

Visuelles Kurzzeitgedächtnis und Aufmerksamkeit
während
glatter Augenfolgebewegungen

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der Philosophie des Fachbereichs 06
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Nathalie Evelyn Ziegler

aus Gießen

2005

Dekan: Prof. Dr. Dr. Jürgen Hennig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Dirk Kerzel

2. Berichterstatter: Prof. Karl Gegenfurtner, PhD

Tag der Disputation:

Für meine Eltern

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Interaktion zwischen Aufmerksamkeitsverlagerungen, der Steuerung glatter Augenfolgebewegungen und Lokalisationsurteilen“ entstanden (DFG KE 825/3-1 und 825/4-1,2).

Das Projekt wurde in der Abteilung Allgemeine Psychologie an der Justus-Liebig-Universität Gießen realisiert. Mein Dank gilt daher Herrn Prof. Karl Gegenfurtner, PhD als Leiter der Abteilung sowie allen übrigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre fortwährende Unterstützung. In ganz besonderer Weise danke ich in diesem Zusammenhang meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Dirk Kerzel, der seit Oktober 2004 an der Université de Genève in der Schweiz arbeitet, und Leiter des oben genannten DFG-Projekts ist.

Dirk, ich danke Dir für alles, was Du mich gelehrt hast – über die Wahrnehmungspsychologie im speziellen und über das Leben im Allgemeinen – und ich danke Dir auch für das, was Du mich nicht gelehrt hast.

Bedanken möchte ich mich des Weiteren bei meinen beiden studentischen Hilfskräften Nadine Lipke und Nina Susan Barthel, die für mich weite Teile der Datenerhebung für diese Arbeit durchgeführt haben. Außerdem danke ich selbstverständlich allen Versuchspersonen für ihre Teilnahme an meinen Experimenten.

Nadine und Nina, es hat großen Spaß gemacht, mit Euch zusammen zu arbeiten. Euer Engagement, Eure Zuverlässigkeit, ja Eure Arbeitsmoral im Ganzen waren stets vorbildlich. Hiwis wie Euch kann man sich als wissenschaftliche Mitarbeiterin nur wünschen!

Nina, Dir möchte ich an dieser Stelle noch einmal ganz persönlich danken. Du bist mir in den knapp drei Jahren, seit denen ich jetzt in Gießen bin, zu einer lieben Freundin geworden. Du warst für mich da, hast mir „über das Köpfchen gestreichelt“, wenn ich vor lauter Wut, Überforderung oder Verzweiflung wieder einmal meine Promotion an den Nagel hängen wollte. Danke.

Ich bedanke mich bei Herrn Dr. habil. Arndt Bröder aus der Abteilung Allgemeine Psychologie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Arndt, ich werde nie vergessen, wo ich herkomme. Du hast mich glaubend gemacht, dass ich das hier schaffe. Ohne Dich wäre ich heute nicht da, wo ich jetzt bin.

Zu guter letzt möchte ich meiner „kleinen Schwester“ Madelon Ziegler und meinem lang-jährigen Freund Torsten Wettich danken.

Ich danke Euch dafür, dass Ihr ein wunderbarer Teil meines Lebens seid.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Überblick	9
1.1	Überblick	9
1.2	Augenbewegungen	10
1.2.1	Aufgaben und Typen von Augenbewegungen	10
1.2.2	Steuerung von glatten Augenfolgebewegungen	18
1.2.3	Physiologie von Augenfolgebewegungen	19
1.3	Visuelle Aufmerksamkeit	22
1.4	Visuelles Gedächtnis	30
2	Visuelles Kurzzeitgedächtnis	
	während glatter Augenfolgebewegungen	39
2.1	Theoretischer Hintergrund	39
2.2	Experiment 1a: Gedächtnis für die Position von Objekten	48
2.2.1	Methode	51
2.2.2	Ergebnisse	56
2.2.3	Diskussion	61
2.3	Experiment 1b: Exzentrisches Testbild	64
2.3.1	Methode	64
2.3.2	Ergebnisse	65
2.3.3	Diskussion	66
2.4	Experiment 1c: Sich bewegendes Testbild	66
2.4.1	Methode	67
2.4.2	Ergebnisse	68
2.4.3	Diskussion	69
2.5	Experiment 1d: Aufgeblitztes („flashed“) Gedächtnisbild	69
2.5.1	Methode	70
2.5.2	Ergebnisse	71
2.5.3	Diskussion	71

2.6	Experiment 2: Miniatur-Bild in der Fovea.....	71
2.6.1	Methode.....	72
2.6.2	Ergebnisse.....	73
2.6.3	Diskussion.....	74
2.7	Experiment 3: Retinale Bewegung mit und ohne Augenbewegungen.....	76
2.7.1	Methode.....	77
2.7.2	Ergebnisse.....	78
2.7.3	Diskussion.....	78
2.8	Experiment 4: Sensorisches Gedächtnis.....	79
2.8.1	Methode.....	80
2.8.2	Ergebnisse.....	82
2.8.3	Diskussion.....	85
2.9	Experiment 5: Farbe.....	86
2.9.1	Methode.....	87
2.9.2	Ergebnisse.....	88
2.9.3	Diskussion.....	89
2.10	Experiment 6: Unterschiedliche Smooth Pursuit-Geschwindigkeiten.....	90
2.10.1	Methode.....	91
2.10.2	Ergebnisse.....	91
2.10.3	Diskussion.....	92
2.11	Allgemeine Diskussion.....	92

3 Aufmerksamkeitsverteilung

	während glatter Augenfolgebewegungen.....	98
3.1	Theoretischer Hintergrund.....	98
3.2	Experiment 7: Aufmerksamkeitsverteilung während Smooth Pursuit.....	105
3.2.1	Methode.....	106
3.2.2	Ergebnisse.....	110
3.2.3	Diskussion.....	114

4 Aufmerksamkeitsverlagerungen

	während glatter Augenfolgebewegungen.....	117
4.1	Theoretischer Hintergrund.....	117

4.2	Experiment 8a: Exogene Aufmerksamkeitsshifts (perzeptuelle Diskrimination).....	125
4.2.1	Methode.....	130
4.2.2	Ergebnisse.....	135
4.2.3	Diskussion.....	141
4.3	Experiment 8b: Smooth Pursuit während der Darbietung eines exogenen Cues.....	143
4.3.1	Methode.....	143
4.3.2	Ergebnisse.....	144
4.3.3	Diskussion.....	146
4.4	Vergleich des Gains der Experimente 8a und 8b.....	146
4.5	Experiment 9a: Endogene Aufmerksamkeitsshifts (perzeptuelle Diskrimination).....	149
4.5.1	Methode.....	151
4.5.2	Ergebnisse.....	152
4.5.3	Diskussion.....	156
4.6	Experiment 9b: Smooth Pursuit während der Darbietung eines endogenen Cues.....	157
4.6.1	Methode.....	158
4.6.2	Ergebnisse.....	158
4.6.3	Diskussion.....	159
4.7	Vergleich des Gains der Experimente 9a und 9b.....	160
4.8	Vergleich des Gains der Experimente 8a, 8b, 9a und 9b.....	162
4.9	Experiment 10: Exogene Aufmerksamkeitsshifts (Detektion).....	163
4.9.1	Methode.....	166
4.9.2	Ergebnisse.....	170
4.9.3	Diskussion.....	174
4.10	Experiment 11: Endogene Aufmerksamkeitsshifts (Detektion).....	175
4.10.1	Methode.....	177
4.10.2	Ergebnisse.....	177
4.10.3	Diskussion.....	181

4.11 Experiment 12: Exogene Aufmerksamkeitsshifts	
(manuelle „speeded discrimination“)	182
4.11.1 Methode	184
4.11.2 Ergebnisse	186
4.11.3 Diskussion	189
4.12 Experiment 13: Exogene Aufmerksamkeitsshifts	
(visuelle „speeded discrimination“)	190
4.12.1 Methode	192
4.12.2 Ergebnisse	192
4.12.3 Diskussion	197
4.13 Allgemeine Diskussion	198
5 Zusammenfassung und Diskussion	202
Literaturverzeichnis	209
Anhang A	224
Anhang B	226

1 Einleitung und Überblick

1.1 Überblick

Glatte Augenfolgebewegungen dienen dazu, ein sich bewegendes Objekt in der Fovea, der Region der größten Sehschärfe, zu stabilisieren. Glatte Augenfolgebewegungen sind schon seit langer Zeit Gegenstand ausgedehnter Forschungsaktivität im Bereich der visuellen Wahrnehmung. Doch während frühe Studien ihren Aufmerksamkeitsfokus hauptsächlich auf die Untersuchung von okulomotorischen oder mechanischen Aspekten der Augenfolgebewegung gerichtet haben, richtet sich seit einiger Zeit das Interesse mehr und mehr auf die Frage, wie die Wahrnehmung und die Verarbeitung von visuellen Informationen durch glatte Augenfolgebewegungen beeinflusst werden. An diesen Punkt anknüpfend beschäftigt sich die vorliegende Arbeit – wie der Titel bereits deutlich macht – daher mit dem visuellen Kurzzeitgedächtnis und mit visuellen Aufmerksamkeitsprozessen während glatter Augenfolgebewegungen.

Im Einzelnen wurde drei verschiedenen Fragestellungen nachgegangen. Erstens sollte untersucht werden, ob das visuelle Kurzzeitgedächtnis für die Position von Objekten während glatter Augenfolgebewegungen retinozentrisch oder räumlich organisiert ist und ob die Kapazität des visuellen Kurzzeitgedächtnisses für die Position oder die Farbe eines Objekts darunter leiden würde, wenn während der Darbietung zu erinnernder Items eine glatte Augenfolgebewegung durchzuführen ist. Zweitens sollte untersucht werden, wie visuelle Aufmerksamkeit während glatter Augenfolgebewegungen räumlich um den Zielreiz der Augenfolgebewegung verteilt ist. Visuelle Aufmerksamkeit wird dabei als die mentale Fähigkeit verstanden, verhaltensrelevante Stimuli unter verhaltensirrelevanten Stimuli auszuwählen. Stark vereinfacht formuliert, fördert visuelle Aufmerksamkeit also die Verarbeitung von bestimmten visuellen Informationen. Drittens wurden Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen untersucht. Hier

sollte überprüft werden, ob es möglich ist, die Aufmerksamkeit vom Zielreiz der glatten Augenfolgebewegung zu lösen und auf einen peripheren Reiz zu verlagern, ohne dabei den Blick vom Zielreiz der Augenfolgebewegung abzuwenden.

Bevor jedoch im empirischen Teil dieser Arbeit das experimentelle Vorgehen zur Beantwortung der drei verschiedenen Fragestellungen und die erzielten Ergebnisse dargestellt werden, sollen zunächst in einem einleitenden theoretischen Teil die drei zentralen Begriffe dieser Arbeit – Augen(folge)bewegungen, visuelles (Kurzzeit-)Gedächtnis und visuelle Aufmerksamkeit – allgemein erläutert werden. Im dann folgenden empirischen Teil der Arbeit werden in drei Kapiteln insgesamt 18 Experimente berichtet. Im ersten Kapitel wird in neun Experimenten das visuelle Kurzzeitgedächtnis während glatter Augenfolgebewegungen untersucht. Im zweiten Kapitel folgt ein Experiment, in dem darauf eingegangen wird, wie visuelle Aufmerksamkeit während glatter Augenfolgebewegungen verteilt ist. Im letzten Kapitel werden in acht Experimenten Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen untersucht. Jeder der drei Experimentalteile beginnt mit einer theoretischen Einleitung und der Darstellung der spezifischen Untersuchungsfragestellung und wird mit einer Diskussion beendet. In einer abschließenden Zusammenfassung werden die experimentellen Ergebnisse noch einmal kurz diskutiert.

1.2 Augenbewegungen

1.2.1 Aufgaben und Typen von Augenbewegungen

Auf der Netzhaut des Auges (Retina) gibt es zwei Arten von lichtsensitiven Rezeptoren, die farbsensitiven Zapfen und die helligkeitssensitiven Stäbchen. Der kleine zentrale Teil (etwa 1°) der Retina wird als Fovea bezeichnet. Die Fovea ist der Teil, in dem die höchste Dichte an Photorezeptoren erreicht wird. Aufgrund der Rezeptordichte ist die Fovea gleichbedeutend mit dem Ort der größtmöglichen visuellen Auflösung des Sehfeldes. In der Fovea sind ausschließlich Zapfen zu finden. Je weiter man sich von der Fovea entfernt, desto geringer

wird die Dichte der Zapfen. Da das gesamte Blickfeld eines Auges jedoch weit größer ist als der 1° große Bereich der Fovea, sind Augenbewegungen nötig, um stets ein scharfes Sehen zu ermöglichen. Das menschliche Auge ist in der Lage, eine Vielzahl unterschiedlicher Bewegungen auszuführen. Auf drei senkrecht zueinander stehenden Achsen, einer horizontalen, einer vertikalen und einer torsionalen Achse, kann das Auge Rotationen durchführen, die durch die Kontraktionen von insgesamt sechs extraokulären Muskeln verursacht werden. Diese Muskeln werden ihrerseits von Motoneuronen innerviert werden, die in den drei Motorkernen des Hirnstamms liegen. Da es in dieser Arbeit inhaltlich ausschließlich um horizontale und vertikale Augenbewegungen gehen soll, wird auf torsionale Bewegungen und die Interaktionen zwischen den drei Rotationsachsen, bekannt als Listings Gesetz, nicht näher eingegangen.

Augenbewegungen haben zwei Hauptfunktionen: Einerseits ermöglichen sie die Fixation von Objekten, die von Interesse sind, und damit eine Stabilisierung dieser Objekte auf der Fovea; andererseits dienen sie der visuellen Verfolgung von fixierten Objekten und halten diese Objekte damit auf der Fovea, wenn der Kopf bewegt wird oder sich das fixierte Objekt bewegt. Allgemein kann man also sagen, dass der Nutzen von Augenbewegungen somit in der Stabilisierung von selektierten Objekten auf der Fovea besteht.

Anfang des letzten Jahrhunderts schlug Dodge (1903) vor, Augenbewegungen in fünf unterschiedliche Arten zu unterteilen. Er differenzierte zwischen Fixation, Sakkaden, dem vestibulär okulären Reflex, dem optokinetischen Nystagmus und Vergenzbewegungen. Seither sind viele weitere Einteilungen von Augenbewegungen vorgeschlagen worden. Eine bis heute häufig anzutreffende Klassifizierung von Augenbewegungen ist die von Carpenter aus dem Jahre 1988: Er unterschied zwischen Augenbewegungen, die den Blick verlagern, Augenbewegungen, die den Blick auf einem Objekt halten (vestibuläre und optokinetische Bewegungen) und fixationalen Bewegungen (Drift und Tremor). Augenbewegungen, die den Blick verlagern, unterteilte er weiter in schnelle (Sakkaden, Mikrosakkaden und die schnelle Phase des Nystagmus) und langsame Bewegungen (glatte Augenfolgebewegungen [Smooth Pursuit] und Vergenzbewegungen). Darüber hinaus unterschied er noch die häufigste non-visuelle Augenbewegung, das Blinzeln.

Nachfolgend sollen die einzelnen Augenbewegungsarten kurz beschrieben werden (Carpenter, 1988; Ilg, 1997; Findlay und Gilchrist, 2003).

Vestibuläre und optokinetische Bewegungen

Vestibuläre Bewegungen sind Anpassungsbewegungen, die der anhaltenden Fixierung eines Punktes bei Kopf- und Körperbewegungen dienen. Man spricht hier auch vom vestibulär okulären Reflex (VOR). Die notwendigen Informationen werden durch Impulse von den Bogengängen des Innenohrs (Sitz des Gleichgewichtsorgans) erfasst und über die vestibulo-okulären Reflexbögen zum okulomotorischen Zentrum geleitet.

Bewegt sich nicht nur ein bestimmtes Objekt, sondern ein Großteil des Sehfeldes, dienen so genannte optokinetische Augenbewegungen zur Aufrechterhaltung eines stabilen Netzhautbildes. Bei schnellen Bewegungen zeigt sich eine typisch sägezahnförmige Bewegung, der Nystagmus. Das Auge bewegt sich zunächst in Bewegungsrichtung des bewegten Bildes, springt dann entgegen der Bewegungsrichtung des Bildes zurück und fixiert eine neue Position. Im schnellen Wechsel folgen also schnelle und langsame Augenbewegungen aufeinander.

Vergenzbewegungen

Unter Vergenzbewegungen versteht man die Rotation der beiden Augen nach innen oder außen. Die optischen Achsen der Augen werden dadurch so eingestellt, dass sie sich in etwa auf dem fixierten Objekt schneiden. Die retinalen Bilder der beiden Augen werden in Folge dessen fusioniert. Unter Konvergenz versteht man die Bewegung des Schnittpunktes der optischen Achsen der beiden Augen zur Nase hin, Divergenz ist die Bewegung des Schnittpunktes der optischen Achsen von der Nase weg.

Mikrobewegungen während der Fixation

Mikrobewegungen sind Augenbewegungen mit relativ geringer Amplitude und lassen sich unterteilen in Drift, Tremor und Mikrosakkaden. Wie andere Nervenzellen auch reagieren Photorezeptoren in erster Linie auf Veränderungen. Wird dem Auge über einen gewissen

Zeitraum ein Bild auf der gleichen Stelle der Retina dargeboten (indem z.B. die Augenmuskeln gelähmt werden), dann verschwindet aufgrund der Ermüdung der Rezeptoren das wahrgenommene Bild langsam. Der Drift bewirkt, dass sich die retinale Abbildung eines Objekts beständig um den Bereich mehrerer Photorezeptoren verschiebt. Dadurch trifft der Lichtreiz immer auf unterschiedliche Nervenzellen, und die Sensitivität gegenüber dem visuellen Reiz wird gewährleistet. Der Tremor oder „Mikro-Nystagmus“ verursacht ebenfalls eine Verschiebung der Netzhaut um einen Bereich von wenigen Sehzellen und wirkt damit wie der Drift der Rezeptorermüdung entgegen. Mikrosakkaden hingegen sollen den durch Drift und Tremor verursachten Verschiebungen entgegenwirken und durch eine entsprechende Korrektur zu einer erneuten Fixierung des Objektes von Interesse führen.

Sakkaden

Sakkaden sind schnelle, sprunghafte Augenbewegungen, die dazu dienen, einen neuen Teil des visuellen Feldes auf der Fovea abzubilden. Sie werden sowohl unwillkürlich, z.B. durch Bewegungsänderungen im peripheren Gesichtsfeld, als auch willkürlich, z.B. bei der gezielten Inspektion der Umwelt, ausgelöst. Etwa drei- bis viermal pro Sekunde vollführt der Mensch eine Sakkade. Sakkaden sind die einzigen willentlichen Augenbewegungen, deren Ausführung keines speziellen Trainings bedarf. Des Weiteren sind Sakkaden bemerkenswert stereotyp: Das Auge ist zunächst stationär und beginnt, zu einem bestimmten Zeitpunkt zu beschleunigen. Schließlich erreicht es seine maximale Geschwindigkeit und bremst dann schnell ab, um in seiner neuen Position zum Stillstand zu kommen. Die Stereotypizität von Sakkaden wird dadurch deutlich, dass immer, wenn eine Sakkade gleicher Amplitude ausgeführt wird, sie stets der gleichen Trajektorie (oder zumindest einer sehr ähnlichen) folgt.

Sakkaden sind so schnell, dass in der Regel keine Zeit für ein visuelles Feedback besteht, das das Auge zu seiner neuen Position führen könnte. Abgesehen von sehr großen Sakkaden ist die Verzögerung einer visuellen Feedback-Schleife länger als die Dauer der Bewegung selbst. Das System für die Steuerung von Sakkaden muss daher schon im Vorfeld das Muster für die Muskelaktivierung berechnen, die das Auge in die gewünschte Position bringt. Das bedeutet, dass Sakkaden ballistische Bewegungen sind und zwar derart, dass eine

Veränderung des Targets, die während der Ausführung der Sakkade auftritt, die Trajektorie der Sakkaden nicht verändern kann. Für große Amplituden können Sakkaden eine Geschwindigkeit von 700°/s erreichen. Des Weiteren ist die Dauer der gesamten Bewegung nicht konstant, sondern nimmt mit wachsender Amplitude zu (Abbildung 1.1).

