. (1995). Effects of warning signals and fixation point offsets on the latencies of pro- versus antisaccades: implications for an interpretation of the gap effect. *Experimental Brain Research*, 103, 287-293.
- Rinaldi-Carmona, M., Barth, F., Heaulme, M., Shire, D., Calandra, B., Congy, C., Martinez, S., Maruani, J., Neliat, G., Caput, D., Ferrara, P., Soubrie, P., Breliere, J.C. & Le Fur, G. (1994). SR141716A, a potent and selective antagonist of the brain cannabinoid receptor. *FEBS Letters*, 350, 240-244.
- Rinaldi-Carmona, M., Barth, F., Millan, J., Defrocq, J., Casellas, P., Congy, C., Oustric, D., Sarran, M., Bouaboula, M., Calandra, B., Portier, M., Shire, D., Breliere, J. & Le Fur, G. (1998). SR144528, the first potent and selective antagonist of the CB₂ cannabinoid receptor. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 284, 644-650.
- Rivaud, S., Muri, R.M., Gaymard, B., Vermersch, A.I. & Pierrot-Deselligny, C. (1994). Eye movement disorders after frontal eye field lesions in humans. *Experimental Brain Research*, 102(1), 110-20.
- Robbe, H.W.J. (1994). *Influence of marijuana on driving*. Maastricht: University of Limburg, Institute for Human Psychopharmacology.
- Roberts, R.J., Hager, L.D. & Heron, C. (1994). Prefrontal cognitive processes: Working memory and inhibition in the antisaccade task. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123 (4), 374-393.
- Robinson, F.R., Straube, A. & Fuchs, A.F. (1993). Role of the caudal fastigial nucleus in saccade generation. II. Effects of muscimol inactivation. *Journal of Neurophysiology*, 70, 1741-1758.

- Rosenbaum, D. (1991). *Human Motor Control*. London: Academic Press.
- Rottach, K.G., von Maydell, R.D., Das V.E., Zivotofsky A.Z., Discenna A.O. & Gordon J.L. (1997). Evidence for independent feedback control of horizontal and vertical saccades from Niemann-Pick type C disease. *Vision Research*, 37, 3627-3638.
- Rubin, V. & Comitas, L. (1975). Psychological assessment. In Rubin, V. & Comitas, L. (eds.): *Ganja in Jamaica: A Medical Anthropological Study of Chronic Marijuana Use*. 111-119. Mouton, The Hague.
- Sawaguchi, T. & Goldman-Rakic, P.S. (1994). The role of D1-dopamine receptor in working memory: local injections of dopamine antagonists into the prefrontal cortex of rhesus monkeys performing an oculomotor delayed response task. *Journal of Neurophysiology*, 71, 515-528.
- Schlag-Rey, M., Amador, N., Sanchez, H. & Schlag, J. (1997). Antisaccade performance predicted by neuronal activity in the supplementary eye field. *Nature*, 390, 398-401.
- Schwartz, R.H., Gruenewald, P.J., Klitzner, M. & Fedio, P. (1989). Short-term memory impairment in cannabis-dependent adolescents. *American Journal of Diseases of Children*, 143, 1214-1219.
- Scudder, C.A., Kaneko, C.S. & Fuchs, A.F. (2002). The brainstem burst generator for saccadic eye movements: a modern synthesis. *Experimental Brain Research*, 142, 439-462.
- Selhorst, J.B., Stark, L., Ochs, A.L. & Hoyt, W.F. (1976). Disorders in cerebellar ocular motor control. I. Saccadic overshoot dysmetria. An oculographic control system and clinico-anatomical analysis and II. Macrosaccadic oscillation. An oculographic, control system and clinico-anatomical analysis. *Brain*, 99(3), 497-522.
- Sereno, A.B. & Holzman, P.S. (1995). Antisaccades and smooth pursuit eye movements in schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 37, 394-401.
- Soderstrom, K. & Johnson, F. (2003). Cannabinoid exposure alters learning of zebra finch vocal patterns. *Developmental Brain Research*, 142, 215-217.
- Solowij, N. (1998). *Cannabis and Cognitive Functioning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Solowij, N., Michie, P.T. & Fox, A.M. (1991). Effects of long-term cannabis use on selective attention: an event-related potential study. *Pharmacology, Biochemistry, and Behavior*, 40, 683-688.
- Sommer, M.A. & Tehovnik, E.J. (1997). Reversible inactivation of macaque frontal eye field. *Experimental Brain Research*, 116(2), 229-249.
- Stiglick, A. & Kalant, H. (1985). Residual effects of chronic cannabis treatment on behaviour in mature rats. *Psychopharmacology*, 88, 346-349.
- Struve, F.A., Straumanis, J.J., Patrick, G., Leavitt, J., Manno, J.E. & Manno, B.R. (1999). Topographic quantitative EEG sequelae of chronic marijuana use. *Drug and Alcohol Dependence*, 56, 167-179.