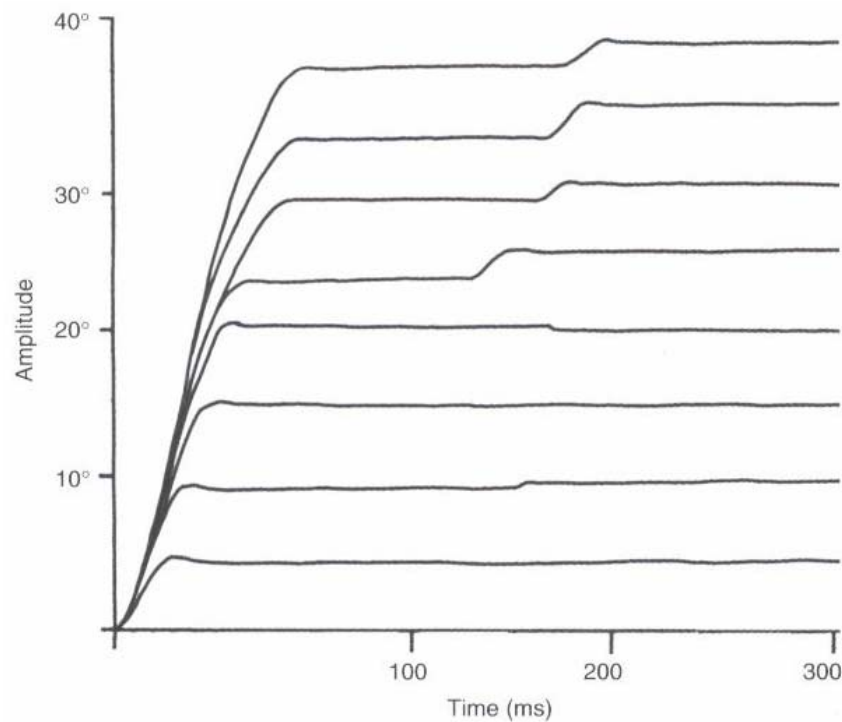


Abbildung 1.1 Zeitlicher Verlauf (Time (ms)) von horizontalen sakkadischen Augenbewegungen unterschiedlich großer Amplituden (aus Carpenter, 1988).

Dauer und Geschwindigkeit einer Sakkade hängen von ihrer Amplitude ab. Die Dauer einer Sakkade wird mittels der Formel

$$T_S = 2.2A_S + 21$$

beschrieben, wobei T_S die Dauer der Sakkade in Millisekunden ist und A_S die Amplitude der Sakkade in Grad. Dieser Zusammenhang ist auch unter dem Begriff „Main sequence“ bekannt. Da das okulomotorische System ein biologisches ist, das durch größere Variabilität gekennzeichnet ist als ein mechanisches, können bisweilen auch Sakkaden auftreten, die langsamer sind als die Main sequence, etwa bei Müdigkeit und unter dem Einfluss von Drogen. Diese Eigenschaften teilen die schnelle Phase des Nystagmus und Mikrosakkaden

übrigens mit gewöhnlichen Sakkaden, so dass man davon ausgehen kann, dass es sich bei diesen Formen von Bewegungen nicht um essentiell unterschiedliche Augenbewegungen handelt.

Die Komplexität der Berechnungen, die nötig sind, um retinale Distanzen in Augenbewegungen zu übersetzen, spiegeln sich in relativ langen Reaktionszeiten wider, die mit der Initiierung einer Sakkade assoziiert sind. Sakkadische Latenzen erstrecken sich über einen Zeitraum von 120 bis 350 ms, sind jedoch auch vom verwendeten Aufgabentyp abhängig. Ein anderer Punkt, der die Latenz von Sakkaden beeinflusst, ist die sakkadische Refraktärzeit: Eine zweite Sakkade kann einer ersten Sakkade erst nach Ablauf eines Intervalls von 180 ms folgen. Die Beendigung einer sakkadischen Trajektorie ist häufig durch ein dynamisches Überschießen (dynamic overshoot) gekennzeichnet; dabei schießt das Auge über die finale Position hinaus. Außerdem beobachtet man häufig, dass das Auge am Ende einer Sakkade nicht völlig zum Stillstand kommt, sondern eine kontinuierliche langsame Bewegung zeigt. Dieses als post-sakkadischer Drift bezeichnete Phänomen macht deutlich, dass es sich beim Stabilisieren des Blicks am Ende der Sakkade um einen aktiven Prozess handelt.

Ein weiteres Phänomen, das bei der Beschreibung von Sakkaden zu berichten ist, ist das der so genannten sakkadischen Suppression. Sakkaden stellen insofern ein Problem für die visuelle Wahrnehmung dar, als dass das Ziel der Wahrnehmung die Erstellung einer stabilen mentalen Repräsentation der visuellen Welt ist; mit jeder Sakkade wird jedoch ein anderer Teil des visuellen Feldes auf der Retina abgebildet. Das visuelle System löst dieses Problem durch die Erhöhung visueller Wahrnehmungsschwellen für verschiedenste visuelle Stimuli (klassischerweise wurde die Wahrnehmungsleistung für aufgeblitzte Lichter getestet) während des zeitlichen Verlaufs einer Sakkade, so dass etwa 30 bis 40 ms vor und bis zu 120 ms nach dem Start einer Sakkade die Wahrnehmung drastisch eingeschränkt ist. Unter sakkadischer Suppression versteht man daher die Wahrnehmungseinschränkung während einer Sakkade.

Glatte Augenfolgebewegungen

Während optokinetische Bewegungen dazu dienen, das gesamte retinale Bild bei Bewegungen von Kopf und Körper stabil zu halten, dienen glatte Augenfolgebewegungen (Abbildung 1.2) dazu, ein sich bewegendes Objekt auf der räumlich hochauflösenden Fovea zu stabilisieren. Optokinetische Augenbewegungen sind demnach bei allen Lebewesen mit beweglichen Augen zu finden, während glatte Augenfolgebewegungen nur bei Tieren mit einem kleinen zentralen retinalen Bereich anzutreffen sind.

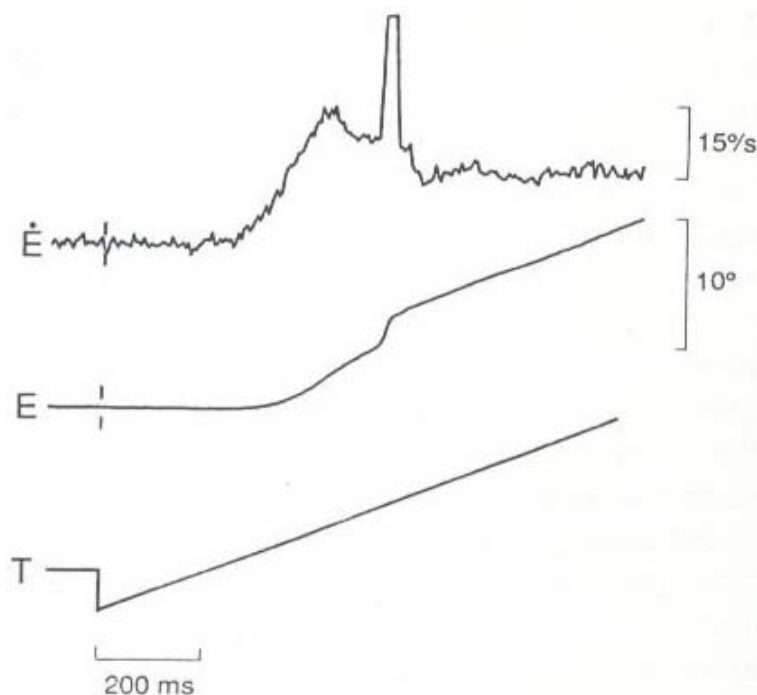


Abbildung 1.2 Eine glatte Augenfolgebewegung als Antwort auf einen sich nach einer Step-ramp-Prozedur bewegenden Stimulus. Dargestellt sind die Geschwindigkeit des Auges ($\dot{E}$), die Position des Auges (E) und die Position des Targets (T) (aus Wyatt et al., 1994).

Die Stabilisierung eines visuellen Stimulus während glatter Augenfolgebewegungen auf der Fovea wird dadurch gewährleistet, dass das Auge mit annähernd der gleichen Geschwindigkeit bewegt wird, wie das sich bewegende Objekt von Interesse. Im Gegensatz zu Sakkaden, die ein Objekt aus der Peripherie in die Fovea hinein bringen, sind glatte Augenfolgebewegungen kontinuierlich und können über eine variable Zeitdauer (im Bereich

von mehreren Sekunden oder gar Minuten) hinweg aufrechterhalten werden. Die Geschwindigkeit von glatten Augenfolgebewegungen ist typischerweise kleiner als $30^\circ/\text{s}$, kann aber bei geübten Versuchspersonen $80^\circ/\text{s}$ erreichen (Meyer, Lasker und Robinson, 1985). Glatte Augenfolgebewegungen können nicht willentlich produziert werden (Becker und Fuchs, 1985), d.h. für die Durchführung von glatten Augenfolgebewegungen ist ein sich bewegendes Zielreiz nötig. Dieser Zielreiz muss allerdings nicht notwendigerweise genau auf der Fovea abgebildet werden, wie Studien mit extra- bzw. parafovealen Reizen zeigen (z.B. Wyatt et al., 1994). Um eine glatte Augenfolgebewegung zu initiieren, wird zumeist mit einer Latenz von ca. 100 ms eine langsame Blickbewegung in die Bewegungsrichtung des Zielreizes ausgeführt. Eine genauere Betrachtung der ersten 100 ms der Phase der Initiierung einer glatten Augenfolgebewegung zeigt, dass die anfängliche Pursuit-Antwort eigentlich aus zwei Komponenten besteht (Lisberger und Westbrook, 1985): Die erste Komponente umfasst etwa 20 ms. In diesen 20 ms beschleunigt das Auge in die richtige Richtung, aber es wird keine Anpassung der Augengeschwindigkeit an die des Zielreizes beobachtet. Diese Adjustierung der Augengeschwindigkeit ist Teil der zweiten, späteren Komponente (20 bis 100 ms).

Glatte Augenfolgebewegungen können auf allen Meridianen ausgeführt werden, am glattesten ist die Folgebewegung jedoch in der Horizontalen (Collewijn und Tamminga, 1984). Baloh, Yee, Honrubia und Jacobson (1988) fanden signifikante Unterschiede zwischen horizontalen und vertikalen sinusförmigen Augenfolgebewegungen. Der Gain (= Geschwindigkeit des Auges / Geschwindigkeit der Reizes der Augenfolgebewegung) von horizontalen Augenfolgebewegungen war signifikant höher als der von vertikalen Augenfolgebewegungen. Die Gründe für diese Asymmetrien sind noch nicht eindeutig geklärt. Möglicherweise werden horizontale und vertikale glatte Augenfolgebewegungen durch unterschiedliche Schaltkreise im Gehirn gesteuert.

Wie die Augenfolgebewegungsleistung vom Hintergrund abhängt, vor dem sie stattfindet, scheint bisher nur zum Teil geklärt. Die Geschwindigkeit einer glatten Augenfolgebewegung, die beispielsweise vor einem stationären Hintergrund ausgeführt wird, ist nur wenig reduziert, während der wachsende Positionsfehler (siehe Abschnitt zur

Steuerung von glatten Augenfolgebewegungen) durch die vermehrte Ausführung von Sakkaden korrigiert wird (Collewyn und Tamminga, 1984). Wenn sich hingegen der Hintergrund zusammen mit dem Target der glatten Augenfolgebewegung bewegt, ist der Zusammenhang weniger eindeutig (siehe für eine Übersicht Ilg, 1997).

Beobachtungen, die dafür sprechen, dass die Ausführung von glatten Augenfolgebewegungen einerseits von der Verarbeitung lokaler Bewegung, andererseits aber auch von der internen Repräsentation der Trajektorie des Zielreizes im Raum abhängig ist, werden bei Carpenter (1988) und Ilg (1997) erläutert.

Unter natürlichen Bedingungen werden Sakkaden und glatte Augenfolgebewegungen gemeinsam eingesetzt, um ein Objekt visuell zu verfolgen (Lisberger et al. 1987). Dabei werden Sakkaden, die während einer glatten Augenfolgebewegung auftreten, auch als Catch up-Sakkaden bezeichnet (de Brouwer et al., 2001; van Gelder et al., 1995). Catch up-Sakkaden treten insbesondere bei unvorhersehbaren Änderungen der Trajektorie oder höheren Geschwindigkeiten ($> 30^\circ/\text{s}$) des Zielreizes der Augenfolgebewegung auf. Wahrscheinlich hat ihr Auftreten mit den höheren möglichen Geschwindigkeiten von Sakkaden im Vergleich zu glatten Augenfolgebewegungen zu tun. In natürlichen Situationen werden neben Augenbewegungen aber auch Kopfbewegungen eingesetzt, um Objekte visuell zu verfolgen. Bei höheren Geschwindigkeiten des Folgebewegungsziels ($> 40^\circ/\text{s}$) können zusätzliche Kopfbewegungen z.B. den Gain einer glatten Augenfolgebewegung verbessern.

1.2.2 Steuerung von glatten Augenfolgebewegungen

Wie glatte Augenfolgebewegungen überhaupt gesteuert bzw. welche Informationen dazu herangezogen werden, wird kontrovers diskutiert. Schon früh wurde in Betracht gezogen, dass eine wesentliche Informationsquelle für die Steuerung von glatten Augenfolgebewegungen die retinale Geschwindigkeit des Zielreizes der Augenfolgebewegung ist (Rashbass, 1961; Robinson, 1965). Dabei wird die retinale Geschwindigkeit als die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Auges und der Geschwindigkeit des Folgebewegungsziels definiert. Ziel

des Augenfolgebewegungssystems ist es, diese Differenz möglichst gering zu halten, um so die Geschwindigkeit der Augenbewegung an die des Ziels der Augenfolgebewegung anzupassen. Andere Forscher sind hingegen der Ansicht, dass es die Position des Zielreizes der Augenfolgebewegung relativ zur Fovea sei, die für die Steuerung der Augenfolgebewegung entscheidend ist (Pola und Wyatt, 1980; Morris und Lisberger, 1987; Pola und Wyatt, 2001). Wieder andere nehmen an, dass auch die retinale Beschleunigung des Zielreizes der Augenfolgebewegung wichtig sei (Lisberger, Evinger, Johanson und Fuchs, 1981; Krauzlis und Lisberger, 1994; Churchland und Lisberger, 2001).

So wie Pola und Wyatt (1991) das System zur Steuerung von glatten Augenfolgebewegungen auffassen, handelt es sich dabei um ein negatives Rückkopplungssystem mit der Zielreizbewegung als Eingangssignal und der Augenbewegung als Ausgangssignal. Ein solches System wird auch als geschlossenes (oder closed-loop) System bezeichnet. Im Gegensatz dazu stehen offene (oder open-loop) Systeme, bei denen das Feedback des Systems experimentell ausgeschaltet wird.

1.2.3 Physiologie von Augenfolgebewegungen

Die neurophysiologischen Substrate, die für glatte Augenfolgebewegungen von Relevanz sind, sind über das gesamte Gehirn verteilt (für eine Übersicht siehe Keller und Heinen, 1991; Krauzlis und Stone, 1999). In diesem Zusammenhang machen Arbeiten wie etwa die von Krauzlis und Stone (1999) deutlich, wie komplex das der Steuerung von Blickbewegungen (Sakkaden wie auch glatter Augenfolgebewegungen) zugrunde liegende neurophysiologische Netzwerk ist.

Stark vereinfacht kann man zunächst festhalten, dass die visuellen Signale von der Retina über den Thalamus ins Vorderhirn projiziert werden. Nach einer Rückprojektion zum Mittelhirn werden sie über die Pons ins Cerebellum weitergeleitet. Von dort aus gelangen die Signale schließlich über die Medulla oblongata wieder zurück zu den Augenmuskeln.

Aufgrund von Beobachtungen an Patienten mit Hirnstammläsionen (Hanson, Hamid, Tomsak, Chou und Leigh, 1986) wurde lange angenommen, dass die Steuerung von glatten

Augenfolgebewegungen und Sakkaden von weitgehend unabhängigen Hirnstrukturen bewerkstelligt wird. Überlappungen zwischen den beiden Verarbeitungssystemen für glatte Augenfolgebewegungen und Sakkaden wurden nur auf frühen Stufen des visuellen Pfades, z.B. auf der Retina, dem Corpus geniculatum laterale (CGL) und dem primären visuellen Kortex (V1), und auf späten Stufen der okulomotorischen Verarbeitung angenommen, z.B. im Nucleus prepositus hypoglossi und den Motoneuronen (Krauzlis und Stone, 1999).

Der konventionelle Pfad des Systems zur Verarbeitung und Steuerung von glatten Augenfolgebewegungen (Abbildung 1.3) beginnt mit Area MT (mediale temporale Area) und Area MST (mediale superiore temporale Area), die das System mit Bewegungssignalen des Zielreizes versorgen (diese Bewegungssignale wiederum leiten die glatte Augenfolgebewegung). Von dort aus laufen Projektionen in die Pons (PN); die Pons projiziert weiter zum Cerebellum, das den ventralen Paraflocculus beinhaltet. Der ventrale Paraflocculus (VPF) steuert die glatte Augenfolgebewegung über seine Projektionen zum vestibulären Nucleus (VN), der seinerseits direkten Zugang zu den Motoneuronen hat (Krauzlis und Stone, 1999).

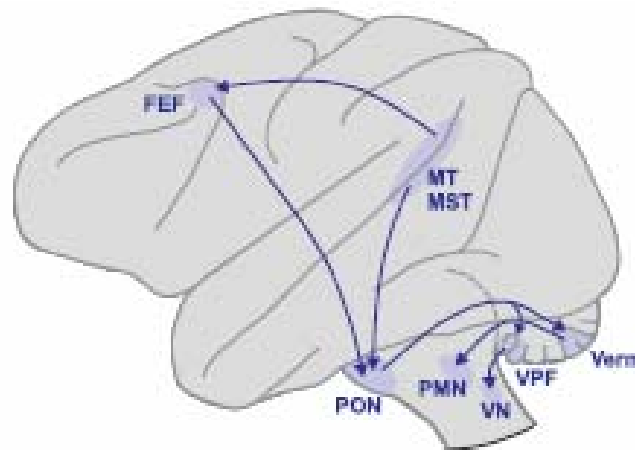


Abbildung 1.3 Konventioneller Pfad des Systems zur Steuerung glatter Augenfolgebewegungen. Das Diagramm stellt die seitliche Sicht auf das Gehirn eines Affens dar. Schattierte Regionen stellen spezifische Gebiete im cerebralen Kortex, im Cerebellum und im Hirnstamm dar; Pfeile zeigen die anatomischen Verbindungen zwischen den Gebieten an (siehe auch Abbildung 1.4) (aus Krauzlis, 2004).

Der konventionelle Pfad des Systems zur Verarbeitung und Steuerung von sakkadischen Augenbewegungen (Abbildung 1.4) beinhaltet die frontalen Augenfelder (FEF – „frontal eye fields“) und Area LIP (laterale interparietale Area) des cerebralen Kortex, die Basalganglien (z.B. den Nucleus caudatus und die Substantia nigra) und den superiores Colliculus (SC). Diese Regionen interagieren miteinander, um die prämotorischen Schaltkreise im Hirnstamm mit den nötigen Positionssignalen des Zielreizes zu versorgen. Diese prämotorischen Schaltkreise enthalten die paramediane pontine Formatio reticularis (PPRF) und den rostralen interstitiellen Kern des medialen longitudinalen Fasciculus (riMLF), der wiederum zu den Motoneuronen projiziert (Krauzlis und Stone, 1999).

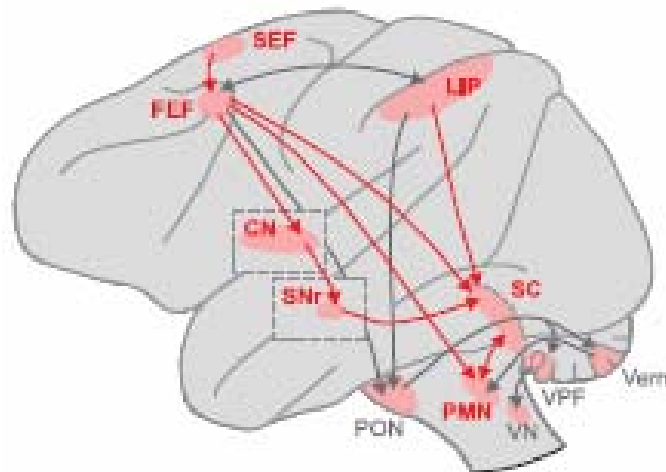


Abbildung 1.4 Konventioneller Pfad des Systems zur Steuerung von Sakkaden. Das Diagramm stellt die seitliche Sicht auf das Gehirn eines Affens dar. Schattierte Regionen stellen spezifische Gebiete im cerebralen Kortex, im Cerebellum und im Hirnstamm dar; Pfeile zeigen die anatomischen Verbindungen zwischen den Gebieten an. Abkürzungen: FEF = frontale Augenfelder; SEF = supplementäres Augenfeld; LIP = laterale interparietale Area; MT = mediale temporale Area; MST = mediale superiore temporale Area; PON = Nucleus pontis; CN = Nucleus caudatus; SNr = Substantia nigra; SC = superiorer Colliculus; VN = vestibuläre Nuclei; Verm = Vermis; PMN = prämotorische Nuclei; VPF = ventraler Paraflocculus (aus Krauzlis, 2004).

Es existieren jedoch einige Befunde, die diese strikte Trennung zwischen einem Verarbeitungspfad für glatte Augenfolgebewegungen einerseits und einem Pfad für Sakkaden

andererseits zweifelhaft erscheinen lassen (Krauzlis und Stone, 1999). An dieser Stelle sei nur auf einen solchen Befund eingegangen, weil er weiter oben schon erwähnt wurde: Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse von Läsionsstudien zeigt, dass kleine Hirnstammläsionen zu Defiziten bei großen Sakkaden führen, glatte Augenfolgebewegungen und kleine Sakkaden hingegen weitgehend unbeeinträchtigt bleiben (siehe oben: Hanson, Hamid, Tomsak, Chou und Leigh, 1986). Größere Läsionen, die aber immer noch auf die paramediane pontine *Formatio reticularis* (PPRF) beschränkt sind, beeinträchtigen sowohl Sakkaden als auch glatte Augenfolgebewegungen (Bogousslavsky und Meienberg, 1987). Die Ergebnisse dieser Experimente liefern einen Hinweis auf die funktionelle Überschneidung von glatten Augenfolgebewegungen und Sakkaden.

Krauzlis (2004) legt neuerdings nahe, dass glatte Augenfolgebewegungen nicht hauptsächlich durch Regionen im extrastriären Kortex gesteuert werden, die auf die Verarbeitung visueller Bewegung spezialisiert sind (Area MT und Area MST), sondern vielmehr durch ein ausgedehntes Netzwerk kortikaler Regionen, wobei innerhalb dieser die pursuit-zugehörige Region in den frontalen Augenfeldern (FEF) scheinbar den direktesten Einfluss hat. Der traditionelle Weg durch das Cerebellum ist wichtig, es existieren aber auch Pfade, die Strukturen beinhalten, die mit der Steuerung von Sakkaden assoziiert sind, wie z.B. die Basalganglien und der superiore Colliculus (SC). Die Ergebnisse lassen vermuten, dass das Pursuit-System einen dem Sakkaden-System sehr ähnlichen funktionalen Aufbau hat.

1.3 Visuelle Aufmerksamkeit

Unsere visuelle Umwelt ist übervoll an Reizen und Objekten. Dennoch ist man sich zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eines gewissen Teils dieser Informationen bewusst. Reize oder Objekte, denen Aufmerksamkeit geschenkt wird, werden gegenüber unbeachteten Reizen oder Objekten besser (bzw. leichter) verarbeitet (für einen Überblick über visuelle Aufmerksamkeit siehe Pashler, 1998).

Einem visuellen Reiz kann grundsätzlich auf zwei Arten Aufmerksamkeit geschenkt werden: Einerseits kann der Reiz oder das Objekt mit Hilfe von Augenbewegungen auf der Fovea abgebildet werden, andererseits kann Aufmerksamkeit aber auch ohne Augenbewegungen auf ein Objekt gerichtet werden. Von *overt* oder *offener* Aufmerksamkeit spricht man, wenn die Aufmerksamkeitszuwendung mittels Augenbewegungen erfolgt. Erfolgt sie ohne Augenbewegungen spricht man von *covert* oder *verdeckter* Aufmerksamkeit (Posner, 1980).

In einer Serie von Experimenten konnte Posner (1980; Posner et al., 1980) zeigen, dass Reaktionszeiten auf die Präsentation eines visuellen Reizes schneller waren für Orte, die zuvor mit einem Hinweisreiz versehen worden waren (Abbildung 1.5).

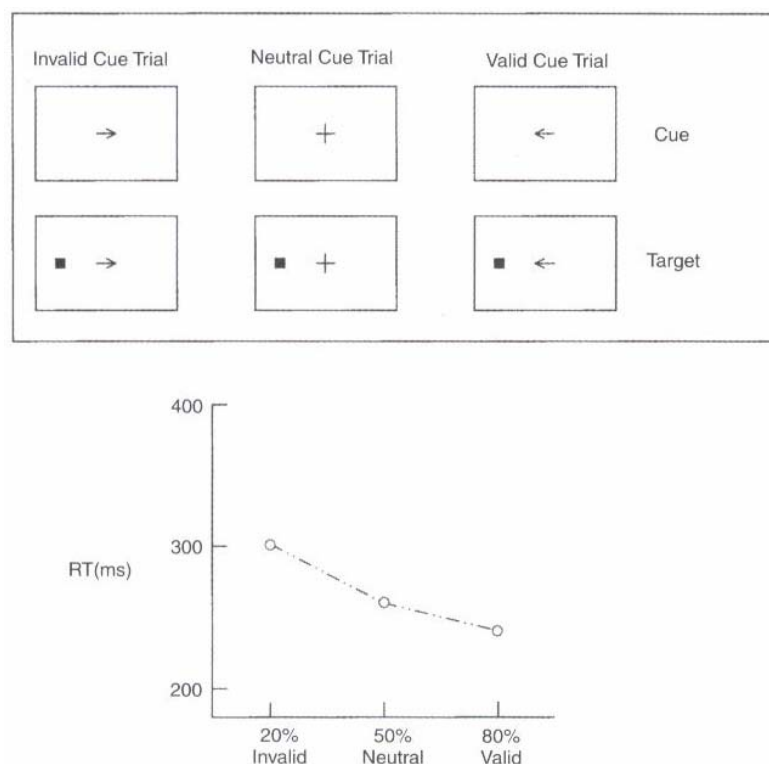


Abbildung 1.5 Posners Cueing-Paradigma. In der oberen Hälfte der Abbildung ist die Abfolge der experimentellen Displays für die drei Typen von Trials dargestellt. In der unteren Hälfte der Abbildung sind die typischen Ergebnisse eines Cueing-Experiments dargestellt. In validen Durchgängen reagieren die Probanden schneller als in neutralen und invaliden Durchgängen, in invaliden Trials reagieren sie langsamer als in validen und neutralen Durchgängen. Weitere Erläuterungen finden sich im Text (aus Findlay und Gilchrist, 2003).

Üblicherweise wurden die Probanden in seinen Experimenten instruiert, einen zentralen Fixationspunkt zu fixieren. Nach einiger Zeit erschien am Fixationspunkt als Hinweisreiz (Cue) ein Pfeil, der in die mögliche Richtung eines nachfolgend präsentierten Zielreizes (Target) deutete. In der Mehrzahl der Experimentaldurchgänge (Trials) zeigte der Pfeil den Ort des späteren Zielreizes zuverlässig an. Solche Durchgänge bezeichnete Posner als valide Durchgänge. In der Minderzahl der Durchgänge, den so genannten invaliden Durchgängen, erschien der Zielreiz an dem Ort, der gegenüber der Position lag, auf die durch den Pfeil hingewiesen wurde. Zusätzlich gab es neutrale Durchgänge, in denen kein Hinweisreiz präsentiert wurde. Die Aufgabe der Probanden war es, so schnell wie möglich nach Erscheinen des Targets eine Taste zu drücken. Indem Posner die Reaktionszeiten über diese drei Bedingungen hinweg miteinander verglich, war er in der Lage, die Kosten und den Gewinn von räumlichen Hinweisreizen zu analysieren. Im Vergleich zu neutralen Durchgängen führten valide Durchgänge zu kürzeren Reaktionszeiten, invalide zu längeren Reaktionszeiten. Diese Ergebnisse zeigen, dass Vorabinformationen über den möglichen Präsentationsort eines Zielreizes einen Gewinn mit sich bringen (falsche Informationen sind hingegen mit Kosten verbunden), auch wenn die Augen nicht bewegt werden, also bei coverten Aufmerksamkeitsverlagerungen.

1984 zeigten Posner und Cohen für längere zeitliche Intervalle zwischen der Präsentation von Hinweisreiz und Zielreiz, dass Kosten (bezogen wieder auf die Reaktionszeiten) mit dem durch den Hinweisreiz angezeigten Ort verbunden sind. Dieses Phänomen bezeichneten sie als „Inhibition of return“. Posner und Cohen (1984) argumentierten, dass dieses Phänomen einen Prozess widerspiegele, der die Aufmerksamkeit aktiv daran hindere, zu einem zuvor bereits beachteten Ort zurückzukehren.

Nun soll ein Modell dargestellt werden, das versucht, die eben beschriebenen Effekte einer erleichterten Verarbeitung von Reizen infolge verdeckter Aufmerksamkeit zu erklären (Findlay und Gilchrist, 2003):

Die Spotlight-Theorie der Aufmerksamkeit

Posner und Kollegen erklärten ihre Ergebnisse so, dass die beobachteten Kosten und der beobachtete Gewinn verdeckter Aufmerksamkeit aus dem Vorhandensein eines räumlichen Aufmerksamkeitsmechanismus resultieren, der am besten als eine Art „Scheinwerfer“ konzeptualisiert werden kann. Der Scheinwerfer ist räumlich lokalisiert und bewegt sich über die visuelle Szene, um in einem gewissen Teil der Szene eine erleichterte Verarbeitung zu ermöglichen. Ein Gewinn entsteht dann, wenn der Scheinwerfer auf den Zielreiz leuchtet, Kosten, wenn er auf den inkorrekten Ort scheint. Wenn einem Ort Aufmerksamkeit zugewendet wird, besetzt der Scheinwerfer diesen Ort. Um einem neuen Ort Aufmerksamkeit zu schenken, muss sich der Scheinwerfer vom aktuellen Ort lösen, sich über die Szene bewegen und anschließend den neuen Ort besetzen. Diese Abfolge von Lösen und Besetzen charakterisiert die Aktivität des Aufmerksamkeitssystems.

Wenn also ein Hinweisreiz erscheint, wird die Aufmerksamkeit vom zentralen Fixationspunkt gelöst und bewegt sich hin zum vom Hinweisreiz angezeigten Ort. Wenn der Hinweisreiz valide ist, erfolgt die Entdeckung des Zielreizes. Wenn der Hinweisreiz hingegen invalide ist, muss die Aufmerksamkeit zunächst vom Ort gelöst werden, der vom Hinweisreiz angezeigt wurde, und sich über die Szene zum Zielreiz bewegen. Dieser zusätzliche Prozess benötigt Zeit und führt zu den Kosten bei invaliden Durchgängen. Diese Theorie wurde durch Patientenstudien unterstützt. So haben beispielsweise Patienten mit einer Schädigung des Parietallappens ein Defizit beim Lösen der Aufmerksamkeit von einem Ort (Posner et al., 1984).

Eine weitere Theorie, die im Zusammenhang mit der Spotlight-Theorie häufig genannt wird und ihr ähnlich ist, ist die Zoom lens-Theorie der Aufmerksamkeit (Eriksen und St James, 1986). Diese Theorie, auf die allerdings nicht näher eingegangen werden soll, nimmt an, dass Aufmerksamkeit über ein variables Gebiet verteilt werden kann (Aufmerksamkeit im Sinne der Spotlight-Theorie hat hingegen eine fixe räumliche Ausdehnung).

Insgesamt gibt es unzählige Befunde, die dafür sprechen, dass es möglich ist, seine Aufmerksamkeit verdeckt zu verlagern, ohne dabei seine Augen zu bewegen. Ein Problem

besteht allerdings darin, dass die Größe der Effekte, die mit verdeckter Aufmerksamkeit einhergehen, relativ klein ist; oft beträgt der Reaktionszeitvorteil nicht mehr als 40 ms. In Anbetracht dieser Beobachtungen und der Tatsache, dass der Mensch jede Sekunde etwa drei bis vier Sakkaden macht, erscheint ein Zusammenwirken von verdeckter Aufmerksamkeit und Augenbewegungen viel wahrscheinlicher als die Annahme, dass Aufmerksamkeitsverlagerungen entweder verdeckt oder offen (also mit dem Einhergehen von sakkadischen Augenbewegungen) stattfinden. Im folgenden Abschnitt sollen daher drei verschiedene Ansätze skizziert werden, die alle eine andere Antwort auf die Frage geben, welche Rolle verdeckte Aufmerksamkeit hat, wenn Augenbewegungen „erlaubt“ sind bzw. inwieweit verdeckte Aufmerksamkeit und sakkadische Augenbewegungen zusammenhängen (Findlay und Gilchrist, 2003).

Kleins Independence-Ansatz

Klein (1980) nimmt an, dass die Programmierung von Sakkaden und verdeckte Aufmerksamkeit zwei unabhängige Prozesse seien, die nebeneinander aufträten. Wenn Sakkaden-Programmierung und verdeckte Aufmerksamkeit nämlich miteinander verzahnt wären, dann sollte, wenn ein Proband seine Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Ort lenkt, eine Sakkade zu diesem Ort erleichtert sein. Gleichzeitig sollte die visuelle Verarbeitung an dem Ort erleichtert sein, zu dem die nächste Sakkade ausgeführt werden soll. Klein fand für keine der beiden Annahmen Beweise. Kleins Ergebnisse sind jedoch strittig, seit eine Anzahl nachfolgender Studien Hinweise für eine Kopplung von verdeckter Aufmerksamkeit und Sakkaden-Programmierung gefunden hat (Shepherd et al., 1986; Hoffman und Subramaniam, 1995; Kowler, Anderson, Doshier und Blaser, 1995; Deubel und Schneider, 1996).

Hendersons Sequential attentional model

Henderson (1992) entwickelte das Sequential attentional model, welches eine enge Beziehung zwischen offener (Sakkaden) und verdeckter Aufmerksamkeit annimmt. In diesem Modell übernimmt verdeckte Aufmerksamkeit eine leitende oder weisende Funktion: Sie kann einem bestimmten Ort zugewendet werden, ohne dass zu diesem Ort notwendigerweise eine Sakkade

ausgeführt werden muss. Andererseits geht der Ausführung einer Sakkade jedoch stets eine verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerung voraus. Frühe Befunde, die für dieses Modell sprechen, stammen z.B. von Shepherd et al., 1986.

Premotor theory of attention

Rizzolatti und Kollegen (Rizzolatti et al., 1987b) nahmen an, dass eine starke Verbindung zwischen Sakkaden und verdeckten Aufmerksamkeitsverlagerungen existiert. Effekte verdeckter Aufmerksamkeit sind ihrer Ansicht nach das Ergebnis der Aktivität innerhalb des motorischen Systems, das für die Generierung von Sakkaden verantwortlich ist. Derartige räumliche Verarbeitungsvorteile, wie sie Posner (1980) berichtet hat, treten als Konsequenz eines sich auf die Generierung der nächsten Sakkade vorbereitenden motorischen Systems auf. In diesem Modell ist Aufmerksamkeit also schlichtweg ein Nebenprodukt der Aktionen des motorischen Systems.

Es gibt zwei experimentelle Befunde, die die Premotor theory of attention stark stützen, in der also Phänomene verdeckter räumlicher Aufmerksamkeit das Resultat der Verarbeitung innerhalb des motorischen Systems (verantwortlich für offene Aufmerksamkeitsverlagerungen) sind: Ein Hinweis kommt aus Studien von Sheliga et al. (1995a) zur Untersuchung von sakkadischen Trajektorie (Abbildung 1.6). In diesen Experimenten sollten die Probanden eine vertikale Sakkade nach unten zu einer Box hin ausführen als Antwort auf das Erscheinen eines Hinweisreizes in einer horizontalen Reihe von Boxen (präsentiert oberhalb des Fixationskreuzes). Gemessen wurde die Trajektorie der ausgeführten Sakkaden. Diese Messung zeigte eine Abweichung der Trajektorie in entgegengesetzter Richtung zum horizontalen Darbietungsort des Hinweisreizes. Die Verteilung der verdeckten Aufmerksamkeit hat also einen direkten räumlichen Effekt auf die motorische Antwort. Solch eine direkte Interaktion zwischen dem Ort der verdeckten Aufmerksamkeitszuwendung und der Trajektorie einer Sakkade unterstützt die Annahmen der Premotor theory of attention.

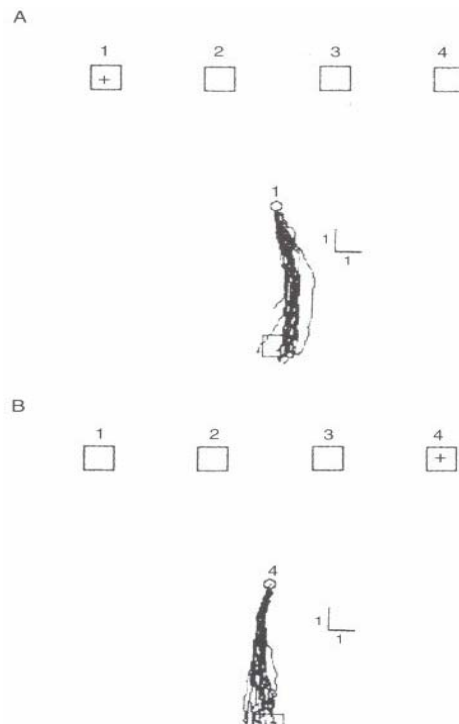


Abbildung 1.6 Der Einfluss verdeckter Aufmerksamkeit auf sakkadische Trajektorien. Weitere Erläuterungen finden sich im Text (aus Rizzolatti et al., 1994).

Einen weiteren Hinweis lieferten Rizzolatti et al. (1987b) selbst. Sie zeigten, dass die Reaktionszeiten in Experimenten wie denen von Posner (1980) in den invaliden Durchgängen am langsamsten waren, wenn der invalide Hinweisreiz im Vergleich zum Zielreiz in einem anderen Quadranten präsentiert wurde. Es scheint, dass das Überschreiten des horizontalen oder vertikalen Meridians mit zusätzlichen Kosten verbunden ist (dieses Phänomen ist auch bekannt unter dem Namen „Meridian crossing effect“). Wenn die erleichterte Verarbeitung durch verdeckte Aufmerksamkeit – wie angenommen – eine Konsequenz der Bewegungsplanung ist, dann sollten die Kosten einer Aufmerksamkeitsverlagerung abhängig vom Ausmaß der Neuprogrammierung sein, die vorgenommen werden muss, um die Aufmerksamkeit auf einen neuen Ort zu lenken. Da eine Neuprogrammierung zu einem anderen Quadranten tatsächlich aufwendiger ist als eine Neuprogrammierung innerhalb eines Quadranten, spricht auch dieser Befund für die Premotor theory of attention.

Wie eng jedoch verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen und sakkadische Augenbewegungen tatsächlich miteinander verbunden sind, zeigen einige Studien neueren Datums, die bereits im Zusammenhang mit der Beschreibung von Kleins strittigem Independence-Ansatz angeführt wurden. Während Klein annimmt, dass verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen und die Programmierung von Sakkaden zwei voneinander unabhängige Prozesse sind, konnten Shepherd et al. (1986), Hoffman und Subramaniam (1995) und Kowler et al. (1995) in ihren Experimenten nachweisen, dass diese beiden Prozesse (verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen und die Programmierung von Sakkaden) aneinander gekoppelt sind: Eine Trennung zwischen visueller Aufmerksamkeit und dem Prozess, der bei der Auswahl eines Sakkaden-Targets stattfindet, ist nicht möglich. Die experimentellen Befunde von Schneider und Deubel (1996) deuten sogar darauf hin, dass die Kopplung von Sakkadenprogrammierung und visueller Aufmerksamkeit an ein gemeinsames Zielobjekt eine obligatorische und selektive ist.

In welcher Beziehung allerdings verdeckte Aufmerksamkeit und glatte Augenfolgebewegungen zueinander stehen, ist aufgrund mangelnder Forschungsergebnisse aus diesem Bereich bisher völlig offen. Khurana und Kowler (1987) konnten in ihren Untersuchungen zwar darlegen, dass während glatter Augenfolgebewegungen die visuelle Aufmerksamkeit an das Target der Augenfolgebewegung gebunden ist, aber ob Probanden während Pursuit eventuell ihre Aufmerksamkeit auf den Präsentationsort eines Cues, wie ihn Posner (1980) verwendet hat, verlagern können, ist unklar. Ein Anliegen der vorliegenden Arbeit war es deshalb, diesen Punkt zu untersuchen. In einem kombinierten Cueing- und Augenfolgebewegungsexperiment wurde überprüft, ob verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen möglich sind. Im letzten der drei empirischen Teile dieser Arbeit werden daher zunächst die angesprochenen Befunde zum Zusammenhang von verdeckter Aufmerksamkeit und Augenbewegungen nochmals ausführlich dargestellt und in Bezug darauf die Untersuchungsfragestellung erläutert. Anschließend werden die erzielten experimentellen Ergebnisse geschildert.

Abgesehen von der Frage, ob verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen während Pursuit möglich sind, sollte in dieser Arbeit zuvor untersucht werden, wie visuell-räumliche Aufmerksamkeit überhaupt während glatter Augenfolgebewegungen um den Zielreiz der Bewegung verteilt ist. Van Donkelaar (1999) konnte in diesem Zusammenhang zeigen, dass Probanden auf einen Reiz, der vor dem Pursuit-Target präsentiert wurde, schneller reagierten als auf einen Reiz, der hinter dem Pursuit-Target dargeboten wurde. Aus seinen Ergebnissen folgte van Donkelaar (1999), dass die visuell-räumliche Aufmerksamkeit dem Zielreiz einer glatten Augenfolgebewegung voraus eilt.

Im zweiten der drei empirischen Teile der Arbeit sind neben der ausführlichen Darstellung der Literatur zu dieser Thematik auch die Resultate eines Experiments beschrieben, das den Versuch einer Replikation der Ergebnisse von van Donkelaar (1999) als Ausgangspunkt hatte.