- Sullivan, P. (2000). Ottawa seeks source of medical marijuana. *CMAJ*, *11*, 163-174.
- Sweeney, J.A., Mintun, M.A., Kwee, S., Wiseman, M.B., Brown, D.L., Rosenberg, D.R. & Carl, J.R. (1996). Positron emission tomography study of voluntary saccadic eye movements and spatial working memory. *Journal of Neurophysiology*, *75*, 454-468.
- Takagi, M., Zee, D.S. & Tamargo, R. (1998). Effects of lesions of the oculomotor vermis on eye movements in primate saccades. *Journal of Neurophysiology*, *80*, 1911-1931.
- Thorndike, E. L. (1931). *A teacher's word book of 30,000 words*. New York: Teacher's College Press.
- Tien, A.Y., Pearson, G.D., Machlin, S.R., Bylsma, F.W. & Hoehn-Saric, R. (1992). Oculomotor performance in obsessive-compulsive disorder. *American Journal of Psychiatry*, *149*, 641-660.
- Tinsley, C.J. & Everling, S. (2002). Contribution of the primate prefrontal cortex to the gap effect. *Progress in Brain Research*, *140*, 61-72.
- Togami, H. (1984). Affects on visual search performance of individual differences in fixation time and number of fixations. *Ergonomics*, *27*, 789-799.
- Täumer, R. (1975). Three reaction mechanisms of the saccadic system in response to double jump. In Lennerstrand, G. & Bach-y-Rita, P. (Eds). *Basic Mechanisms of Ocular Motility and their Clinical Implications*. Oxford: Pergamon Express.
- Umeno, M.M. & Goldberg, M.E. (2001). Spatial processing in the monkey frontal eye field. II. Memory responses. *Journal of Neurophysiology*, *86*, 2344-2352.
- Underwood, N. R. & McConkie, G. W. (1985). Perceptual span for letter distinctions during reading. *Reading Research Quarterly*, *20*, 153-162.
- Varma, V.K., Malhorta, A.K., Dang, R., Das, K. & Nehra, R. (1988). Cannabis and cognitive functions: a prospective study. *Drug and Alcohol Dependence*, *21*, 147-152.
- Vermersch, A.I., Gaymard, B.M., Rivaud-Pechoux, S., Ploner, C.J., Agid, Y. & Pierrot-Deseilligny, C. (1999). Memory guided saccade deficit after caudate nucleus lesion. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *66*(4), 524-7.
- Vitu, F. (1991). The influence of parafoveal processing and linguistic context on the optimal landing position effect. *Perception & Psychophysics*, *50*, 58-75.
- Vitu, F., McConkie, G.W., Kerr, P. & O'Regan, J.K. (2001). Fixation location effects on fixation durations during reading: an inverted optimal viewing position effect. *Vision Research*, *41*(25-26), 3513-3533.
- Vitu, F., O'Regan, J. K., Inhoff, A. W. & Topolski, R. (1995). Mindless reading: Eye movement characteristics are similar in scanning letter strings and reading text. *Perception & Psychophysics*, *57*, 352-364.
- Vitu, F., O'Regan, J. K. & Mittau, M. (1990). Optimal landing position in reading isolated words and continuous text. *Perception & Psychophysics*, *47*, 583-600.