1.4 Visuelles Gedächtnis

Philosophen stellen seit mindestens 2000 Jahren Vermutungen über das menschliche Gedächtnis an. Die wissenschaftliche Untersuchung des Konstrukts „Gedächtnis“ begann allerdings erst vor etwa 100 Jahren, als der deutsche Wissenschaftler Hermann Ebbinghaus beschloss, die zu dieser Zeit gerade entwickelten Methoden zur Untersuchung von Wahrnehmungsprozessen auf die Untersuchung des menschlichen Gedächtnis anzuwenden. Statt Gedächtnisprozesse im alltäglichen Leben zu erforschen, entschied er, das Lernen und Vergessen von künstlichen Materialien an sich selbst zu untersuchen und zwar unter streng kontrollierten Laborbedingungen. Auf diese Weise war es ihm möglich, zuvor unbekannte wichtige Charakteristika des menschlichen Gedächtnisses aufzuzeigen.

Das menschliche Gedächtnis allgemein (für einen Überblick siehe Baddeley, 1997) ist ein System zur Speicherung und zum Abruf von Informationen, welche wir mit den unterschiedlichen Sinnessystemen erfassen. Ob wir überhaupt etwas sehen, riechen, hören oder schmecken beeinflusst das, was wir später erinnern werden, weil unsere Erinnerungen im

Grunde nichts anderes als abgespeicherte Empfindungen sind. Auch in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung, mit der sich die vorliegende Arbeit im Weiteren auseinandersetzen wird, gehen Wahrnehmungsinhalte nicht direkt verloren, wenn die Wahrnehmung einer bestimmten visuellen Szene oder eines Bildes beendet ist. Ganz im Gegenteil werden sie für längere oder kürzere Zeit im visuellen Gedächtnis aufbewahrt. Diese visuellen Erinnerungen können für Wahrnehmungsprozesse und die Steuerung des eigenen Verhaltens genutzt werden.

Das visuelle Gedächtnis besteht aus mehreren Gedächtnissystemen mit unterschiedlichen Eigenschaften und lässt sich in drei Hauptkomponenten untergliedern: Im sensorischen (ikonischen) Gedächtnis können für eine sehr begrenzte Zeit (im Allgemeinen kürzer als eine Sekunde) relativ große Informationsmengen gespeichert werden, die jedoch sehr schnell verblassen oder durch nachfolgende Informationen verdrängt werden. Im visuellen Kurzzeitgedächtnis werden Informationen für Minutenbruchteile gespeichert. Dauerhaft wird die Information im visuellen Langzeitgedächtnis niedergelegt, wo sie zum Teil noch nach Jahren abgerufen werden kann.

Nach diesem ersten kurzen Überblick über die drei Hauptkomponenten des visuellen Gedächtnisses werden die einzelnen Systeme nachfolgend einer etwas ausführlicheren Betrachtung unterzogen (Baddeley, 1997).

Ikonisches Gedächtnis

In seiner inzwischen schon legendären Studie von 1960 untersuchte George Sperling, welche Informationen während der kurzzeitigen Präsentation visueller Stimuli verfügbar sind. Sperling (1960) zeigte seinen Versuchspersonen Stimuli, die aus drei Reihen bestanden, die wiederum je vier Buchstaben enthielten. Diese Stimuli wurden den Probanden für die Dauer von 50 ms gezeigt, danach wurde ein leeres weißes Feld präsentiert. Die Versuchsteilnehmer wurden anschließend gebeten, alle Buchstaben zu nennen, an die sie sich erinnern konnten. Nur vier bis fünf der insgesamt zwölf Buchstaben konnten von den Probanden korrekt wiedergegeben werden. Die Frage, die sich Sperling (1960) nun stellte, war, ob die Versuchspersonen insgesamt nur fünf Buchstaben wahrgenommen hatten oder ob vielleicht alle Buchstaben gesehen wurden, einige von ihnen jedoch vergessen wurden in der Zeit, die

dafür nötig war, die fünf Buchstaben zu berichten. Um diesem Punkt nachzugehen, instruierte Sperling seine Versuchsteilnehmer, nur die Buchstaben einer Reihe zu berichten, wobei ihnen jedoch erst nach der Darbietung des Stimulus gesagt würde, um welche spezifische Reihe es sich handeln würde. Das Erklängen eines hohen Tons bedeutete, dass die oberste Buchstabenreihe berichtet werden sollte, nach einem mittleren Ton sollte die mittlere Reihe und nach einem tiefen Ton die unterste Reihe wiedergegeben werden. Da die Probanden im Vorfeld nicht wussten, welche Buchstabenreihe sie berichten mussten, sollten sie gezwungen sein, sich zunächst einmal alle zwölf Buchstaben zu merken. Mit dieser Manipulation waren die Versuchspersonen in der Lage, drei bis vier Buchstaben der Reihe, nach der sie gefragt wurden, korrekt wiederzugeben.

Wenn die Probanden nach den Buchstaben einer spezifischen Reihe gefragt wurden, erinnerten sie drei oder vier Buchstaben richtig. Weil sie vor Beginn eines Experimentaldurchgangs jedoch nicht wussten, welche Reihe abgefragt werden würde, kann man annehmen, dass sie auch aus den beiden anderen nicht getesteten Reihen etwa drei Buchstaben im Gedächtnis verfügbar gehabt haben mussten. Dies wiederum legt die Vermutung nahe, dass die Gesamtzahl der im Gedächtnis behaltenen Buchstaben bei etwa neun lag, was offensichtlich um einiges mehr ist als die vier bis fünf Buchstaben, die in der Bedingung, in der einfach alle Buchstabenreihen berichtet werden sollten, korrekt reproduziert wurden. Sperling nahm in Anbetracht dieser Ergebnisse an, dass die einzelnen Buchstaben aus einer schnell zerfallenden oder verblassenden Gedächtnisspur ausgelesen würden, die zunächst einmal jedoch alle oder zumindest eine ganze Reihe der Buchstaben enthalten hatte.

In Einklang mit diesen Ausführungen berichtet Sperling (1963) eine Untersuchung, in der er systematisch das Intervall zwischen dem Verschwinden der Buchstaben und der Präsentation eines Hinweisreizes (der anzeigte, welche Buchstabenreihe reproduziert werden sollte) veränderte. Je mehr Zeit bis zur Präsentation des Hinweisreizes verging, desto weniger Buchstaben konnten korrekt angegeben werden. Wenn der Hinweisreiz später als 500 ms nach dem Verschwinden der Buchstaben dargeboten wurde, hatte er praktisch keinen Effekt mehr

auf die Reproduktion. Dieses Resultat stimmt mit der Idee einer visuellen Spur überein, die unter den geschilderten Bedingungen etwa eine halbe Sekunde bestehen bleibt.

Zusammengefasst handelt es sich beim ikonischen Gedächtnis also um ein Speichersystem, das sich durch eine relativ geringe Latenz (im Bereich von wenigen hundert Millisekunden) bei gleichzeitig sehr hoher Kapazität auszeichnet und stark mit sensorischen Prozessen assoziiert ist.

Visuelles Kurzzeitgedächtnis

Schon früh fanden sich Hinweise darauf, dass das ikonische Gedächtnis durch ein beständigeres visuelles Speichersystem beeinflusst wird. Eine der ersten Studien, die einen solchen Hinweis lieferte, war die von Posner, Boies, Eichelman und Taylor aus dem Jahre 1969. In ihren Experimenten mussten die Versuchspersonen zunächst entscheiden, ob zwei dargebotene Buchstaben den gleichen „Namen“ hatten oder nicht. Wenn ihnen beispielsweise die Buchstaben AA oder Aa präsentiert wurden, sollten sie mit „ja“ antworten, wurden die Buchstaben AB oder Ab gezeigt, sollten sie mit „nein“ antworten. Posner und seine Kollegen beobachteten, dass ihre Probanden durchschnittlich 80 ms schneller antworteten, wenn die Buchstaben visuell identisch waren und gleichzeitig den gleichen Namen hatten (z.B. AA oder aa) im Vergleich zu den Bedingungen, in denen die Buchstaben zwar den gleichen Namen hatten, visuell aber unterschiedlich waren (z.B. Aa oder aA). Im Anschluss daran wurden den Probanden die beiden Buchstaben nicht mehr gleichzeitig sondern nacheinander dargeboten, wobei die Länge des Intervalls zwischen der Präsentation des ersten und des zweiten Buchstabens variiert wurde. Je länger das Intervall war, desto geringer war der Vorteil von physikalisch identischen Buchstabenabfolgen. Erfolgte die Präsentation des zweiten Buchstabens erst zwei Sekunden nach dem ersten, war der Reaktionszeitvorteil von visuell identischen Buchstabenkombinationen verschwunden. Posner et al. (1969) zogen aus diesen Beobachtungen den Schluss, dass eine visuelle Gedächtnisspur innerhalb von zwei Sekunden zerfalle.

Phillips und Baddeley (1971) kamen jedoch auf die Idee, dass die Ergebnisse von Posner et al. (1969) vielleicht eher damit zusammenhängen, dass am Ende des Intervalls von

zwei Sekunden die visuellen Informationen möglicherweise nicht mehr rein visuell sondern (auch) in einem sprachlichen Format repräsentiert würden. Es wäre demnach denkbar, dass die sprachliche Repräsentation der Informationen nach zwei Sekunden dominant ist, was aber nicht notwendigerweise bedeuten müsste, dass die visuelle Repräsentation der Information komplett verloren ist. Phillips und Baddeley (1971) testeten diesen Punkt unter Verwendung von Stimulusmaterial, das nur schwer mit einem sprachlichen Label zu versehen war: Sie erzeugten Schachbrettmuster, in denen jede Zelle zufällig schwarz oder weiß war. Den Probanden wurde ein erstes Muster präsentiert und nach einem Intervall von 0 bis 9 Sekunden wurde ihnen dann ein zweites Muster dargeboten, das entweder identisch mit dem ersten Muster war oder sich bezüglich der Farbe einer einzelnen Zelle vom ersten Schachbrett unterschied. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, ob die beiden Muster gleich oder verschieden waren. Die Ergebnisse zeigten, dass die Antworten der Probanden von der Länge des Zeitintervalls zwischen der Darbietung des ersten und des zweiten Musters abhängig waren: Je länger das Intervall war, desto häufiger gaben die Versuchspersonen eine falsche Antwort. Es zeigte sich allerdings, dass auch nach mehr als zwei Sekunden noch richtige Antworten möglich waren, was wiederum darauf hindeutet, dass ein visuelles Speichersystem existiert, das länger als die von Posner und Kollegen (1969) vorgeschlagenen zwei Sekunden funktional ist.

Dass diese von Posner et al. (1969) und von Phillips und Baddeley (1971) berichteten Effekte dem ikonischen Gedächtnis zugeschrieben werden können, ist sehr unwahrscheinlich, da keiner der Effekte durch die Präsentation eines weiteren gemusterten Stimulus (Maske) während des Retentionsintervalls beeinträchtigt wird (das ikonische Gedächtnis wird durch Maskierung beeinflusst, z.B. Turvey, 1973). Das Vorhandensein eines ikonischen Gedächtnisses konnte Phillips (1974) aber auch unter Anwendung der Schachbrettmuster demonstrieren: Er präsentierte unterschiedlich komplexe Schachbrettmuster (bestehend aus vier bis 25 Zellen) und testete sie wieder mit einer Reihe von verschiedenen Retentionsintervallen. In der einen Hälfte der Durchgänge wurden die beiden Mustern an der exakt räumlich identischen Position gezeigt. In der anderen Hälfte der Trials hingegen war das zweite Schachbrettmuster etwas nach links oder rechts verschoben worden. Wenn die Muster

an der gleichen Stelle präsentiert wurden, war die Leistung der Versuchsteilnehmer bei kurzen Retentionsintervallen sehr gut und zwar unabhängig von der Komplexität des Schachbrettmusters. Wenn die Muster jedoch leicht versetzt dargeboten wurden, war die Wiedererkennensleistung von der Komplexität des Musters abhängig. Phillips (1974) nahm an, dass die zweite Bedingung das Vorhandensein eines visuellen Kurzzeitgedächtnisses widerspiegeln, während die erste Bedingung (in der die beiden Muster an identischer Stelle dargeboten wurden) die gemeinsamen Effekte von ikonischem und visuellem Kurzzeitgedächtnis reflektieren.

Zusammengenommen sprechen die dargestellten Befunde dafür, dass es sich beim ikonischen Gedächtnis und beim visuellen Kurzzeitgedächtnis um zwei unterschiedliche Speichersysteme handelt. Im Gegensatz zum ikonischen Gedächtnis werden im visuellen Kurzzeitgedächtnis also visuelle Informationen mehrere Sekunden lang gespeichert, wobei der Kurzzeitspeicher eine begrenzte Kapazität hat. Außerdem ist das visuelle Kurzzeitgedächtnis mehr mit der kognitiven Verarbeitung eines visuellen Reizes verbunden und weniger mit sensorischen Prozessen assoziiert.

Visuelles Langzeitgedächtnis

Schon seit langem weiß man, dass Menschen in der Lage sind, visuelles Material über die Dauer von Sekunden hinaus zu speichern. Wie leistungsfähig das visuelle Langzeitgedächtnis ist, zeigt sich z.B. in Untersuchungen, in denen das Wiedererkennen von Bildern getestet wurde. Nickerson (1965) zeigte seinen Probanden 600 Bilder von verschiedenen Szenen und Ereignissen und testete die Behaltensleistung der Versuchspersonen für diese Bilder nach unterschiedlich langen Retentionsintervallen, die von einem Tag bis hin zu einem Jahr variierten. Das Wiedererkennen wurde getestet, indem die bereits gezeigten Bilder mit noch nicht präsentierten durchmischt wurden. Für jedes Bild mussten die Probanden angeben, ob es sich um ein „neues“ oder ein „altes“ Bild handelte. Nach einem Tag lag die Leistung der Versuchsteilnehmer bei etwa 92% korrekter Antworten und auch nach einem Jahr war die Leistung mit 63% richtiger Antworten noch deutlich über dem Zufallsniveau.

Die Unterscheidung zwischen sensorischem Gedächtnis, Kurzzeitgedächtnis und Langzeitgedächtnis als drei in ihrer Funktionsweise klar verschiedene Gedächtnissysteme ist jedoch nicht auf das visuelle System bzw. die Verarbeitung visueller Informationen beschränkt, wie es an dieser Stelle vielleicht den Anschein haben mag (Abbildung 1.7). Vielmehr ist diese Unterscheidung in der Gedächtnispsychologie allgemein anerkannt spätestens seit der Entwicklung so genannter modaler Gedächtnismodelle (z.B. Atkinson und Shiffrin, 1968). Diese Mehrspeichermodelle unterscheiden ganz grundsätzlich drei Gedächtnissysteme (sensorisches, Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis) zunächst einmal unabhängig von den verschiedenen Sinnesmodalitäten (visuell, auditiv, usw.).

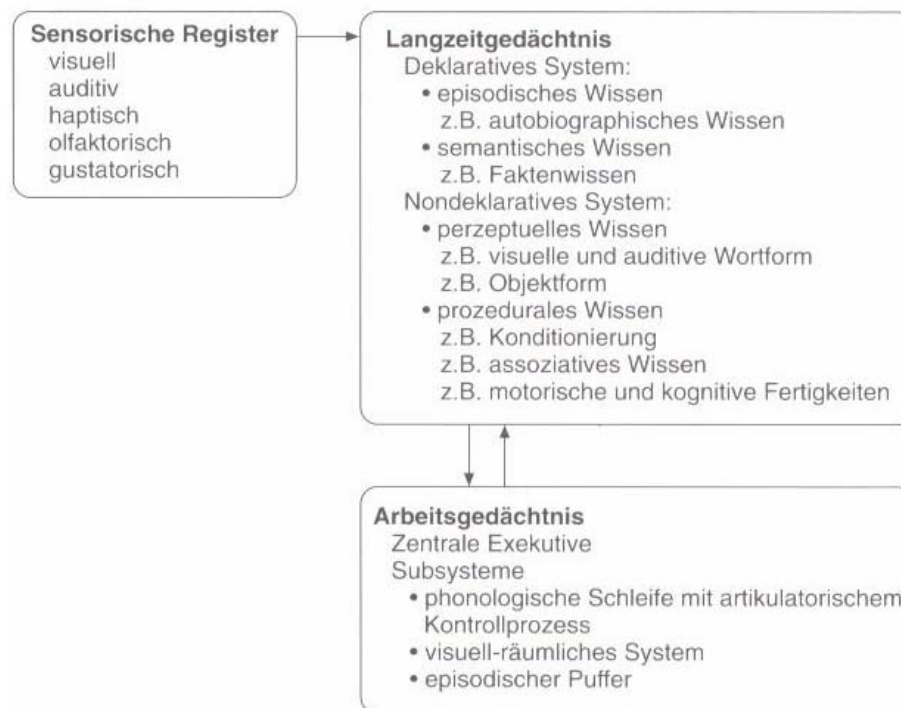


Abbildung 1.7 Schematische Darstellung des modalen Gedächtnismodells (aus Müsseler und Prinz, 2002).

Bei den Beschreibungen dieser modalen Gedächtnismodelle, wie sie in jedem Lehrbuch der Allgemeinen Psychologie zu finden sind, fällt allerdings auf, dass häufig (gerade in Lehrbüchern jüngerer Datums, z.B. Müsseler und Prinz, 2002) der Begriff

Kurzzeitgedächtnis durch den Terminus Arbeitsgedächtnis ersetzt wurde oder die beiden Begriffe synonym verwendet werden. Diese Entwicklung geht wohl zu einem wesentlichen Teil auf den Einfluss der Arbeiten von Alan Baddeley zurück. Baddeley und Hitch schlugen 1974 das gegenwärtig populärste Modell des menschlichen Arbeitsgedächtnisses vor und es liegt seither in nur wenig modifizierter Form (Baddeley, 1986) zahllosen Untersuchungen zugrunde.

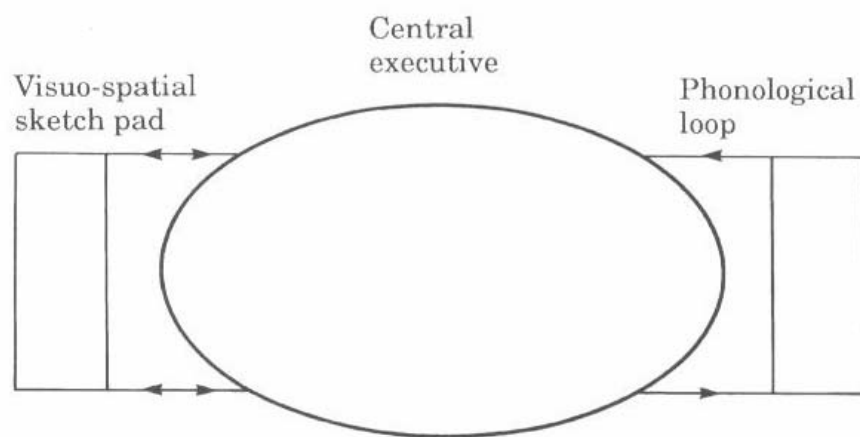


Abbildung 1.8 Eine vereinfachte Darstellung des Arbeitsgedächtnissmodells von Baddeley bestehend aus der zentralen Exekutive (Central executive), dem visuell-räumlichen Notizblock (Visuo-spatial sketch pad) und der phonologischen Schleife (Phonological loop) (aus Baddeley, 1997).

Auch Baddeleys Modell (Abbildung 1.8) ist modular angelegt; in diesem Modell werden ursprünglich drei Komponenten unterschieden: eine zentrale Kontrolleinheit, die so genannte zentrale Exekutive, und zwei Subsysteme, ein phonologisches (die phonologische Schleife für die Verarbeitung akustischer und artikulatorischer Informationen) und ein visuell-räumliches (der visuell-räumliche Notizblock für die Verarbeitung von visuellen Wahrnehmungen und Vorstellungen). Zuletzt wurde das Modell um einen episodischen Puffer erweitert (Baddeley, 2000). Seit der Einführung dieses Modells wird vom Kurzzeitgedächtnis als Arbeitsgedächtnis gesprochen. Würde man nach einer Entsprechung für das visuelle

Kurzzeitgedächtnis in Baddeley Arbeitsgedächtnismodell suchen wollen, wäre dies wohl der visuell-räumliche Notizblock.

Bisher ist in der Darstellung des visuellen Gedächtnisses das Vorhandensein von Augenbewegungen vollkommen unberücksichtigt geblieben. Da der Mensch jedoch etwa drei- bis fünfmal pro Sekunde eine Sakkade macht, stellt sich zwangsläufig die Frage, wie das visuelle Gedächtnis wahrgenommene Informationen über mehrere Sakkaden hinweg integriert. Dass eine Integration visueller Informationen stattfinden muss, steht außer Frage, da wir unsere Umgebung als stabil und nicht als sich fortwährend bewegend wahrnehmen.

Während sich eine Reihe von Forschungsarbeiten zum transsakkadischen Gedächtnis mit der Informationsintegration über sakkadische Augenbewegungen hinweg beschäftigt hat, gibt es derzeit keine experimentellen Befunde zu der Frage, wie das visuelle Gedächtnis Informationen während glatter Augenfolgebewegungen verarbeitet. Im nachfolgend dargestellten ersten empirischen Teil dieser Arbeit wird daher zunächst ein Überblick über die bereits existierenden experimentellen Befunde zum transsakkadischen Gedächtnis und zum sensorischen Gedächtnis während Smooth Pursuit gegeben. Anschließend werden die Durchführung und die Ergebnisse einer Experimentalserie zum visuellen Kurzzeitgedächtnis während glatter Augenfolgebewegungen beschrieben.

2 Visuelles Kurzzeitgedächtnis

während glatter Augenfolgebewegungen

2.1 Theoretischer Hintergrund

An dieser Stelle soll vorab darauf hingewiesen werden, dass alle im nachfolgenden Teil dargestellten Befunde bereits von Kerzel und Ziegler (2005) veröffentlicht worden sind.

Um zu gewährleisten, dass die umgebende Welt als stabil wahrgenommen wird, müssen Menschen visuelle Informationen über Augenbewegungen hinweg integrieren. Sonst müsste der Wahrnehmungsprozess mit jeder Sakkade erneut gestartet werden, was bedeuten würde, dass Menschen etwa drei- bis fünfmal pro Sekunde (d.h. also mit jeder Sakkade) eine neue Szene sehen würden. Im Prinzip ließe sich diese Integration durch die Verwendung eines von insgesamt zwei visuellen Speichersystemen bewältigen, die beide auch während der Fixation eines Teils unserer Umwelt zu Verfügung stehen (Phillips, 1974): Einerseits könnten visuelle Informationen prinzipiell für etwa 100 ms in einem Speicher aufbewahrt werden, der sich durch seine Kurzlebigkeit bei gleichzeitig sehr hoher Kapazität auszeichnet und stark mit sensorischen Prozessen assoziiert ist. Andererseits könnten visuelle Informationen aber auch für Zeitintervalle von mehreren Sekunden in einem kapazitätsbegrenzten Speicher gehalten werden, der wiederum mit der kognitiven Verarbeitung eines Reizes in Verbindung steht. Das zuletzt beschriebene Speichersystem wird häufig als visuelles Kurzzeitgedächtnis (VKZG) bezeichnet.

Ein Grossteil der bisherigen Forschung in diesem Gebiet hat sich mit der Frage beschäftigt, ob eines dieser beiden Speichersysteme (also das sensorische oder das VKZG) dazu verwendet wird, um visuelle Informationen über sakkadische Augenbewegungen (kurz: Sakkaden) hinweg zu integrieren. Sakkadische Augenbewegungen bringen die Augen innerhalb von etwa 50 ms in eine neue Position. Während dieser 50 ms ist die visuelle

Sensitivität herabgesetzt (für eine Übersicht siehe Ross, Morrone, Goldberg und Burr, 2001). Im Gegensatz dazu beschäftigten sich die vorliegenden Untersuchungen hauptsächlich mit der Integration visueller Informationen über kontinuierliche Positionsveränderungen des Auges hinweg, also um so genannte glatte Augenfolgebewegungen (GAFs, Singular: GAF; oder auch Smooth Pursuit oder einfach nur Pursuit). GAFs dienen dazu, ein Objekt in der Fovea, der Region der größten Sehschärfe, zu stabilisieren, indem das Auge mit annähernd der gleichen Geschwindigkeit bewegt wird, wie das sich bewegende Target (Zielreiz) (siehe Tabelle 2.1; für eine Übersicht siehe Ilg, 1997).

Tabelle 2.1 Abwesenheit (Nein) oder Anwesenheit (Ja) von retinaler Bewegung als Funktion von Augenbewegung und Bildbewegung

<u>Augenbewegung</u>	<u>Bildbewegung</u>	
	<u>Bewegt</u>	<u>Stationär</u>
Bewegt	Nein	Ja
Stationär	Ja	Nein

Anmerkung. Wenn sich ein physikalisches Bild und das Auge mit derselben Geschwindigkeit bewegen, entsteht keine Bewegung der retinalen Projektion des Bildes. Diese Situation ist der Kombination von stationärem Auge und stationärem Bild ähnlich. Eine Bewegung von Auge oder Bild produziert retinale Bewegung.

Üblicherweise ist jedoch die Geschwindigkeit des Auges etwas langsamer als die des zu beobachtenden und sich bewegenden Targets. Dies führt dazu, dass gelegentlich kleine Catch up-Sakkaden nötig werden, um den Zielreiz wieder zurück in die Fovea zu bringen. Im Gegensatz zu Sakkaden sind GAFs kontinuierlich und können über eine variable Zeitdauer (im Bereich von mehreren Sekunden oder gar Minuten) hinweg aufrechterhalten werden. GAFs können nicht willentlich produziert werden (Becker und Fuchs, 1985), d.h. für die Durchführung von GAFs brauchen Probanden einen sich bewegenden Zielreiz.

Weil sich die meisten Forschungsarbeiten zur Integration visueller Informationen über Augenbewegungen hinweg mit Sakkaden beschäftigt haben, wird im Folgenden zunächst die Literatur zu diesem Thema überblickend zusammengefasst.

Transsakkadisches Gedächtnis

Weil sich die retinale Position eines Objekts in der Welt mit jeder Bewegung des Auges verändert, sollte die Integration visueller Informationen über Augenbewegungen hinweg in einem beobachterzentrierten (oder auch egozentrischen oder räumlichen) Koordinaten- bzw. Bezugssystem funktionieren. Würde die Integration in einem augenzentrierten (oder auch retinozentrischen oder retinalen) Koordinatensystem stattfinden, schiene die Welt sich mit jeder Bewegung des Auges zu bewegen. Als mögliche Lösung wurde in diesem Zusammenhang vorgeschlagen, dass die transsakkadische Integration von visuellen Informationen von einem kapazitätsbegrenzten Speichersystem bewältigt wird, das tatsächlich mit dem VKZG identisch sein könnte: Zuerst wurde demonstriert, dass das sensorische Gedächtnis, das sich, wie oben erwähnt, durch eine sehr hohe Kapazität auszeichnet, nicht in räumlichen sondern in retinozentrischen Koordinaten operiert. Zwei Muster, die an ein und derselben räumlichen Position, nur getrennt voneinander durch ein kurzes Zeitintervall (< 100 ms), dargeboten werden, können als ein kombiniertes visuelles Muster wahrgenommen werden, wenn während der Darbietung der beiden Einzelmuster die Fixation aufrechterhalten wird. Wenn nun eine Sakkade ausgeführt wird, die nach einem so genannten Blank-Intervall (Leer-Intervall, in dem keine Reize dargeboten werden) das zweite Muster in eine neue retinale Position bringt, dann wird die Wahrnehmung eines kombinierten Musters zerstört (Irwin, Yantis und Jonides, 1983). In ähnlicher Weise kann ein erstes Sinusgitter ein nachfolgendes zweites Gitter maskieren, wenn sich die beiden Gitter in sowohl räumlichen als auch retinalen Koordinaten überlagern. Wenn jedoch eine Sakkade zwischen der Präsentation der beiden Gitter ausgeführt wird, erlischt der Maskierungseffekt (Irwin, Zacks und Brown, 1990). Kürzlich konnte allerdings gezeigt werden, dass – entgegen den bisher dargestellten Befunden – für Bewegungsreize eine Art transsakkadischer Integration stattfindet (Melcher und Morrone, 2003): Die Schwellenwerte für die Detektion der Richtung einer Bewegung waren niedriger, sowohl wenn zwei aufeinander folgende Bewegungsimpulse präsentiert wurden, die durch ein kurzes Zeitintervall voneinander getrennt waren, als auch wenn eine Sakkade den zweiten Reiz in eine neue retinale Position verbrachte. Zusammengefasst scheint es für die meisten Attribute und Aufgaben so zu sein, dass es, von möglichen Ausnahmen

abgesehen, nur wenige Beweise für eine räumliche Integration visueller Informationen während sakkadischer Augenbewegungen im sensorischen Gedächtnis gibt.

Zum zweiten konnte gezeigt werden, dass das transsakkadische Gedächtnis viele Charakteristika mit dem VKZG zu teilen scheint. Es wurde nachgewiesen, dass die Kapazität des VKZG etwa vier bis fünf Items (Reize) beträgt (Pashler, 1988; Sperling, 1960) und dass seine Kapazität für räumliche Konfigurationen von Objekten größer ist als für die einzelnen Objekte solcher Konfigurationen (Simons, 1996). Außerdem verändert sich die Kapazität des VKZG nur wenig über die Zeit (Phillips, 1974). Das im Kern gleiche Muster wurde auch in Bezug auf das transsakkadische Gedächtnis beobachtet (Irwin, 1991). Darüber hinaus wurden einfache Muster leichter behalten als komplexe Muster, ungeachtet dessen, ob sich das Auge während des Retentionsintervalls bewegte oder nicht (Carlson-Radvansky, 1999; Carlson-Radvansky und Irwin, 1995; Irwin, 1991). Daher mag das transsakkadische Gedächtnis tatsächlich das gleiche wie das VKZG sein. Des Weiteren gibt es Belege dafür, dass das VKZG stark durch sakkadische Augenbewegungen beeinflusst wird. Wenn Probanden ein Objekt oder eine Szene frei betrachten dürfen, werden die Inhalte oder Items, die im VKZG gespeichert werden, maßgeblich durch vorangegangene Fixationen bestimmt (Irwin und Zelinsky, 2002). Genauer gesagt, werden nur die letzten drei Objekte, die das Ziel einer Fixation waren (oder zumindest in unmittelbarer Nähe einer Fixation platziert waren) genau erinnert. In ähnlicher Art und Weise werden Objekte, die vor der Initiierung einer Sakkade nahe dem letzten Ziel der Sakkade präsentiert wurden, besser erinnert als Objekte, die an irgendeinem anderen Ort in der Szene dargeboten wurden (Irwin, 1992; Irwin und Zelinsky, 2002; siehe aber auch Germeys, De Graef, Panis, Van Ecclepoel und Verfaillie, 2004). Dies liegt vor allem daran, dass sich die visuell-räumliche Aufmerksamkeit noch vor der Ausführung einer Sakkade auf den Zielort der Sakkade verlagert (Deubel und Schneider, 1996; Hoffman und Subramaniam, 1995; Kowler, Anderson, Doshier und Blaser, 1995). Schließlich wurde beobachtet, dass insgesamt weniger Items erinnert werden, wenn eine Sakkade ausgeführt wird im Vergleich zu einer Bedingung, in der während einer Fixation auf einem Computermonitor durch Sakkaden induzierte retinale Veränderungen vorgetäuscht

wurden (Irwin, 1991). Diese Leistungseinbußen wurden den speziellen Anforderungen, die die Sakkadenbedingung als Doppelaufgabe mitbringt, zugerechnet.

Sensorisches Gedächtnis während glatter Augenfolgebewegungen

Im Vergleich zu der großen Anzahl an Studien zum transsakkadischen Gedächtnis gibt es nur relativ wenige Untersuchungen, die sich mit dem visuellen Gedächtnis während GAFs befassen haben. Es existiert lediglich eine Studie, in der untersucht wurde, ob das sensorische Gedächtnis während GAFs in räumlichen oder retinalen Koordinaten operiert (Sun und Irwin, 1987). Wie oben erwähnt, garantiert nur eine räumliche Organisation von Reizen die stabile Wahrnehmung unserer Umwelt angesichts allgegenwärtiger Augenbewegungen. Während GAFs führt die sukzessive Präsentation eines Reizes an derselben räumlichen Position zur Stimulation unterschiedlicher Positionen auf der Retina. Wenn das sensorische Gedächtnis in räumlichen Koordinaten operiert, müsste die Diskriminierung eines Targets verschlechtert sein, wenn nach diesem Target eine Maske in exakt der gleichen räumlichen Position präsentiert wird. Wenn im Gegensatz dazu das sensorische Gedächtnis in retinalen Koordinaten funktioniert, müssten Maskierungseffekte auftreten, falls der zweite Reiz in einer räumlichen Position dargeboten wird, die unter Einbeziehung der Augenbewegung in die Bewegungsrichtung verschoben ist und somit die gleiche Position auf der Retina stimuliert. Letzteres wurde von Sun und Irwin beobachtet, was somit für eine retinozentrische Organisation des sensorischen Gedächtnisses während GAFs spricht. In Übereinstimmung mit dieser Auffassung steht die Beobachtung, dass es möglich ist, die zweidimensionale Figur eines Objekts, die sozusagen auf die Retina „gemalt“ wurde, durch die Darbietung von sich in ein und derselben horizontalen Position auf und ab bewegenden Lichtpunkten während gleichzeitiger horizontaler Bewegung des Auges wahrzunehmen (Morgan, Findlay und Watt, 1982): Im Laufe der Zeit „malen“ die durch den Pursuit induzierten horizontalen Positionsveränderungen und die vertikale Stimulusbewegung eine zweidimensionale Figur des Objekts auf die Retina. Wenn die Figur in weniger als 150 ms komplettiert wird, werden die sukzessive stimulierten Positionen im sensorischen Gedächtnis integriert und die „gemalte“ zweidimensionale Figur kann akkurat wahrgenommen werden. In der

englischsprachigen Literatur findet man dieses Phänomen unter dem Begriff „retinal painting“ beschrieben.

VKZG während glatter Augenfolgebewegungen

In den nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde das VKZG für die Position und die Farbe von Objekten während GAFs untersucht. Aus diesem Grund wurden Retentionsintervalle verwendet, die weit über den Grenzen des sensorischen Gedächtnisses (0.9 bis 1.0 s) liegen. Die räumliche und retinale Stabilität der verwendeten Stimuli wurde variiert, um die Frage zu klären, ob das VKZG während GAFs in einem retinozentrischen oder räumlichen Bezugs- oder Koordinatensystem operiert. Hauptsächlich wurden zwei Smooth Pursuit-Bedingungen und eine Fixationsbedingung getestet. In der ersten Smooth Pursuit-Bedingung bewegten sich die zu memorierenden Items des Gedächtnisbildes (= Abbildung oder Darstellung von Reizen, die sich die Probanden einprägen sollten) mit der gleichen Geschwindigkeit über den Computerbildschirm wie das Target der GAF, was zu einer annähernd stabilen Position der Reize auf der Retina führte, gleichzeitig aber auch zu einer Bewegung der Targets im Raum. In der zweiten Smooth Pursuit-Bedingung wurde das Gedächtnisbild stationär auf dem Bildschirm präsentiert, während sich das Target der GAF durch die zu memorierenden Items hindurch bewegte. Diese Bedingung führt zu starker retinaler Bewegung bei gleichzeitiger räumlicher Stabilität der Items. Wenn das VKZG während GAFs in einem räumlichen Bezugssystem operiert, würde man eine bessere Gedächtnisleistung in der Bedingung erwarten, die zu retinaler Bewegung und räumlicher Stabilität der Items führt; wenn es hingegen in einem retinalen Referenzsystem funktioniert, sollte die Bedingung mit retinaler Stabilität und räumlicher Bewegung zu besseren Ergebnissen führen. In Übereinstimmung mit der Annahme eines retinozentrisch organisierten VKZG stehen die Ergebnisse einer neueren Studie zu gedächtnis-geleiteten Sakkaden (im Englischen: „memory-guided saccades“), in der Experimente mit Affen zeigten, dass – nach einer langsamen Deplatzierung des Auges – Sakkaden zu der räumlichen Position eines Blitzes, der vor der Deplatzierung des Auges präsentiert wurde, variabler sind als Sakkaden zu der retinalen Position des Blitzes (Baker, Harper und Snyder, 2003). Falls das VKZG während

GAFs schließlich ein eher abstraktes Gedächtnissystem ist, das weder strikt räumlich noch strikt retinozentrisch ist, sollte man keinen Unterschied zwischen den beiden Smooth Pursuit-Bedingungen erwarten. Für Sakkaden wurde übrigens letztere Schlussfolgerung favorisiert (z.B. Irwin, 1991; Pollatsek, Rayner und Henderson, 1990; Rayner, McConkie und Zola, 1980).

Darüber hinaus sollte der Vergleich der beiden Smooth Pursuit-Bedingungen mit der Fixationsbedingung zeigen, ob eine Verschlechterung des VKZG aufgrund der Durchführung einer Augenbewegung auftritt. Es gibt in diesem Zusammenhang drei Erklärungen dafür, auf welche Weise GAFs das VKZG beeinträchtigen könnten. Erstens könnten VKZG und Augenbewegungsaufgaben mit einander interferieren allein aufgrund der Anforderungen, die eine Dual-Task-Aufgabe (Doppelaufgabe) an einen Versuchsteilnehmer stellt. So wurde beispielsweise 1994 von Pashler gezeigt, dass die Bearbeitung einer Aufgabe darunter leidet, wenn zur selben Zeit eine zweite Aufgabe bearbeitet werden soll. Eine Erklärung für diese Leistungseinbußen bei der gleichzeitigen Bearbeitung von zwei Aufgaben geht auf die Annahme zurück, dass zentrale Ressourcen limitiert sind (Kahnemann, 1973) oder dass verschiedene Aufgaben durch einen zentralen „Flaschenhals“ (Pashler, 1994) hindurch müssen. Deshalb führt der Versuch, zwei Dinge zur selben Zeit zu tun, zu einer verschlechterten Leistung im Vergleich zu den Ergebnissen, die bei der Bearbeitung einer einzelnen Aufgabe erzielt werden. Der entscheidende Punkt hier ist, dass es sich um eine zentrale Kapazitätsbegrenzung handelt. Es konnte z.B. gezeigt werden, dass die Leistungseinbußen aufgrund einer Zweitaufgabe auch dann noch bestehen bleiben, wenn in beiden Aufgaben vollkommen verschiedene Stimuli verwendet oder unterschiedliche Antwortmodalitäten beansprucht werden (Pashler, 1994). Deshalb muss die Interferenz auf einem zentralen Verarbeitungslevel stattfinden und ist somit unabhängig von sensorischen Prozessen oder räumlichen Positionen. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass die Annahme eines zentralen Flaschenhalses nach wie vor ein stark diskutiertes Thema ist (Levy und Pashler, 2001; Meyer und Kieras, 1999). Nichtsdestotrotz scheint es für die nachfolgend geschilderten Untersuchungen nicht nötig zu sein, diesen Prozess en detail zu analysieren.

Ein zweiter Erklärungsansatz geht von der Annahme aus, dass visuell-räumliche Aufmerksamkeit an den Zielreiz einer GAF gebunden ist (für einen Überblick siehe Krauzlis und Stone, 1999) und diese Bindung wiederum zu einer verschlechterten Verarbeitung peripherer Reize führt. Einerseits mag diese Verschlechterung stark vom Aufgabentyp und den verwendeten Stimuli abhängen. Andererseits konnte jedoch gezeigt werden, dass die visuelle Suche nach einer kurzzeitig präsentierten Zahl in einer Buchstabenkette besser ist, wenn das Target der GAF selbst die Zahl enthält, verglichen mit einer Bedingung, in der ein dem Pursuit-Target naher Distraktor (der sich mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target bewegt) die Zahl enthält (Khurana und Kowler, 1987). Dieses Ergebnis legt die Annahme nahe, dass visuell-räumliche Aufmerksamkeit an das Target einer GAF gebunden ist und dass sie nicht dem Distraktor zugewendet werden kann. Allerdings haben Studien zur Wahrnehmung von Kontrast (Flipse, van der Wildt, Rodenburg, Keemink und Knol, 1988; Murphy, 1978), Bewegung (Heidenreich und Turano, 1996) und Form (Morgan et al., 1982) nur wenige Argumente dafür geliefert, dass die Wahrnehmung während GAF beeinträchtigt ist. Typischerweise fördert nämlich Aufmerksamkeit die Wahrnehmung (z.B. Carrasco, Penpeci-Talgar und Eckstein, 2000; Yeshurun und Carrasco, 1998), was im Gegenzug zu perzeptuellen Einbußen führen sollte, wenn es nicht möglich ist, seine Aufmerksamkeit einem Nicht-Target während GAFs zuzuwenden. Darüber hinaus ist bekannt, dass GAFs akkurater sind, wenn ein Proband seine Aufmerksamkeit zwischen einer GAF und einer zweiten Aufgabe aufteilen muss (Kathmann, Hochrein und Uwer, 1999). Dieser Punkt führt zu der Annahme, dass die Kontrolle von GAFs (am besten) in einem automatischen Modus operiert. Demnach ist die Frage offen, ob das VKZG während GAFs insbesondere infolge einer pursuit-bezogenen Limitierung der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit beeinträchtigt ist.