- Vonk, W., Radach, R. & van Reijn, H. (2000). Eye guidance and the saliency of word beginnings in reading text. In: Kennedy, A., Radach, R., Heller, D. and Pynte, J (Eds.). *Reading as a Perceptual Process*, Oxford: Elsevier.
- Walker, R., Husain, M., Hodgson, T.L., Harrison, J. & Kennard, C. (1998). Saccadic eye movement and working memory deficits following damage to human prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, 36, 1141-1159.
- Wardak, C., Olivier, E. & Duhamel, J.R. (2002). Saccadic target selection deficits after lateral intraparietal area inactivation in monkeys. *Journal of Neuroscience*, 22, 9877-9884.
- Weber, H., Fischer, B., Bach, M. & Aiple, F. (1991). Occurrence of express saccades under isoluminance and low contrast luminance conditions. *Visual Neuroscience*, 7, 505-510.
- Wegner, A.J. & Fahle, M. (1999). Alcohol and visually guided saccades: gap effect and predictability of target location. *Psychopharmacology*, 146, 24-32.
- Westheimer, G. (1954). Eye movement responses to a horizontally moving visual stimulus. *Archives d' Ophthalmologie*, 52, 932-941.
- White, C. W. (1976). Visual masking during pursuit eye movements. *Journal of Experimental Psychology*, 2, 469-478.
- Widdel, H. & Kastner, J. (1981). Eye movement measurements in the assessment and training of visual performance. In Moraal, J. & Kraiss, K.F. (eds.), *Manned System Design, Methods, Equipment and Applications*. 251-270. New York: Plenum Press.
- Wipfli, M., Felbinger, J., Mosimann, U.P., Hess, C.W., Schläpfer, T.E. & Muri, R.M. (2001). Double-pulse magnetic cranial stimulation over the frontal eye field facilitates triggering of memory-guided saccades. *European Journal of Neuroscience*, 14, 571-575.
- Wolfe, J.M. (1996). Visual Search. In H. Pashler (ed.), *Attention*. London: University College London Press.
- Woodman, G.F., Vogel, E.K. & Luck, S.J. (2001). Visual search remains efficient when visual working memory is full. *Psychological Science*, 12(3), 219-224.
- Yarbus, A.L. (1967). *Eye movements and vision*. New York: Plenum.
- Zelinsky, G.J. & Sheinberg, D.L. (1997). Eye Movements During Parallel-Serial Visual Search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 23 (1), 244-262.
- Zimmermann, P. & Fimm, B. (1993). Diagnosis of attentional deficits: theoretical considerations and presentation of a test battery. In Stachowiak, F.J. (ed.). *Developments in the assessment and rehabilitation of brain damaged patients*. 3-30. Tübingen: Narr Verlag.

11. Anhang

A) Bildschirm-Instruktionen zu den einzelnen Experimenten (Kapitel 2 bis 8)

Visuelle Suche

Bei der folgenden Aufgabe sehen Sie auf dem Bildschirm folgende Zeichen: ...
Bitte drücken Sie so schnell wie möglich auf die linke Taste, wenn folgendes Symbol erscheint: ...
Wenn dieses Symbol nicht erscheint, drücken Sie bitte so schnell wie möglich auf die rechte Taste.

Prosakkaden

Herzlich Willkommen zum Experiment!
Bei diesem Versuch sehen Sie in der Mitte des Bildschirms ein Kreuz, das Sie fixieren sollen. Wenn rechts oder links davon ein Quadrat erscheint, fixieren Sie dies so schnell und genau wie möglich. Wenn es wieder verschwindet, blicken Sie wieder auf das mittlere Kreuz. Blinzeln Sie möglichst nicht während Sie das Quadrat ansehen, sondern in den Ruhepausen beim Betrachten des Kreuzes. Bewegen Sie sich während des Versuchs bitte so wenig wie möglich. Sie können jetzt noch Fragen stellen. Drücken Sie zum Start die Leertaste, dann erfolgt eine Kalibrierung.

Antisakkaden

Herzlich Willkommen zum Experiment!
Bei diesem Versuch sehen Sie in der Mitte des Bildschirms ein Kreuz, das Sie fixieren sollen. Wenn rechts oder links davon ein Quadrat erscheint, blicken Sie so schnell und genau wie möglich auf die ENTGEGENGESETZTE Seite. Wenn also rechts ein Quadrat erscheint, blicken Sie in der gleichen Entfernung nach links. Blicken Sie dann wieder auf das mittlere Kreuz. Blinzeln Sie möglichst nicht während Sie die Bewegung ausführen, sondern in den Ruhepausen beim Betrachten des Kreuzes. Während des Experiments sollten Sie sich so wenig wie möglich bewegen. Sie können jetzt noch Fragen stellen.
Drücken Sie zum Start die Leertaste, dann erfolgt eine Kalibration.

„Memory guided“ Sakkaden

Herzlich Willkommen zum Experiment!
Bei diesem Versuch sehen Sie in der Mitte des Bildschirms ein Kreuz, das Sie fixieren sollen. Wenn rechts oder links davon später ein Quadrat erscheint, fixieren Sie weiterhin das mittlere Kreuz. Erst wenn das mittlere Kreuz verschwindet, sollen Sie so schnell und genau wie möglich an die Position blicken, an der sich vorher das Quadrat befand. Danach blicken Sie wieder auf das erneut erscheinende Kreuz in der Mitte.
Sie bewegen Ihre Augen also nur, wenn das mittlere Kreuz verschwindet!
Während des Experiments sollten Sie sich so wenig wie möglich bewegen.
Sie können jetzt noch Fragen stellen.
Drücken Sie zum Start die Leertaste, dann erfolgt eine Kalibration.

„Double Step“ Sakkaden

Herzlich Willkommen zum Experiment!