Drittens besteht die Möglichkeit, dass sowohl die retinale als auch räumliche Position eines Targets zumindest teilweise im VKZG enkodiert wird. In diesem Fall würde man erwarten, dass Veränderungen in einem dieser beiden Bezugssysteme zu Einbußen im VKZG für die Position eines Objekts führen. Im Vergleich zu einer Bedingung, in der sich die retinalen und räumlichen Positionen überlappen, sollte daher das VKZG für Positionen während GAFs verschlechtert sein. Solche Effekte sollten jedoch nicht auftreten, wenn die

Positionsinformationen abstrakt abgespeichert werden und somit nur die relationalen Informationen zwischen den einzelnen Objekten im VKZG enthalten sind.

Schließlich muss aber grundsätzlich auch in Betracht gezogen werden, dass das VKZG während GAFs dysfunktional ist, weil bisher keinerlei Untersuchungen hierzu durchgeführt worden sind.

Überblick über die einzelnen Experimente

Um diese unterschiedlichen Vorhersagen zu testen, wurde eine Serie von Experimenten durchgeführt. Das allen nachfolgend dargestellten Experimenten zugrunde liegende experimentelle Paradigma soll im Folgenden erläutert werden.

Den Probanden wurde eine Anordnung von Reizen gezeigt, die sie im Gedächtnis behalten sollten (Gedächtnisbild). Nach einem Retentionsintervall von etwa 1.0 s Dauer wurde den Versuchspersonen eine zweite Reizeanordnung gezeigt, das so genannte Testbild. Die Aufgabe der Probanden war es anzugeben, ob die beiden Anordnungen bzw. Bilder identisch waren oder ob sie sich voneinander unterschieden. In den meisten Experimenten wurde ein so genanntes kritisches Item aus dem Testbild mit einem Hinweisreiz versehen und die Versuchsteilnehmer sollten lediglich bezüglich dieses einen kritischen Items beurteilen, ob eine Veränderung stattgefunden hatte oder nicht. Die in den Experimenten verwendeten Reize lagen alle über der Wahrnehmungsschwelle und hatten einen maximalen Kontrast von 100%.

In Experiment 1a wurde das VKZG für die Position peripherer Targets untersucht. Drei Kontrollexperimente (Experimente 1b bis 1d) sollten helfen, mögliche Alternativerklärungen für die Ergebnisse aus Experiment 1a etwa im Hinblick auf sakkadischen Augenbewegungen, Kontrasteffekte und retinalen „Jitter“ (Wackeln) auszuschließen. In Experiment 2 wurde das VKZG für die Position von Items, die in der Fovea einer Versuchsperson dargeboten wurden, untersucht. In Experiment 3 wurde der Frage nachgegangen, ob sich retinale Bewegung – induziert durch Augenbewegungen – von retinaler Bewegung aufgrund der Bewegung eines Objektes selbst unterscheidet. In Experiment 4 wurde die Länge des Retentionsintervalls manipuliert. Hierdurch wurde ein Vergleich von VKZG für Objektpositionen während Smooth Pursuit und sensorischem

Gedächtnis möglich. In Experiment 5 ging es um das Gedächtnis für die Farbe eines Objektes während GAFs und in Experiment 6 wurde schließlich der Effekt der Geschwindigkeit der Augenfolgebewegung auf das VKZG für Positionen evaluiert.

2.2 Experiment 1a: Gedächtnis für die Position von Objekten

In Experiment 1a wurde getestet, ob das VKZG für die Position eines Objekts darunter leiden würde, wenn die zu erinnernden Items während einer GAF präsentiert werden. Außerdem wurde nach Hinweisen dafür gesucht, dass die räumliche Stabilität der Items von Vorteil für das Erinnern eben dieser ist. Falls das VKZG für die Position eines Objekts in einem räumlichen Bezugsrahmen arbeitet, sollte die Leistung besser sein, wenn das Gedächtnisbild räumlich stabil ist, während sich das Auge bewegt im Vergleich zu einer Bedingung, in der sich beide, das Auge und auch das Gedächtnisbild, bewegen (siehe Abbildung 2.1). Der Vergleich von Bedingungen mit GAFs einerseits und Fixation (d.h. stationärem Auge und stationärem Bild, wie später noch ausführlicher dargestellt wird) andererseits zeigt, ob die Durchführung von Smooth Pursuit zentrale oder visuell-räumliche Aufmerksamkeit bindet. Außerdem verdeutlicht dieser Vergleich, ob die Position von Objekten im VKZG in räumlichen oder retinalen Koordinaten gespeichert wird. Experiment 1a diente also dem Zweck zu klären, ob solche Unterschiede bestehen, während die Experimente 2 und 3 direkte Tests zwischen den Annahmen der einzelnen Hypothesen ermöglichen.

Des Weiteren wurde in Experiment 1a die Verfügbarkeit von relationalen Positionsinformationen während des Abrufs der Informationen aus dem Gedächtnis variiert. Jiang, Olson und Chun (2000) konnten zeigen, dass Informationen im VKZG in einer relationalen oder konfiguralen Art und Weise gespeichert werden, indem sie die Anzahl der im Testbild gezeigten Items manipulierten. Jiang et al. (2000) präsentierten im Testbild entweder die gleiche Anzahl von Reizen wie im Gedächtnisbild oder ein einzelnes Item. In beiden Fällen wurde jedoch das kritische Item stets mittels einer weißen Box als solches kenntlich gemacht. Die Fähigkeit der Probanden, eine Positionsveränderung des kritischen

Targets korrekt zu identifizieren, verschlechterte sich außerordentlich in der Bedingung, in der das kritische Target alleine gezeigt wurde, im Vergleich zu der Bedingung, in der alle Items des Gedächtnisbildes auch im Testbild vorhanden waren. Dieses Ergebnis deutete darauf hin, dass die Position oder auch andere Eigenschaften eines Items im VKZG unter Berücksichtigung von bzw. in Relation zu der Position anderer Objekte in einem Bild gespeichert werden.

Ähnlich wie bei Jiang et al. (2000) wurde im Testbild der nachfolgend geschilderten Experimente entweder die gleiche Anzahl von Items wie im Gedächtnisbild präsentiert (All-Items-Bedingung) oder nur ein einzelnes Items (Single-Item- Bedingung). Diese Manipulation sollte Aufschluss darüber geben, ob das VKZG während GAFs den gleichen Prinzipien folgt wie das VKZG während Fixation (Jiang et al., 2000) und während Sakkaden (z.B. Carlson-Radvansky, 1999; Carlson-Radvansky und Irwin, 1995). Im Gegensatz zu früheren Studien waren in der vorliegenden Untersuchung jedoch immer mindestens zwei Items auf dem Monitor sichtbar: ein kritisches Item und das Fixationskreuz. Die Präsentation des Fixationskreuzes war deshalb nötig, weil eine GAF nicht ohne ein sich bewegendes Objekt aufrechterhalten werden kann. Aus diesem Grund waren relationale Informationen auch in der Single-Item-Bedingung niemals völlig abwesend. Das kritische Item konnte also grundsätzlich immer mit dem Fixationskreuz als Bezugspunkt lokalisiert werden.

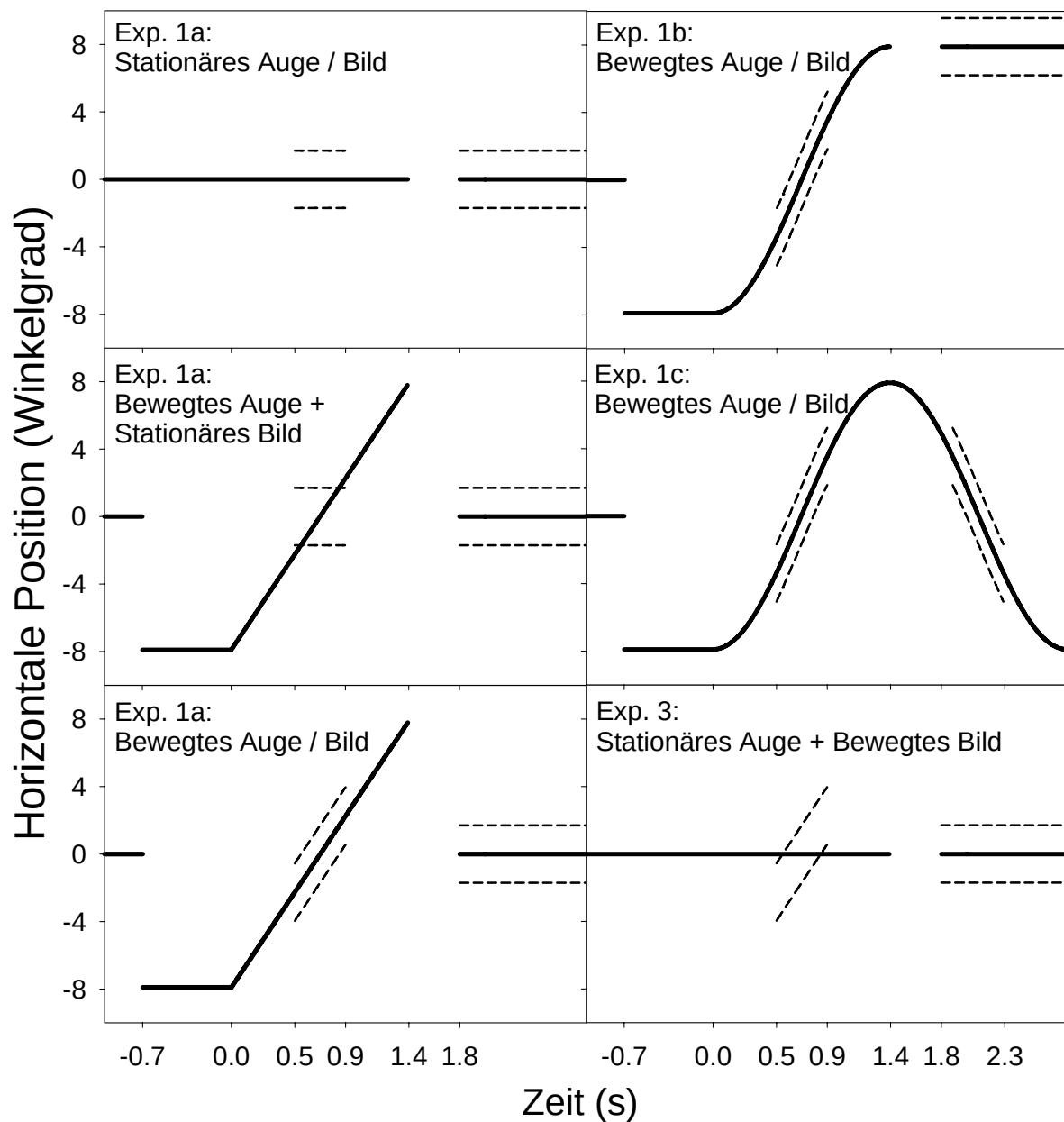


Abbildung 2.1 Raum-Zeit-Diagramm von Augen- und Bildbewegung in den Experimenten 1a bis 1c und 3. In jeder Grafik repräsentieren die fetten, durchgezogenen Linien die Trajektorie des Pursuit-Targets (ein Fixationskreuz), und die dünnen, gestrichelten Linien stellen die Trajektorien der Gedächtnis- und Testbilder dar. Die gestrichelten Linien auf der linken Seite einer jeden Grafik stellen das Gedächtnisbild dar, das die zu remembernden Items beinhaltet. Die gestrichelten Linien auf der rechten Seite einer jeden Grafik repräsentieren das Testbild, das das kritische Item enthält. Der Bewegungsbeginn des Pursuit-Targets wurde als Nullpunkt für zeitliche Skalierung gewählt. Das Zentrum des Bildschirms wurde als Position 0 festgelegt; negative Positionen repräsentieren Positionen auf der linken Seite des Monitors. In den vorliegenden Plots bewegt sich das Target also von links nach rechts über den Bildschirm. Exp. = Experiment.

2.2.1 Methode

Probanden

Alle Probanden der in diesem Teil der Arbeit geschilderten Experimente waren Studenten der Justus-Liebig-Universität Gießen und wurden für ihre Teilnahme an den Untersuchungen bezahlt. Die Versuchspersonen waren zwischen 19 und 43 Jahren alt und waren normalsichtig oder trugen entsprechende Sehhilfen (Brille oder „weiche“ Kontaktlinsen), um ihre Sehfehler zu korrigieren. An allen Experimenten nahmen nach Ausschluss unbrauchbarer Datensätze (siehe unten) je zwölf Probanden teil, mit Ausnahme von Experiment 1d, an dem nur elf Versuchspersonen teilnahmen. Während die Verfasserin, die an jedem der Experimente selbst teilnahm, über die experimentelle Fragestellung der jeweiligen Untersuchung informiert war, waren die übrigen Probanden naiv. Die Ergebnismuster der Verfasserin waren von denen der naiven Probanden nicht signifikant verschieden. Einige der naiven Probanden nahmen an mehr als einem Versuch teil, aber keiner von ihnen war über das experimentelle Design oder den theoretischen Hintergrund im Vorfeld aufgeklärt worden. Es erschien sinnvoll, geübte Beobachter für die Datenerhebung zu rekrutieren, weil untrainierte Probanden in der Regel große Schwierigkeiten damit haben, einem Target mit den Augen zu folgen und gleichzeitig ihre Aufmerksamkeit anderen Objekten zuzuwenden.

In den Experimenten 1b, 1c und 3 mussten die Daten jeweils einer Versuchsperson ausgeschlossen werden, weil ihre Leistung im Entdecken von Unterschieden zwischen Gedächtnis- und Testbild auf Zufallsniveau lag. In Experiment 1c mussten außerdem die Daten einer anderen Versuchsperson aufgrund zu schlechter GAFs von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Aus demselben Grund mussten in Experiment 1d die Daten von drei Beobachtern neu erhoben werden.

Material und Durchführung

Die Stimuli wurden auf einem 21 Zoll (53.34 cm) CRT-Monitor in einer Auflösung von 1280 (Höhe) x 1024 (Breite) Pixeln und mit einer vertikalen Bildwiederholungsfrequenz von 100 Hz präsentiert. Die Kopfposition der Probanden wurde mit Hilfe einer Kinnstütze in einer

Entfernung von 47 cm vom Bildschirm stabilisiert. Die Blickbewegungen der Versuchspersonen wurden mit einem am Kopf der Probanden befestigten videobasierten Blickbewegungsmessgerät aufgezeichnet (EyeLink II; SR Research, Ltd. Mississauga, Ontario, Kanada).

In jedem Durchgang (Trial) wurden zwei Bilder, durch ein Blank-Intervall (Leerintervall, in dem keinerlei Reize dargeboten wurden) voneinander getrennt, dargeboten. Das Gedächtnisbild (erstes Bild) enthielt drei, sechs oder zwölf Quadrate (die Anzahl der zu memorierenden Quadrate wird im Folgenden auch als Memory Set Size bezeichnet), die zufällig in der Stimulusmatrix positioniert wurden. Das Testbild (zweites Bild) zeigte entweder eine korrespondierende Anzahl von Quadraten wie das Gedächtnisbild oder ein einzelnes. Im Testbild wurde das kritische Quadrat durch eine $1.7 \times 1.7^\circ$ große, weiße Box gekennzeichnet. Die Quadrate selbst waren $1.2 \times 1.2^\circ$ groß und erschienen in einer unsichtbaren 10 (Spalten) $\times$ 12 (Reihen) Zellmatrix, die wiederum auf einer $17.0 \times 20.4^\circ$ großen Ebene aufgespannt war. Die Größe jeder einzelnen Zelle der Matrix betrug $1.7 \times 1.7^\circ$. Die beiden mittleren Reihen der Zellmatrix blieben immer leer, um eine GAF durch das Bild hindurch zu ermöglichen. Die Position jedes einzelnen Quadrates innerhalb einer Zelle wurde etwas „verwackelt“ (0.25° nach oben, nach unten, nach links und nach rechts). Die Stimuli erschienen auf einem gleichförmigen grauen Hintergrund, dessen Helligkeit 32 cd/m^2 betrug. Um Nachbilder zu vermeiden, wurde jedem einzelnen Pixel eines Quadrates ein zufälliger Grau-Wert zwischen schwarz (0 cd/m^2) und weiß (64 cd/m^2) zugewiesen (siehe Abbildung 2.2A). Dank dieser Prozedur war die mittlere Helligkeit der Quadrate annähernd die gleiche wie die des Hintergrunds bei einem maximalen Kontrast von 100%. Weil die Gesamtgröße der einzelnen Quadrate relativ groß war ($1.2 \times 1.2^\circ$) und weil sie aus $0.03 \times 0.03^\circ$ großen Pixeln erstellt waren, bestanden die Reize sowohl aus hohen als auch aus niedrigen räumlichen Frequenzen. In einem Trial waren alle Quadrate gleich, zwischen den Trials wurden den einzelnen Pixeln jedoch immer wieder neue Grau-Werte zugewiesen.

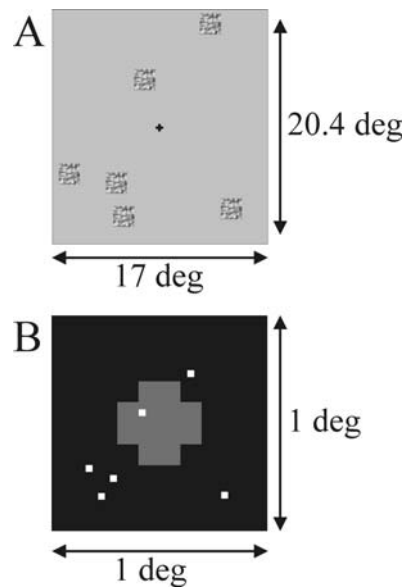


Abbildung 2.2 Schematische Darstellung der Stimuli. In den meisten Experimenten waren die Items im Gedächtnis- und Testbild Quadrate, die aus Pixeln zufällig ausgewählter Grauwerte (Feld A) bestanden. Anders als in dieser Abbildung entsprach die mittlere Helligkeit der Quadrate der Helligkeit des Hintergrunds. Die Größe der Zellmatrix betrug 17 x 20.4°. Die mittleren zwei Reihen waren immer frei, um eine GAF durch das Bild hindurch zu ermöglichen. In Experiment 2 bestand das Testbild aus einzelnen weißen Pixeln, die auf dem Pursuit-/Fixations-Target (Feld B) dargeboten wurden. Abkürzung: deg = degrees (englische Bezeichnung für Winkelgrad).

In der Single-Item-Bedingung wurde im Testbild nur ein Quadrat präsentiert. In der All-Items-Bedingung wurde im Testbild die gleiche Anzahl von Quadraten präsentiert wie im Gedächtnisbild. Das kritische Item wurde im Testbild mit einem Hinweisreiz (weiße Box) versehen und erschien entweder in der gleichen Position wie im Gedächtnisbild oder wurde in der Stimulusmatrix zufällig neu platziert. Zu Beginn eines jeden Durchgangs erschien ein schwarzes 0.4 x 0.4° großes Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms (siehe Abbildung 2.1). Wenn die Versuchspersonen bereit waren, einen Durchgang zu beginnen, drückten sie eine zuvor bestimmte Taste. Das Blickbewegungsmessgerät führte dann eine Drift-Korrektur durch, um eventuell aufgetretene Verlagerungen des auf dem Kopf des Probanden befestigten Aufzeichnungssystems zu korrigieren. War die Drift-Korrektur erfolgreich, wurde das Fixationskreuz rot. In der Bedingung mit stationärem Auge und stationärem Bild (diese Bedingung wird auch als Fixationsbedingung bezeichnet) verblieb das Fixationskreuz im

Bildschirmmittelpunkt und die Beobachter wurden instruiert, die Fixation auf dem Fixationskreuz aufrechtzuerhalten. Nach dem Drücken der Taste vergingen 1200 ms, bis das Gedächtnisbild erschien. Das Gedächtnisbild wurde für 400 ms präsentiert, nach einem Retentionsintervall von 900 ms wurde dann das Testbild dargeboten. Die Probanden wurden instruiert anzuzeigen, ob das kritische Quadrat seine Position verändert hatte. Bei einem stationären Bild könnte diese Entscheidung aufgrund der räumlichen Position des Reizes getroffen werden. Bei einem sich bewegenden Bild könnte die Entscheidung unter Berücksichtigung der retinalen Position des Items vollzogen werden.