In diesem Versuch sehen Sie in der Mitte des Bildschirms ein Kreuz, das Sie fixieren sollen. Dann erscheint ein Quadrat, das in vielen Fällen noch weiter zum Bildschirmrand springt und das Sie mit den Blicken so schnell und genau wie möglich verfolgen sollen. Wenn das Quadrat verschwindet, blicken Sie auf das wiedererscheinende Kreuz in der Mitte. Während des Experiments sollten Sie sich so wenig wie möglich bewegen. Mit Druck der Leertaste startet die Kalibration. Vorher können Sie noch Fragen stellen.

Periphere Buchstabenerkennung

Herzlich Willkommen zum Experiment!

In diesem Versuch erscheint in der Mitte des Schirms ein Kreuz, das Sie fixieren sollen. Dann erscheint rechts oder links ein Buchstabe, den Sie so schnell wie möglich anblicken und erkennen sollen. Um diese Aufgabe etwas schwerer zu machen, wird der Buchstabe nach kurzer Zeit durch ein Quadrat ersetzt.

Nach dem Betrachten des Buchstabens kehren Sie bitte auf das Kreuz zurück. Dann wählen Sie bitte unter den zehn Buchstaben auf dem Bildschirm denjenigen aus, den Sie gesehen haben. Bitte versuchen Sie immer, einen Buchstaben anzugeben, der es gewesen sein könnte. Nur wenn Sie ABSOLUT KEINE AHNUNG haben, benutzen Sie das Fragezeichen.

Während des Experiments sollten Sie sich so wenig wie möglich bewegen.

Mit der Leertaste starten Sie den Versuch. Wenn Sie noch Fragen haben, stellen Sie diese bitte jetzt.

Als erstes erfolgt eine Kalibration.

Lesen

Herzlich Willkommen zum Experiment!

In diesem Versuch sehen Sie nacheinander Sätze, die Sie so lesen sollen, dass Sie auf die gelegentlich auftretenden Fragen so genau und ausführlich wie möglich antworten können. Vor jedem Satz erscheint ein Kreuz, das Sie genau in der Mitte fixieren sollen. Wenn Sie genau die Mitte fixieren, drücken Sie die Leertaste, und der nächste Satz erscheint.

Die Fragen beziehen sich immer auf den jeweils zuletzt gelesenen Satz.

Die Sätze sind alle einem Themengebiet entnommen, bilden aber keinen Zusammenhang.

Wenn Sie einen Satz gelesen haben, bleiben Sie auf dem Punkt am Satzende und drücken Sie dann wieder die Leertaste.

Jetzt wird als erstes das System kalibriert. Zum Fortsetzen bitte Taste drücken.

B) Liste der Zielwörter und ihrer relevanten Parameter (Kapitel 8)

Bedingung ¹	Zielwort	Wortlänge	Silbenanzahl	Worthäufigkeit je Mio (Celex '96)	Bigrammfrequenz des Wortes	Bigrammfrequenz der Wortgrundform	subj. Vertrautheit (vgl. Anhang D)
1	Iglu	4	2	0,19	123,67	148,91	4,9
1	Kufe	4	2	0,19	2907,67	6753,21	5,25
1	Trog	4	1	0,19	1801	3587,38	4,85
1	Kork	4	1	0,37	3702,67	8542,55	4,2
1	Sold	4	1	0,37	1689,67	5303,47	5,2
1	Rabe	4	2	0,56	2053,33	6075,12	3,85
1	Zank	4	1	0,56	2205,33	6746,23	4,7
1	Pilz	4	1	0,56	943,67	2036,38	3,1
1	Filz	4	1	0,56	1023,33	2274,25	4,45
1	Most	4	1	0,74	3238,33	6475,74	5,25
1	Steg	4	1	0,74	2147	4795,82	4,84
1	Fuhre	5	2	0,19	2274,75	5908,6	4,6
1	Feile	5	2	0,19	4247,5	12698,03	3,8
1	Ikone	5	3	0,19	915	3680,94	5,4
1	Asket	5	2	0,37	874,75	1205,93	5,4
1	Fauna	5	2	0,37	1767	3137,74	4,55
1	Fjord	5	1	0,56	335,75	411,56	5,25
1	Pfand	5	1	0,56	1432	2779,51	3,15
1	Trupp	5	1	0,74	1009	1737,03	5,1
1	Hanse	5	2	0,74	3177	10102,07	5,4
1	Wuchs	5	1	0,74	3096,25	14024,53	4,5
1	Zenit	5	2	0,93	1763,75	9165,91	4,7
1	Zwist	5	1	0,93	2418,75	4535,17	5
2	Last	4	1	18,7	3703,67	11501,8	3,45
2	Paar	4	1	20,7	838	1977,83	2,45
2	Idee	4	2	77,2	184	1018,01	1,95
2	Sohn	4	1	102	1529,67	2947,87	3,05
2	Plan	4	1	106	2009,67	3584,03	2,25
2	Sinn	4	1	159	4761,67	20249,23	1,95
2	Erde	4	2	187	1406	4323,27	2,55
2	Volk	4	1	204	1678,33	5333,34	3,3
2	Bild	4	1	229	1181,33	2940,48	2,25
2	Land	4	1	241	3260,33	10833,63	2,4
2	Teil	4	1	316	4108,33	14076,98	2,05
2	Hand	4	1	327	3339,33	11303,97	2
2	Waffe	5	2	25,7	1342,75	2425,16	3,15
2	Küste	5	2	33,3	4572,5	11009,89	2,75
2	Stern	5	1	34,1	3532	8639,91	2,55
2	Kreis	5	1	114	2782,25	6472,79	2,3
2	Liebe	5	2	118	3128	19136,61	1,5
2	Natur	5	2	124	1311,75	3836,91	2,15
2	Reihe	5	2	133	3746	12243,65	2,5
2	Sache	5	2	193	4452,25	16631,76	2,1
2	Vater	5	2	201	5059,25	14069	2,15
2	Kampf	5	1	286	1245,5	2827,82	3,15