In den Bedingungen mit einer GAF sprang das Fixationskreuz nach dem initialen Knopfdruck 8.0° nach links oder nach rechts. Es verblieb in dieser exzentrischen Position für 700 ms und begann sich dann zu bewegen. Binnen 700 ms war es den Beobachtern ohne weiteres möglich, das Fixationskreuz an seiner neuen exzentrischen Position wieder zu fixieren. Das Kreuz bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von $11.3^\circ/\text{s}$ in Richtung der Bildschirmmitte. Die Probanden sollten dem Kreuz so gut wie möglich mit ihren Augen folgen. 500 ms nach Bewegungsbeginn erschien das Gedächtnisbild und blieb für 400 ms sichtbar. Nach dem Verschwinden des Gedächtnisbilds bewegte sich das Kreuz für weitere 500 ms über den Monitor. Dadurch war die Trajektorie des Fixationskreuzes symmetrisch um den Mittelpunkt des Bildschirms. Nach einem Blank-Intervall von 400 ms erschien das Testbild in einer zentralen Bildschirmposition und die Versuchsteilnehmer wurden instruiert, das Fixationskreuz erneut zu fixieren. Der Unterschied zwischen der Augenfolgebewegungsbedingung mit stationärem Bild und der mit sich bewegendem Bild war nur der folgende: In der Augenfolgebewegungsbedingung mit stationärem Bild wurden sowohl das Gedächtnisbild als auch das Testbild an einer zentralen Position auf dem Bildschirm präsentiert, während sich das Fixationskreuz über den Bildschirm hinweg bewegte. Dies induzierte eine Bewegung des Gedächtnisbilds auf der Retina. Die Versuchsteilnehmer waren instruiert, die räumliche Position des kritischen Items zu beurteilen. In der Augenfolgebewegungsbedingung mit sich bewegendem Bild bewegte sich das Gedächtnisbild mit gleicher Geschwindigkeit wie das Fixationskreuz. Die Relationen zwischen dem Fixationskreuz und dem Bild waren in dieser Bedingung somit die gleichen

wie in der Fixationsbedingung, daher gab es in dieser Bedingung keine Bewegung des Bildes auf der Retina. Die Probanden waren instruiert, zu entscheiden, ob sich die Position der kritischen Items in Bezug auf die Fovea (d.h. das Fixationskreuz) verändert hatte. Das Testbild wurde so lange präsentiert, bis die Versuchspersonen per Mausklick ihr „Gleich-Verschieden“-Urteil abgegeben hatten. Ein akustisches Signal ertönte bei einer falschen Antwort. Die Beobachter sollten so genau wie möglich antworten, ohne dass es dabei auf die Geschwindigkeit ankam.

In 20% der Durchgänge, in denen eine Augenfolgebewegung durchzuführen war, wurde weder ein Gedächtnisbild noch ein Testbild dargeboten. Diese so genannten Blank-Trials dienten als Baseline-Trials für die Evaluierung der Smooth Pursuit-Leistung der Versuchsperson. Die so gewonnenen Daten wurden mit dem mittleren Smooth Pursuit-Gain in den Experimentalbedingungen (in denen ein Gedächtnis- und ein Testbild dargeboten wurde) verglichen.

Design

Die Daten der All-Items-Bedingung und die der Single-Item-Bedingung wurden an unterschiedlichen Tagen erhoben. Die Reihenfolge der Item-Bedingungen (all vs. single) wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. Für jede Item-Bedingung wurden die drei verschiedenen Blickbewegungsbedingungen (Fixation [stationäres Auge und stationäres Bild], Smooth Pursuit und stationäres bzw. sich bewegendes Bild) in Blöcken dargeboten. Die Fixationsbedingung und die Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem bzw. sich bewegendem Bild wurden in kleinen Blöcken von je 42 Trials von den Probanden durchlaufen. In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3, 6 oder 12 Quadrate) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung sie als nächstes zu bearbeiten hätten. Jede der drei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekaliert wurde (d.h. nach 126 Experimentaldurchgängen und 16 Blank-Trials). Die Abfolge der einzelnen Blöcke wurde nach einem Latin-Square-Design

variiert. Jeder Beobachter bearbeitete drei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, was 426 Durchgänge pro Item-Bedingung waren, also 852 Trials.

2.2.2 Ergebnisse

Zunächst wurden zahlreiche verschiedene Werte für jede experimentelle Bedingung berechnet: der Prozentsatz korrekter Antworten, die (Gedächtnis-)Sensitivität und der Antwortfehler. Weil die inferenzstatistischen Berechnungen für den Prozentsatz korrekter Antworten die Ergebnisse für die (Gedächtnis-)Sensitivität d' widerspiegeln und weil darüber hinaus keine konsistenten Effekte des Antwortfehlers zu beobachten waren, wird im Folgenden nur der Prozentsatz korrekter Antworten berichtet. Außerdem wurden diverse Maße zur Charakterisierung der Augenbewegungen berechnet: der Smooth Pursuit-Gain, die augenblickliche Augengeschwindigkeit und die Standardabweichung der Augenposition. Diese Augenbewegungsdaten sind in den Anhänge A und B dargestellt.

Prozentsatz korrekter Antworten

Vor der inferenzstatistischen Analyse (t-Test; Varianzanalyse = ANOVA [analysis of variance]) wurden die Prozentsätze korrekter Antworten arcsin transformiert (transformierter Prozentsatz korrekter Antworten = $2 * \arcsin(\text{Prozentsatz korrekter Antworten})^{0.5}$). Im Text und in den Abbildungen werden jedoch die untransformierten Werte berichtet, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die verschiedenen Experimente hinweg zu erzielen. Die Prozentsätze korrekter Antworten für die Experimente 1a bis 1d sind in Abbildung 2.3 graphisch dargestellt.

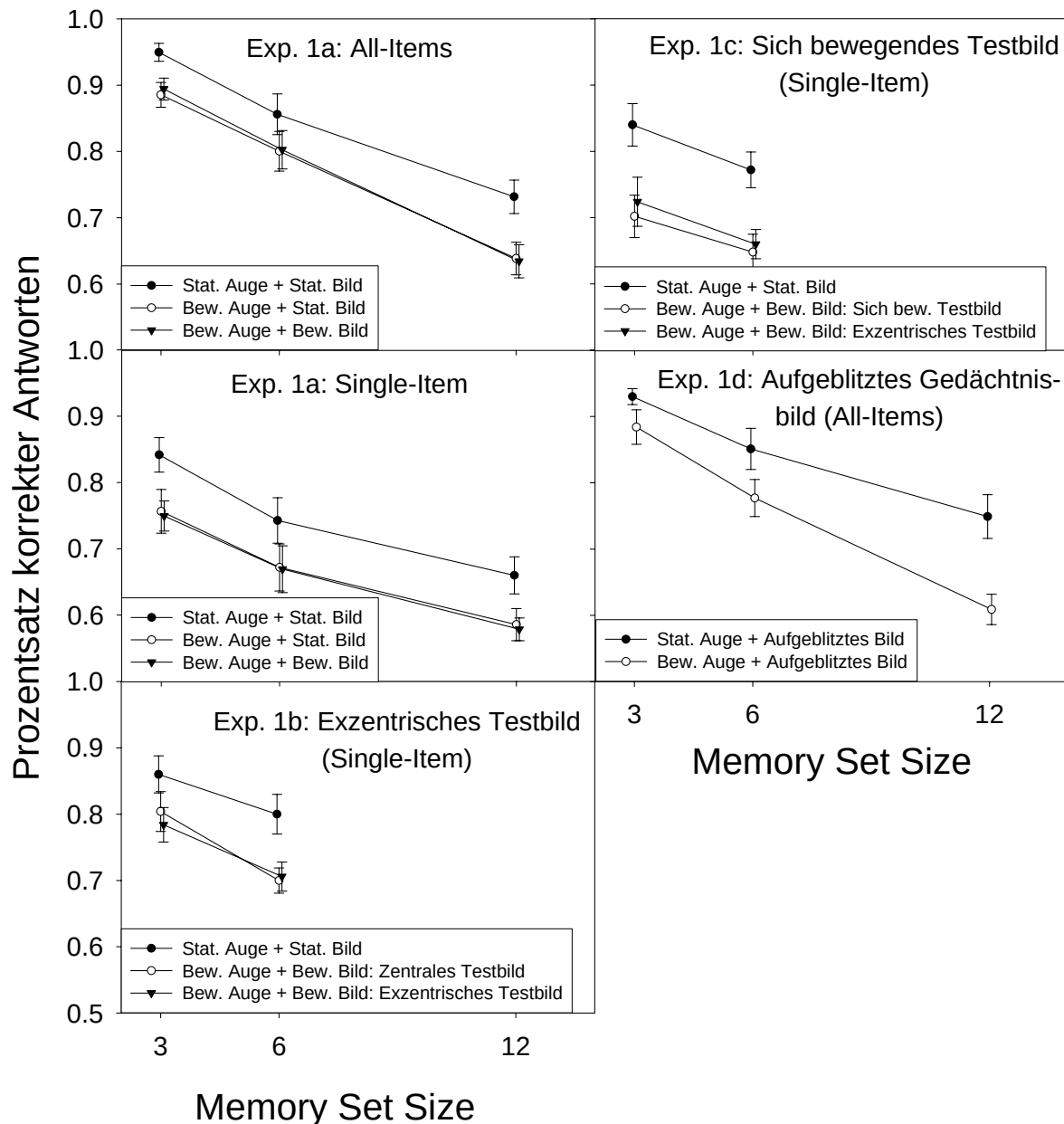


Abbildung 2.3 Die Ergebnisse aus Experiment 1. Dargestellt sind die mittleren Prozentsätze korrekter Antworten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) als Funktion der Memory Set Size (Anzahl zu erinnernder Items) und der Bewegungsbedingung. In Experiment 1b wurde das Testbild in einer exzentrischen Position dargeboten, so dass keine Sakkade zurück zum Bildschirmmittelpunkt mehr nötig war. In Experiment 1c wurde das Testbild während Smooth Pursuit gezeigt. In Experiment 1d wurde das Gedächtnisbild nur kurz aufgeblitzt („flashed“). Exp. = Experiment; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Die dreifaktorielle (Item-Bedingung X Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die arcsine-transformierten Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.85, 0.76 und 0.64 bei 3, 6 bzw. 12 Quadraten), $F(2,22) = 138.34$, $MSE = 3.622E-02$, $p < 0.001$). Der Prozentsatz korrekter Antworten war höher, wenn alle Quadrate im Testbild präsentiert wurden (0.80; All-Items-Bedingung), als wenn nur das kritische Item dargeboten wurde (0.70; Single-Item-Bedingung), $F(1,11) = 57.06$, $MSE = 6.975E-02$, $p < 0.001$. Der signifikante Haupteffekt der Blickbewegungsbedingung, $F(2,22) = 26.25$, $MSE = 3.722E-02$, $p < 0.001$, zeigte, dass der Prozentsatz korrekter Antworten am höchsten in der Fixationsbedingung war (0.80) und dann abfiel wenn sich entweder nur das Auge bewegte (0.72) oder aber wenn sich beide, Auge und Bild, bewegten (0.72). Die signifikante Zweifach-Interaktion aus Item-Bedingung und Memory Set Size, $F(2,22) = 16.08$, $MSE = 1.763E-02$, $p < 0.001$, deutete darauf hin, dass die Verschlechterung der Leistung bei größer werdender Memory Set Size in der Single-Item-Bedingung größer war als in der All-Items-Bedingung. Die t-Tests für jede einzelne Item-Bedingung bestätigten, dass der Unterschied zwischen der Fixationsbedingung und den Augenfolgebewegungsbedingungen statistisch signifikant war ($ps < 0.001$), während wiederum der Unterschied zwischen den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen nicht bedeutsam war ($ps > 0.5$).

Augenbewegungen

Jede einzelne Blickspur wurde zunächst individuell in Augenschein genommen. Durchgänge, in denen der Beobachter während der Präsentation des Gedächtnisbilds blinzelte oder in denen er dem Fixationskreuz offensichtlich nicht mit den Augen folgte, wurden von der Analyse grundsätzlich ausgeschlossen. Die Anzahl derart zurückgewiesener Trials betrug in keinem der Experimente mehr als 3%. Es wurde die mittlere Pursuit-Geschwindigkeit während der Darbietung des Gedächtnisbilds berechnet, nachdem alle Sakkaden aus der Blickspur entfernt wurden. Dazu wurde ein relativ sensitives Beschleunigungskriterium von $3250^\circ/s^2$ zum Aufspüren der Sakkaden benutzt, was es ermöglichte, auch kleine ruckartige Bewegungen des

Auges zu detektieren. Unter dem Begriff Pursuit-Gain, oder kurz nur Gain, versteht man den Quotienten aus der Pursuit-Geschwindigkeit (Geschwindigkeit des Auges einer Versuchsperson) und der tatsächlichen Reizgeschwindigkeit. Der Gain wird häufig herangezogen, um die Güte oder Qualität einer GAF zu charakterisieren. Ein hoher Gain spricht für eine gute Augenfolgebewegungsleistung und ist typischerweise mit dem Vorhandensein weniger Catch up-Sakkaden assoziiert. Der mittlere Pursuit-Gain für alle Experimente ist in Anhang A dargestellt. Der mittlere Gain war stets über 0.90. Er war geringfügig höher in der Blickbewegungsbedingung, in der sich das Gedächtnisbild mit dem Pursuit-Target bewegte (~ 0.99), als in den Kontrolldurchgängen (Blank-Trials zur Bestimmung der Baseline), in denen kein Bild dargeboten worden war (~ 0.97). Wenn die Probanden eine GAF durch das stationär dargebotene Bild ausführten, sank der Gain auf ~ 0.94 . Die beobachtete Abhängigkeit des Gains von dem Vorhandensein eines Hintergrundes ist konsistent mit den in der Literatur zu diesem Thema berichteten Befunden (Collewyn und Tamminga, 1984).

Berechnet wurde auch, wie sehr sich das Fixationskreuz auf der Retina der Probanden bewegte, während das Gedächtnisbild dargeboten wurde (siehe Anhang A). Wenn sich das Gedächtnisbild mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target bewegte, waren die Bewegung des Fixationskreuzes und die Bewegung des Bildes auf der Retina äquivalent. In diese Analyse wurden im Gegensatz zum oben beschriebenen Vorgehen die sakkadischen Abschnitte der Blickspur mit aufgenommen. Dies hatte jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Es wurden zwei Indices berechnet.

Zuerst wurde die absolute Augengeschwindigkeit zwischen zwei direkt aufeinander folgenden Datenpunkten der Blickbewegungsspur (4 ms-Seperation) während einer GAF und während der Fixation gemittelt. In den Augenfolgebewegungsbedingungen wurde vor der Mittelung die augenblickliche Target-Geschwindigkeit subtrahiert. Der Index schätzt daher die reine retinale Geschwindigkeit des Reizes. Wie man Anhang A entnehmen kann, war das Wackeln („Jitter“) des Targets auf der Retina zwei- bis dreimal höher während GAFs im Vergleich zur Fixationsbedingung (3 bis 4°/s vs. 7 bis 11°/s).

Zweitens wurde die Variabilität der Augenposition relativ zum Target berechnet, nachdem das mittlere „Voraussein“ oder „Hinterhersein“ des Auges abgezogen worden war. Wie in Anhang A zu sehen ist, war die Standardabweichung der Augenposition zwei- bis viermal größer während Smooth Pursuit als während Fixation ($0.16 - 0.33^\circ/\text{s}^2$ vs. 0.02 bis $0.09^\circ/\text{s}^2$). Es sollte an dieser Stelle jedoch beachtet werden, dass der zweite Index stärker durch das Auftreten von Sakkaden beeinflusst wird: Wenn sich die Position des Auges relativ zum Target aufgrund einer Sakkade verändert, wird die Abweichung relativ zur mittleren Position berechnet, die wiederum im Fall einer Sakkade zwischen den beiden Fixationspunkten liegt. Das kann zu einer hohen Variabilität führen, auch wenn das Auge die meiste Zeit unbewegt bleibt. Darüber hinaus wurde das mittlere „Voraus sein“ oder „Hinterhersein“ des Auges während der GAF berechnet (nicht berichtet für jedes Experiment). In allen Experimenten hing das Auge weniger als 0.2° hinter dem Target her.

Des Weiteren wurde der Prozentsatz der Durchgänge bestimmt, in denen eine Sakkade während der Präsentation des Gedächtnisbilds aufgetreten war. Zusätzlich wurde die mittlere Anzahl, die Dauer und die Größe dieser Sakkaden berechnet (siehe dazu Anhang B). Für diese Analyse wurde der Output des EyeLink II-Augenbewegungs-Parsers verwendet. Dieser Parser klassifiziert Episoden der Blickspur als Sakkaden, in denen die Beschleunigung größer als $400^\circ/\text{s}^2$ und die Geschwindigkeit größer als $22^\circ/\text{s}$ ist. Aus Anhang B wird ersichtlich, dass Sakkaden kleiner als 1° recht häufig während der GAFs auftraten (30% bis 50% aller Trials).

Um den Einfluss von Catch up-Sakkaden auf die Detektionsaufgabe zu prüfen, wurde die Varianzanalyse nur mit den Durchgängen wiederholt, in denen von den Probanden keinerlei Sakkaden gemacht worden waren. In keinem der hier berichteten Experimente veränderte dies die Ergebnisse. Dies zeigt, dass die Sakkaden nicht wesentlich zu den Ergebnissen beigetragen haben können. Das ist andererseits aber auch nicht überraschend, weil – wie bereits berichtet – die Sakkaden sehr klein ($< 1^\circ$) und von kurzer Dauer (~ 20 ms) waren im Vergleich zur Präsentationsdauer der Gedächtnisbilds (~ 400 ms). Frühere Arbeiten konnten nachweisen, dass eine sakkadische Suppression nicht für kleine Sakkaden auftritt ($< 2^\circ$; siehe Ross et al., 2001).

2.2.3 Diskussion

Das erste Experiment lieferte drei Hauptergebnisse:

Erstens zeigte das Experiment, dass das VKZG für die Position eines Objekts während GAFs nicht dysfunktional ist. Ganz im Gegenteil lag die Leistung der Probanden während Smooth Pursuit weit über dem Zufallsniveau. Zweitens gab es keine Leistungsunterschiede zwischen den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen, was es wiederum unwahrscheinlich macht, dass das VKZG für Objektpositionen während GAFs strikt räumlich oder retinozentrisch ist. Genauer gesagt, machte es keinen Unterschied, ob sich die Reize mit gleicher Geschwindigkeit wie das Auge bewegten oder ob sie stationär dargeboten wurden. In Übereinstimmung mit Untersuchungen zum transsakkadischen Gedächtnis scheint das VKZG für die Position von Objekten während GAFs relativ abstrakt zu sein. Des Weiteren steht mit dieser Schlussfolgerung die Tatsache in Einklang, dass es möglich war, die Befunde von Jiang et al. (2000) zu replizieren, die herausgefunden hatten, dass die Beseitigung von relationalen Positionsinformationen das VKZG für Objektpositionen beeinträchtigt. Wenn alle Quadrate im Testbild präsentiert wurden, war die Leistung der Probanden besser als wenn nur das kritische Item gezeigt wurde. Dieser Befund ließ sich sowohl während Fixation als auch während Smooth Pursuit beobachten. Daher lässt sich folgern, dass das VKZG für die Position von Objekten während GAFs denselben Prinzipien folgt wie das VKZG für die Position von Objekten bei Fixation. Drittens war die Leistung der Versuchspersonen am besten, wenn sie keine GAF ausführen mussten, d.h. wenn sie das Fixationskreuz bei einer retinalen wie auch räumlichen Überlagerung des Gedächtnis- und des Testbilds lediglich fixieren sollten. Die Kapazität des VKZG betrug 4.2 Items in der Fixationsbedingung und verringerte sich um ein Item auf 3.1 in den Augenfolgebewegungsbedingungen.¹

¹ Um die Anzahl der Items zu bestimmen, die ein Proband gespeichert haben müsste, um 80% korrekte Antworten zu produzieren, fand folgende Methode Anwendung (Irwin und Zelinsky, 2002): Die Ergebnisse wurden um den Einfluss von Rateantworten korrigiert unter Verwendung der Formel $p = (x - g)/(1 - g)$, wobei x der Original-Prozentsatz korrekter Antworten ist, g die Ratewahrscheinlichkeit (immer 0.5) und p der korrigierte Prozentsatz korrekter Antworten (Busey und Loftus, 1994). Anschließend wurde p mit der Anzahl der Objekte im Display multipliziert um die Anzahl der erinnerten Objekte zu schätzen (Sperling, 1960).

Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, weil in der Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Gedächtnisbild der retinale Input im Mittel ungefähr der gleiche war wie der in der Fixationsbedingung (stationäres Auge und stationäres Gedächtnisbild): Der Smooth Pursuit-Gain in dieser Bedingung war nahe Eins (0.99). Folglich war das Gedächtnisbild näherungsweise stabil auf der Retina. Nichtsdestotrotz war der augenblickliche retinale Jitter (wie in Anhang A abgebildet) stärker bei GAFs. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in Experiment 1d die Frage geklärt wird, ob dieser Unterschied den Leistungsabfall erklären kann.

Die Verschlechterung des VKZG für Objektpositionen während GAFs im Vergleich zu einer Fixationsbedingung ist konsistent mit den in der Einleitung geschilderten Ideen: Zum einen ist es möglich, dass sowohl die egozentrische wie auch die retinozentrische Position eines Items im VKZG gespeichert wird, so dass Bewegung in dem einen oder dem anderen Referenzsystem (wie in den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen) zu einer Leistungseinbuße im Vergleich zur Fixationsbedingung kommt. Zum anderen ist es möglich, dass für die Durchführung einer GAF visuell-räumliche und zentrale Ressourcen benötigt werden, die dann jedoch nicht mehr für die Gedächtnis- bzw. Detektionsaufgabe zur Verfügung stehen. Diese beiden Annahmen wurden in den Experimenten 2 und 3 überprüft.