2	Frage	5	2	473	3398,75	7601,2	1,75
2	Leben	5	2	474	3828,25	12579,58	1,45
3	Konformist	10	3	0,19	2660,11	4971,79	5,35
3	Manufaktur	10	4	0,19	1129,89	3032,98	4,6
3	Aktivismus	10	4	0,19	767,56	1327,64	4,95
3	Ethnologie	10	4	0,37	1105,11	1417,48	5,2
3	Geschmeide	10	3	0,37	4164,44	9109,74	5,6
3	Einsiedler	10	3	0,37	4315,56	9209,44	4,55
3	Dichtkunst	10	2	0,56	3325,44	11551,35	5
3	Ausgrabung	10	3	0,74	2570,56	4772,91	4,25
3	Falschheit	10	2	0,74	3256,56	6020,4	4,5
3	Kuriosität	10	5	0,74	1541,78	3196,82	4,35
3	Protektion	10	3	0,93	2647,11	5868,81	4,8
3	Scharfsinn	10	2	0,93	3583,56	5722,9	4,05
3	Deskription	11	3	0,19	1710,1	4244,67	5
3	Dinosaurier	11	5	0,19	3467,4	7278,01	4,4
3	Implikation	11	4	0,37	1179,1	2381,35	4,7
3	Exzentriker	11	4	0,37	2785,1	5569,68	4,65
3	Exploration	11	4	0,56	1183,1	1944,94	5,1
3	Homogenität	11	5	0,56	2106	4366,99	3,4
3	Provokateur	11	4	0,56	2393,5	3671,35	4,55
3	Zirkulation	11	4	0,56	1370,6	3102,21	3,85
3	Transparenz	11	3	0,56	3269	4801,65	3,4
3	Berühmtheit	11	3	0,74	3383,5	10673,69	3,25
3	Kaleidoskop	11	4	0,74	1289,9	2969,77	5,05
3	Deklaration	11	4	0,63	1536	2664,59	4,5
4	Landschaft	10	2	27,6	3057	7213,88	2,65
4	Initiative	10	6	62,2	1575,22	2845,99	2,7
4	Erkenntnis	10	3	72,8	1944,11	5796,08	2,45
4	Amerikaner	10	5	94,1	3211,78	5566,18	2,47
4	Demokratie	10	4	95,4	1598,67	3326,57	2,45
4	Menschheit	10	2	104	3699,22	9218,34	2,9
4	Diskussion	10	3	107	1285,11	2485,24	2,1
4	Verhältnis	10	3	109	3544,78	11510,71	2,2
4	Produktion	10	3	153	1368,22	2771,46	2,55
4	Wirtschaft	10	2	178	2795,78	6413,35	2,2
4	Frankreich	10	2	221	3368,44	6124,68	2,2
4	Geschichte	10	3	259	6070,44	11608,84	2,45
4	Kooperation	11	5	24,1	2814	5478,2	2,75
4	Information	11	4	26,3	1266,9	2299,92	1,9
4	Intelligenz	11	4	34,1	4499,2	7638,9	2
4	Verständnis	11	3	58,5	4193,6	11831,93	2,35
4	Universität	11	5	101	2447,4	4808,53	1,7
4	Mitarbeiter	11	4	101	3965,6	6408,24	2,15
4	Vorsitzende	11	4	114	3875,9	7377,85	3,05
4	Unternehmen	11	4	116	4389,9	9115,23	2
4	Fortsetzung	11	3	150	2459	5241,88	2,65
4	Möglichkeit	11	3	184	1990,3	4278,16	1,9
4	Bevölkerung	11	4	213	1930,6	3880,34	2,4
4	Deutschland	11	2	421	2386,7	5275,89	1,84

¹ (1=kurz/selten; 2=kurz/häufig; 3=lang/selten; 4=lang/häufig)

C) Liste aller verwendeten Zielwortsätze (Kapitel 8)

Ein so karges Land wie die Arktis würde man auf einem fernen *Stern* eher vermuten.
Die Eskimos haben eine auffällig kleine *Hand* sowie eher kurze Arme und Beine.
Das genaue *Verhältnis* der regionalen Dialekte ist heute linguistisch gut untersucht.
Ein Eisbär sucht an einem einsamen *Fjord* nach guter Beute im kalten Polarmeer.
Auch Menschen kommen mit der schweren *Last* des arktischen Klimas zurecht.
Die bewegte *Geschichte* der Inuit berichtet von einem langen Prozeß der Anpassung.
Das Landesinnere ist von einer baumlosen *Landschaft* mit wenigen Hügeln geprägt.
Die Inselbewohner unterscheiden sich durch einen kleineren *Wuchs* von den Übrigen.
Man fand auch zur Herstellung von frischem *Most* aus Beeren geeignete Geräte.
Er lebte wie strenger *Asket* ohne jede Beachtung seines eigenen materiellen Wohls.
Die neuen Funde sicherten eine weitere *Fortsetzung* der kostspieligen Ausgrabungen.
Hier legte er mit einem neuen *Mitarbeiter* ein etwa sieben Meter tiefes Areal frei.
Im ganzen weiten *Deutschland* gibt es kein Gewässer mit ähnlichen Ausmaßen.
Auf der Wanderung diente manchmal nur ein nahrhafter *Pilz* als ganze Tagesration.
Zwischen 1958 und 1961 fand eine weitere *Ausgrabung* in Cape Krusenstern statt.
Eine ganze *Reihe* von Vermutungen konnten durch die Ausgrabung bestätigt werden.
Dieses Gebiet war noch unerforscht und auf keinem *Plan* Alaskas verzeichnet.
Henry Rink untersuchte ab 1871 mit großem *Scharfsinn* die Herkunft der Eskimos.
Die Inuit suchen die Erklärung ihrer Herkunft in der reichen *Dichtkunst* ihrer Ahnen.
Der *Rabe* baute einen kleinen *Steg* und suchte dann nach weiteren Grasbüscheln.
Die nördlichsten Küsten der ganzen *Erde* wurden zur neuen Heimat der Eskimos.
Ein großes Mirakel innerhalb der Völkerkunde ist die *Frage* der Herkunft der Inuit.
Nach Darwin entwickelte sich die gesamte *Fauna* durch biologische Anpassung.
Der bei den Eskimos heilige *Rabe* soll vor langer Zeit ihr Land erschaffen haben.
Viele Forscher hielten den Außenseiter für einen üblen *Provokateur* ohne Seriosität.
Nach der alten Legende stammt die gesamte *Menschheit* aus dem heutigen Kanada.
Die logische *Implikation* der Theorie war die Negierung einer eigenen Volksgruppe.
Die Indianer der westlichen *Küste* Kanadas sehen den zentralen Eskimos ähnlich.
Erst heute gibt es die echte *Möglichkeit* einer genauen Untersuchung der alten Ideen.
Manchmal stellten die Eskimos auch einen großen *Trog* mit Futter als Lockmittel auf.
Die Zeitungen sorgten für die wachsende *Berühmtheit* seiner Entdeckungen.
Auf den ersten Blick scheint sich dem Betrachter ein trauriges *Bild* zu zeigen.
Von Norden nach Süden gemessen ist das riesige *Land* so lang wie die USA.
Er wollte durch völlige *Transparenz* und gegenseitige Information Probleme lösen.
Aus der endlos weißen Fläche ragen nur hier und da brauner *Farn* und karge Pflanzen.
Sein Eingreifen in die aktuelle *Diskussion* brachte ihm dabei nicht nur Freunde ein.
Giddings war sicher kein typischer *Konformist* und ein ungewöhnlicher Gelehrter.
Der kulturelle *Zenit* einer Gesellschaft aus Jägern und Sammlern war überschritten.
Die Bücher machen spannende *Unternehmen* aus jeder einzelnen Forschungsreise.
Seine Schilderungen berichten die ganze Wahrheit über das harte *Leben* im Norden.
Besonders Waffen und Werkzeuge waren mit echter *Liebe* zum Detail gefertigt.
Über eine reine *Deskription* hinaus kann die moderne Forschung Ursachen erklären.
Zur Bearbeitung von Knochen waren Bohrer und eine primitive *Feile* benutzt worden.
Er durchschaute die ganze *Falschheit* der Regierungen gegenüber den Ureinwohnern.
In der Kreidezeit wurden die alten *Dinosaurier* von kleinen Säugetieren verdrängt.
In der Geschichte siegt fast immer kreative *Information* über physische Stärke.
Er begründete seine neuartige *Erkenntnis* durch biologische und kulturelle Faktoren.
Ihr Merkmal war ein ständiger *Aktivismus* und unermüdlicher Erfindungsreichtum.
Unter extremen Bedingungen ist praktische *Intelligenz* für das Überleben wichtig.
Oft wohnten in einem einzigen aus Schnee gebauten großen *Iglu* mehrere Familien.

In der modernen *Ethnologie* unterscheidet man meist Stämme von Familienclans. Zu den ausgelassenen Festen reiste oft die ganze *Bevölkerung* eines Stammes an. Eine genaue *Exploration* der Sozialstruktur zeigt Unterschiede zwischen Völkern. Natürlich gibt es auch in einem friedlichen *Volk* mitunter individuelle Verbrechen. Der Handel war in der arktischen *Wirtschaft* ein ausgesprochen wichtiges Element. Man wollte einen störenden *Zank* zwischen den einzelnen Familien vermeiden. Bei einer Begegnung mit einem anderen *Trupp* wurde häufig miteinander gefeiert. Die Händler transportierten eine schwere *Fuhre* über riesige Strecken auf Schlitten. Die Handelswaren wurden meist in einer kleinen *Manufaktur* hergestellt und gelagert. Die soziale *Homogenität* der Gruppen erleichterte das enge Zusammenleben sehr. Viele ältere *Amerikaner* erinnern sich noch an die Zeitungsberichte über Polygamie. Jeder mußte ein Geschenk aus eigener *Produktion* mitbringen und verteilen. Nur unter der mächtigen *Protektion* eines guten Schamanen konnte die Gruppe gedeihen. Meist überredete ein weiser *Vater* den Jungen zum Eintritt in die eigene Gruppe. Eine besonders interessante *Kuriosität* waren Rituale zur Austreibung von Dämonen. Viele der Jugendlichen wollten in den edlen *Kreis* der Jäger aufgenommen werden. Irgendwann war der geliebte *Sohn* zum Mann herangewachsen und verließ das Haus. Ein tieferer *Sinn* des Lebens kann durch jede Weltanschauung vermittelt werden. Die Jäger warteten stundenlang auf Matten aus dickem *Filz* an einem Loch im Eis. Das bunte *Kaleidoskop* der Rituale war für Außenstehende besonders faszinierend. Die Anführer hatten nur zu einem geringen *Teil* wirklichen Einfluß auf die Familien. In den Familien übernahm eine heilige *Ikone* die Rolle des persönlichen Schutzgottes. Es gab eine ständige *Zirkulation* bei den wichtigen Positionen in der Gemeinschaft. Die Unterdrückten erhielten oft nicht einmal einen kleinen *Sold* für ihre Dienste. Es bestand eine gute *Kooperation* zwischen dem Führer und den übrigen Mitgliedern. In einer offiziellen *Deklaration* hat sich der kanadische Staat zuerst entschuldigt. Ein festes *Paar* kann die vielfältigen Probleme des Alltags am besten bewältigen. Nur der Häuptling hatte traditionsgemäß einen Schlitten mit glatter *Kufe* aus Metall. Die eigene Frau hinterließ er vorübergehend als sicheres *Pfand* dem anderen Mann. Nur während der Jagd trugen die Menschen der Arktis eine scharfe *Waffe* mit sich. Die Europäer bezahlten die Pelze mit kostbarem *Geschmeide* und Genußmitteln. In Südalaska kann der August im Vergleich zum südlichen *Frankreich* wärmer sein. Die wesentliche *Idee* bestand in der Anpassung der Ureinwohner an die Zivilisation. Die Benachteiligung führte zu ständigem *Zwist* mit der amerikanischen Regierung. Ähnlich wie bei der deutschen *Hanse* war der Seehandel von zentraler Bedeutung. Die alleinige *Vorsitzende* des Familienrates war immer die Großmutter der Frau. Die Struktur entspricht auch unserem üblichen *Verständnis* von einer Familie. Die Rollenverteilung war eindeutig eine wichtige *Sache* für das tägliche Überleben. Sie hielt den Fußboden aus grobem *Kork* und die übrige Einrichtung in Ordnung. Von besonderer Aktualität ist der langwierige *Kampf* um die Rückgabe des Landes. Die Gründung einer eigenen *Universität* für die Eskimos ist noch immer illusorisch. In einer wirklichen *Demokratie* sollten Minderheiten nicht diskriminiert werden. Ein englischer *Exzentriker* sammelte als erster Informationen über die Eskimos. Die Verwandten legten oft eine große *Initiative* an den Tag und sorgten für alles. Trotz Hunger und Kälte konnte sich in der kargen *Natur* eine eigene Kultur entfalten.

D) Fragebogen zur Geläufigkeit von Wörtern: Titelseite (Kapitel 8)

Angaben zur Person:

Alter: _____

Geschlecht: weiblich männlich

Schulbildung: _____

Beruf: _____

Ist Deutsch Ihre Muttersprache?

ja

nein

Auf den folgenden Seiten finden Sie eine Liste von Wörtern. Bitte beurteilen Sie, wie geläufig Ihnen diese Wörter sind.

Denken Sie nicht zu lange über Ihr Urteil nach. Es handelt sich nicht um einen Test. Es geht lediglich darum, die individuelle Geläufigkeit von Wörtern einzuschätzen.

	1	2	3	4	5	6	7
	allgegenwärtig	sehr geläufig	eher geläufig	mittel	wenig geläufig	nicht geläufig	völlig unbekannt
Sonne							
Selbsthilfe							
Mittag							
Exosphäre							
Hefe							
Arbeiter							
Tarantel							
Klempner							
Indigenat							

1: allgegenwärtig

2: sehr geläufig

3: eher geläufig

4: mittel

5: wenig geläufig

6: nicht geläufig

7: völlig unbekannt

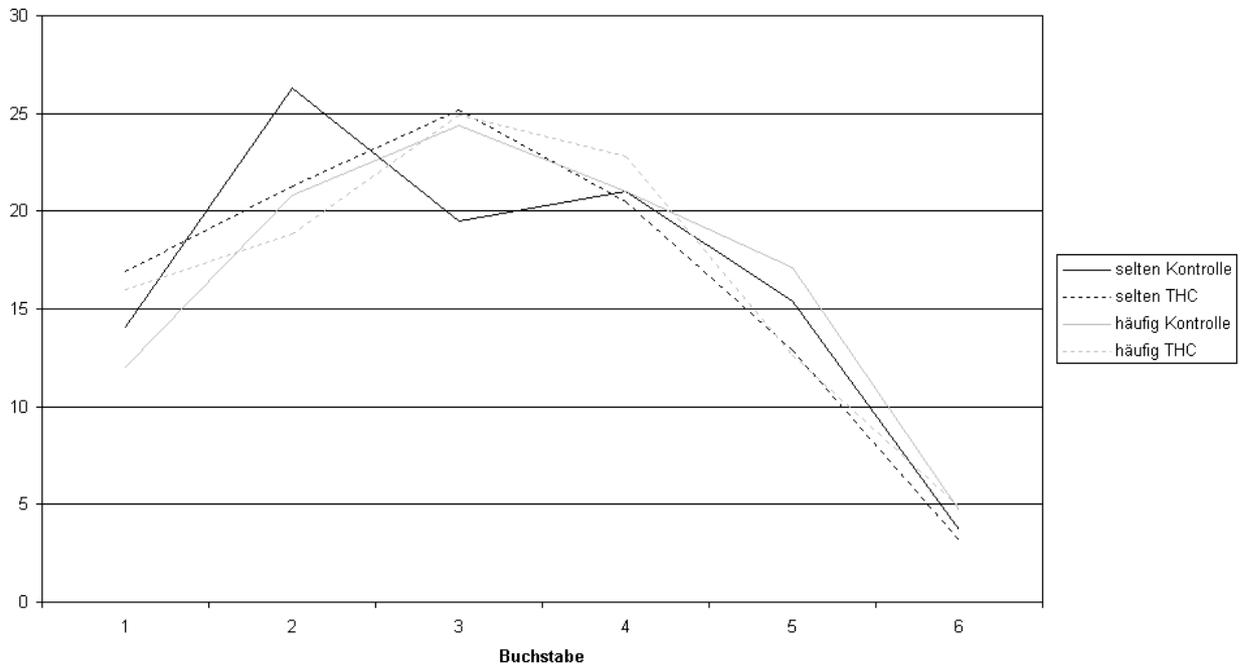
Hätten Sie z.B. bei dem Wort „Mittag“ eine 1 angekreuzt, so wären Sie der Ansicht, daß Ihnen dieses Wort sehr geläufig ist und Sie es häufig benutzen.

Bewerten Sie „Selbsthilfe“ mit 4, so ist Ihnen dieses Wort in mittlerem Ausmaße geläufig.

Bewerten Sie das Wort „Exosphäre“ mit einer 7, so ist Ihnen dieses Wort völlig unbekannt. Bitte verfahren Sie nach diesem Schema mit allen folgenden Wörtern.

E) Initiale Landepositionsfunktionen auf den Zielwörtern (Kapitel 8)

Initiale Landepositionsverteilung für *kurze* Wörter (rel. Häufigkeit in %)



Initiale Landepositionsverteilung für *lange* Wörter (rel. Häufigkeit in %)