Außerdem soll hier betont werden, dass der Leistungsabfall aufgrund des Smooth Pursuits nicht mit der Anzahl der Items im Testbild interagiert (Blickbewegungsbedingung X Single-Item-Bedingung vs. All-Items-Bedingung; $p = 0.78$). Dieser Befund ist interessant, weil argumentiert werden könnte, dass die Wahrnehmung der Position während der GAF verzerrt war, was in einer verminderten Leistung im Vergleich zur Fixationsbedingung resultiert. Solch eine Annahme würde einen großen Unterschied zwischen der Single-Item-Bedingung und der All-Items-Bedingung mit Smooth Pursuit im Vergleich zur Fixationsbedingung vorhersagen. In der Single-Item-Bedingung ist die räumliche Position eines Items wichtiger, weil der Bezugsrahmen, den die restlichen Items bilden, während des Abrufs entfernt wird. Eine beobachterzentrierte Objektlokalisierung während GAFs (nicht so sehr während Fixation) erfordert die Integration sowohl retinaler als auch extraretinaler Signale, welche unter bestimmten Umständen fehlerhaft sein können (siehe Schlag und

Schlag-Rey, 2002, für einen Überblick). Im Gegensatz dazu ermöglicht die All-Items-Bedingung eine distanz-basierte Objektlokalisierung einzelner Elemente relativ zu den übrigen Elementen und benötigt keine Informationen über die Position des Auges. Deshalb würde man in der Single-Item-Bedingung während Smooth Pursuit eine besonders schlechte Leistung erwarten.

Dessen ungeachtet unterscheiden sich Bedingungen, die Mislokalisationen aufgrund von Augenbewegungen produzieren, normalerweise erheblich von den hier verwendeten Bedingungen. Dies erklärt sich folgendermaßen: Erstens waren in früheren Studien, die sich mit der Lokalisation von Objekten während GAFs beschäftigt haben, die Präsentationszeiten der Targets extrem kurz („Blitze“ von weniger als 100 ms). Daher könnten die Unterschiede in den Latenzen zwischen dem extraretinalen und dem retinalen Signal zu Fehlern geführt haben (z.B. Brenner, Smeets und van den Berg, 2001; Kerzel, 2000; Mateeff, Yakimoff und Dimitrov, 1981; Mitrani und Mateeff, 1981). Zweitens wurden die Targets in Isolation oder in vollkommener Dunkelheit dargeboten, um beobachterzentrierte (räumliche) und augenzentrierte (retinozentrische) Lokalisation voneinander zu trennen (Brenner et al., 2001; Kerzel und Gegenfurtner, 2003). Im Gegensatz dazu wurden in der vorliegenden Studie die Stimuli für eine relativ lange Zeit präsentiert (400 ms) und das Labor war hell erleuchtet, so dass viele kontextuelle Hinweisreize (einschließlich des Fixationskreuzes) auch in der Single-Item-Bedingung vorhanden waren. Diese Tatsache könnte erklären, warum die Leistung in der Single-Item-Bedingung für Augenfolgebewegungsbedingungen nicht schlechter war als für die Fixationsbedingung.

Bevor man jedoch die Schlussfolgerung ziehen kann, dass die Kapazität des VKZG für die Position von Objekten während GAFs reduziert ist, müssen Alternativerklärungen für die Resultate ausgeschlossen werden. In Experiment 1b werden Sakkaden als möglicher Grund für die verschlechterte Leistung während Smooth Pursuit ausgeschlossen, in Experiment 1c Effekte des Abruf-Kontextes und in Experiment 1d retinaler „Jitter“ aufgrund nicht perfekten Pursuits (siehe Abbildung 2.1). Um dieses Ziel zu erreichen, wurden in den nachfolgenden Experimenten systematisch Position, Bewegung und Präsentationsdauer des Testbilds variiert.

2.3 Experiment 1b: Exzentrisches Testbild

In Experiment 1a mussten die Versuchspersonen am Ende der GAF eine Sakkade zurück zum Mittelpunkt des Bildschirms ausführen, bevor sie das Gedächtnisbild mit dem Testbild vergleichen konnten. Es ist möglich, dass diese Sakkade zurück zur Bildschirmmitte zu der beobachteten Leistungsver schlechterung in den beiden Smooth Pursuit-Bedingungen geführt hat. Um die Sakkade von der finalen, exzentrischen Position der Trajektorie zum Bildschirmmittelpunkt zu verhindern, wurde in Experiment 1b das Testbild am Ende der Trajektorie präsentiert. Außerdem wurde das Geschwindigkeitsprofil der Trajektorie sinusoidal verändert, um den Anfang und das Ende der GAF zu glätten. Dieses Vorgehen erlaubte den Versuchspersonen einen fließenden Übergang von Fixation zu GAF (und umgekehrt), und vermindert so sakkadische Augenbewegungen (z.B. Collewyn und Tamminga, 1984).

2.3.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: Die Fixationsbedingung (stationäres Auge und stationäres Gedächtnisbild) und zwei Varianten der Augenfolgebewegungsbedingung mit sich bewegendem Gedächtnisbild wurden getestet. Die erste Variante der Augenfolgebewegungsbedingung war wie die in Experiment 1a: Nach der Präsentation des Gedächtnisbilds und dem Retentionsintervall von 500 ms sprang das Fixationskreuz zurück zum Bildschirmmittelpunkt, wo das Testbild dargeboten wurde. In der zweiten Variante wurde das Testbild um die letzte Position des Fixationskreuzes herum präsentiert. Das bedeutet, dass sich das Fixationskreuz von seinem Startpunkt aus (der bei 8°

Exzentrizität lag) in die entgegengesetzte Richtung bewegte und bei 8° auf der anderen Seite des Monitors zum Stillstand kam. Das Fixationskreuz verblieb in dieser Position, bis die Probanden ihr Urteil abgegeben hatten. Um Sakkaden zu vermeiden, waren der On- und Offset der Trajektorie in den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen geglättet: Das Geschwindigkeitsprofil der Trajektorie war sinusoidal mit einer Amplitude von 8.0° und einer zeitlichen Frequenz von 0.38 Hz (d.h. ein halber Zyklus dauerte 1300 ms). Nur die Bedingung, in der das kritische Quadrat alleine im Testbild präsentiert wurde, wurde getestet (Single-Item-Bedingung).

Die Fixationsbedingung und die zwei Augenfolgebewegungsbedingungen wurden in kleinen Blöcken von je 28 Trials durchlaufen. In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3 oder 6 Quadrate) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung sie als nächste zu bearbeiten hätten. Jede der drei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekaliert wurde (d.h. nach 84 Experimentaldurchgängen und 12 Blank-Trials). Jeder Beobachter bearbeitete drei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, also insgesamt 288 Trials.

2.3.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert, und die mittleren Prozentsätze korrekter Antworten sind in Abbildung 2.3 graphisch dargestellt.

Die zweifaktorielle (Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten bestätigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.76 und 0.70 bei 3 bzw. 6 Quadraten), $F(1,11) = 16.79$, $MSE = 2.651E-02$, $p < 0.005$). Der signifikante Haupteffekt der Blickbewegungsbedingung, $F(2,22) = 16.82$, $MSE = 4.509E-02$, $p < 0.001$, zeigte, dass der Prozentsatz korrekter Antworten am höchsten in der Fixationsbedingung war (0.81) und dann abfiel, wenn am Ende der Augenfolgebewegung das Testbild an der letzten Position der

Trajektorie dargeboten wurde (0.69) und wenn das Testbild wie in Experiment 1a zentral präsentiert wurde (0.68). Die Interaktion war nicht signifikant ($p > 0.70$). Die t-Tests für die einzelne Blickbewegungsbedingung bestätigten, dass der Unterschied zwischen der Fixationsbedingung und den Augenfolgebewegungsbedingungen statistisch signifikant war ($p_s < 0.005$), während der Unterschied zwischen den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen nicht bedeutsam war ($p_s > 0.603$).

2.3.3 Diskussion

Das Entfernen der großen „Rückwärts-Sakkade“ vom experimentellen Protokoll veränderte die Ergebnisse in keiner Weise. Die Kapazität des VKZG für die Position von Objekten fiel von 2.8 Items während Fixation auf 1.7 Items während Smooth Pursuit. Dieses Resultat macht es unwahrscheinlich, dass Prozesse, die mit der Kontrolle von Sakkaden oder mit deren Ausführung assoziiert sind, für die verschlechterte Gedächtnisleistung während GAFs in Experiment 1a ursächlich sind.

2.4 Experiment 1c: Sich bewegendes Testbild

Eine mögliche weitere Erklärung für die Ergebnisse aus Experiment 1a bestünde in der Annahme, dass in der Fixationsbedingung der Enkodier- und der Abrufkontext der gleiche war, während er in den Augenfolgebewegungsbedingungen unterschiedlich war: Das Gedächtnisbild wurde den Probanden während Smooth Pursuit gezeigt, das Testbild wurde hingegen stationär präsentiert. Im Gegensatz dazu wurden beide, das Gedächtnis- und das Testbild, in der Fixationsbedingung stationär dargeboten. Die Leistungseinbußen in den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen könnten daher in einer falschen Zuordnung der Hinweisreize, die während Speicherung und Abruf der Reize zugegen waren, ihre Ursache haben. Um diese Annahme zu überprüfen, wurde Experiment 1c durchgeführt, in dem das Testbild während der GAF dargeboten wurde. Das bedeutet, dass die Versuchspersonen

zunächst einem Target mit den Augen folgten, das sich von einer Seite des Bildschirms auf die andere bewegte. Während dieser Zeit wurde das Gedächtnisbild dargeboten. Dann machte das Pursuit-Target kehrt und bewegte sich wieder zurück in Richtung seiner Startposition. Sozusagen auf dem „Rückweg“ des Pursuit-Targets wurde das Testbild präsentiert. Die Präsentationsdauer des Testbilds wurde dabei mit der des Gedächtnisbilds in Übereinstimmung gebracht (400 ms) und war über die experimentellen Bedingungen hinweg immer gleich.

2.4.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: Die Fixationsbedingung und zwei Varianten der Augenfolgebewegungsbedingung mit sich bewegendem Gedächtnisbild wurden getestet. In allen Bedingungen wurde das Retentionsintervall von 900 ms auf 1.0 s herauf gesetzt. Das Testbild, das bisher so lange dargeboten wurde, bis die Versuchspersonen ihr Urteil abgegeben hatten, wurde in diesem Experiment nur noch für 400 ms präsentiert. Die gleiche geglättete Trajektorie wie in Experiment 1b fand Verwendung. In der einen Augenfolgebewegungsbedingung erschien das Testbild, während das Fixationskreuz am Ende der Trajektorie in einer exzentrischen Position verblieb. In der anderen Augenfolgebewegungsbedingung wurde das Testbild, wie oben schon erwähnt, während der GAF auf dem „Rückweg“ zur ursprünglichen Startposition des Trials präsentiert. Das Gedächtnis- und das Testbild wurden in einem Intervall von 200 ms, bevor das Zentrum des Bildes den Bildschirmmittelpunkt passiert hatte, bis 200 ms, nachdem es den Mittelpunkt passiert hatte, dargeboten. Nur die Bedingung, in der das kritische Quadrat alleine im Testbild präsentiert wurde, wurde getestet (Single-Item-Bedingung).

Die Fixationsbedingung und die zwei Augenfolgebewegungsbedingungen wurden in kleinen Blöcken von je 28 Trials durchlaufen. In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3 oder 6 Quadrate) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung sie als nächste zu erwarten hätten. Jede der drei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekaliert wurde (d.h. nach 84 Experimentaldurchgängen und 12 Blank-Trials). Jeder Beobachter bearbeitete drei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, d.h. insgesamt 288 Trials.

2.4.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert und der mittlere Prozentsatz korrekter Antworten ist in Abbildung 2.3 graphisch dargestellt.

Die zweifaktorielle (Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten bestätigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.82 und 0.74 bei 3 bzw. 6 Quadraten), $F(1,11) = 45.50$, $MSE = 1.857E-02$, $p < 0.001$). Der signifikante Haupteffekt der Blickbewegungsbedingung, $F(2,22) = 7.58$, $MSE = 5.688E-02$, $p < 0.005$, zeigte, dass der Prozentsatz korrekter Antworten am höchsten in der Fixationsbedingung war (0.83) und dann abfiel, wenn das Testbild während Smooth Pursuit stationär dargeboten wurde (0.75) und wenn es bewegt präsentiert wurde (0.74). Die Interaktion war nicht signifikant ($p > 0.70$). Die t-Tests für die einzelne Blickbewegungsbedingung bestätigten, dass der Unterschied zwischen der Fixationsbedingung und den Augenfolgebewegungsbedingungen statistisch signifikant war ($ps < 0.025$), während der Unterschied zwischen den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen nicht bedeutsam war ($ps > 0.664$).

2.4.3 Diskussion

Die Ergebnisse spiegeln die in den Experimenten 1a und 1b gewonnenen Resultate wider. Die Kapazität des VKZG für die Position von Objekten fiel von 3.0 Items während Fixation auf 2.2 Items während Smooth Pursuit. Die Leistungseinbußen in den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen im Vergleich zur Fixationsbedingung in Experiment 1a können daher nicht durch Unterschiede zwischen den jeweiligen Enkodierungs- und Abrufkontexten erklärt werden.

2.5 Experiment 1d: Aufgeblitztes („flashed“) Gedächtnisbild

Auch wenn der Smooth Pursuit-Gain hoch ist, führt die Variabilität in der Geschwindigkeit des Auges doch dazu, dass sich das retinale Abbild der Reize leicht bewegt (siehe Anhang A). Da das visuelle System Augenbewegungen bis zu einem gewissen Grad kompensiert, so dass uns die visuelle Welt um uns herum während GAFs annähernd stabil erscheint, könnte man argumentieren, dass dieses Wackeln die Gedächtnisleistung nicht beeinträchtigen sollte.²

Nichtsdestoweniger sollte die Möglichkeit ausgeschlossen werden, dass die höhere retinale Geschwindigkeit während einer GAF für die Leistungsver schlechterung der VKZG während Smooth Pursuit ursächlich ist. Aus diesem Grund wurde das Gedächtnisbild in Experiment 1d sowohl während Fixation als auch während Smooth Pursuit lediglich kurz aufgeblitzt. Das Gedächtnisbild wurde für einen Bildaufbauzyklus präsentiert, was einer Präsentationsdauer von weniger als 10 ms entspricht. Dieses Vorgehen führte dazu, dass das Bild der Quadrate auf der Retina stabilisiert wurde, weil sich das Auge in einer so kurzen Zeit nicht wesentlich bewegen kann. Darüber hinaus wurde nur die All-Items-Bedingung getestet, so dass die Position des Auges relativ zum Display nicht von Bedeutung war, weil die

² Während GAFs wird die Geschwindigkeit des Auges leicht unterschätzt, so dass ein stationärer Hintergrund als sich entgegen der Bewegungsrichtung des Auges bewegend wahrgenommen wird (Filehne-Illusion; Mack und Herman, 1973). Dennoch scheint die Welt nicht zu springen bei jeder kleinen ruckartigen Augenbewegung während Smooth Pursuit, so dass eine Kompensation ganz offensichtlich stattfindet.

Versuchspersonen ihr Urteil ohnehin ausschließlich auf Basis der Relationen innerhalb der Items (d.h. dem Muster) fällen konnten.

2.5.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: Die Fixationsbedingung und eine Augenfolgebewegungsbedingung wurden getestet. Die Länge der Trajektorie betrug wie in Experiment 1a 1.4 s, aber das Gedächtnisbild wurde nur für einen Bildaufbauzyklus dargeboten. Weil die Stimuli (Quadrate) aus Experiment 1a bei dieser kurzen Darbietungsdauer nicht zu sehen waren, wurden dunkelgraue Quadrate mit einer Helligkeit von 2 cd/m^2 verwendet. Nur die Bedingung mit allen Quadraten im Testbild (All-Items-Bedingung) wurde getestet.

Die Fixationsbedingung und die Augenfolgebewegungsbedingung wurden in kleinen Blöcken von je 30 Trials durchlaufen. In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3, 6 oder 12 Quadrate) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Jede der zwei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekali­briert wurde (d.h. nach 60 Experimentaldurchgängen und 12 Blank-Trials). Jeder Beobachter bearbeitete zwei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, d.h. 288 Trials.

2.5.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert, und der mittlere Prozentsatz korrekter Antworten ist in Abbildung 2.3 graphisch dargestellt.

Durchgänge, in denen eine Sakkade während der Darbietung des Gedächtnisbilds auftrat, wurden von der Analyse ausgeschlossen (1.4%). Die zweifaktorielle (Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.91, 0.81 und 0.70 bei 3, 6 bzw. 12 Quadraten), $F(2,20) = 99.39$, $MSE = 1.988E-02$, $p < 0.001$). Der Prozentsatz korrekter Antworten war höher in der Fixationsbedingung (0.84) als in der Augenfolgebewegungsbedingung (0.76), $F(1,10) = 15.70$, $MSE = 5.224E-02$, $p < 0.003$. Die Interaktion war nicht signifikant ($p > 0.30$).

2.5.3 Diskussion

Die Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse der Experimenten 1a bis 1c wider: Die Kapazität des VKZG für die Position von Objekten verringerte sich um ungefähr ein Item von 4.8 Items während Fixation auf 3.6 Items während Smooth Pursuit. Die retinale Geschwindigkeit des Gedächtnisbilds kann also weder die Leistungseinbußen in den beiden Augenfolgebewegungsbedingungen im Vergleich zur Fixationsbedingung in Experiment 1a noch den Unterschied zwischen den zwei Blickbewegungsbedingungen im aktuellen Experiment erklären.

2.6 Experiment 2: Miniatur-Bild in der Fovea

Experiment 2 wurde entwickelt, um den Wahrheitsgehalt der verschiedenen Erklärungsansätze für den Leistungsabfall in den beiden Pursuit-Bedingungen in Experiment 1a zu testen. Zu diesem Zweck wurden Miniatur-Gedächtnis- und Testbilder präsentiert, die

gänzlich im Target der GAF (d.h. in der Fovea) enthalten waren. Nur die Fixationsbedingung und die Augenfolgebewegungsbedingung mit sich bewegendem Gedächtnisbild wurden getestet. Wenn GAFs eine Fokussierung der Aufmerksamkeit auf das Target der Augenbewegung bedingten (was zu einer verschlechterten Verarbeitung peripherer Reize führt), sollte dieser Leistungsabfall verschwinden, wenn die Items des Gedächtnisbilds foveal präsentiert werden. Wie schon in der Einleitung geschildert, gibt es eine ganze Reihe von Gründen zu glauben, dass visuell-räumliche Aufmerksamkeit während GAFs an den Zielreiz dieser Bewegung gekoppelt ist. Wenn jedoch die Veränderung der räumlichen Position exklusiv für den Leistungsabfall in Experiment 1 verantwortlich war, dann sollte der Unterschied zwischen der Fixationsbedingung und der Augenfolgebedingung unter der Verwendung von Miniatur-Bildern bestehen bleiben. In ähnlicher Weise sollten die Unterschiede zwischen Fixation und Smooth Pursuit trotz der Präsentation von Miniatur-Bildern fortbestehen, wenn die Leistungsver schlechterung auf zentrale Leistungsbegrenzungen zurückgeht.

2.6.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: Ein $1.0 \times 1.0^\circ$ großes schwarzes Quadrat mit einem $0.4 \times 0.4^\circ$ großen grauen Fixationskreuz im Inneren fungierte als Fixations-Target (siehe Abbildung 2.2B). Einzelne weiße Pixel wurden als Bildelemente benutzt. Diese Pixel wurden in einem um den Mittelpunkt des Quadrates positionierten 10×10 -Gitter ($0.75 \times 0.75^\circ$) präsentiert. Jede Zelle bestand aus einem Pixel und einem 0.5-Pixel großen Puffer. Der Abstand zwischen zwei Target-Pixeln betrug folglich einen Pixel. Nur die All-Items-Bedingung wurde getestet. In diesem Experiment wurde das

kritische Item des Testbilds nicht mit einer weißen Box versehen (also kein Hinweisreiz). Getestet wurden eine Fixationsbedingung und eine Smooth Pursuit-Bedingung, in der die Probanden das ganze sich bewegende Miniatur-Bild mit den Augen verfolgen sollten. Die Fixationsbedingung und die Augenfolgebewegungsbedingung wurden in kleinen Blöcken von je 60 Trials durchlaufen (plus 12 Blank-Trials in der Augenfolgebewegungsbedingung). In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3, 6 oder 12 Quadrate) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Die Reihenfolge der Blöcke war über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. Jeder Beobachter bearbeitete zwei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, d.h. insgesamt 264 Trials.

2.6.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert, und der mittlere Prozentsatz korrekter Antworten ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die zweifaktorielle (Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.95, 0.85 und 0.70 bei 3, 6 bzw. 12 Quadraten), $F(2,22) = 77.10$, $MSE = 4.384E-02$, $p < 0.001$).

Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Fixationsbedingung (0.85) und der Augenfolgebewegungsbedingung (0.82), $F(1,11) = 2.01$, $MSE = 3.603E-02$, $p = 0.184$. Die Interaktion war nicht signifikant ($p > 0.50$).

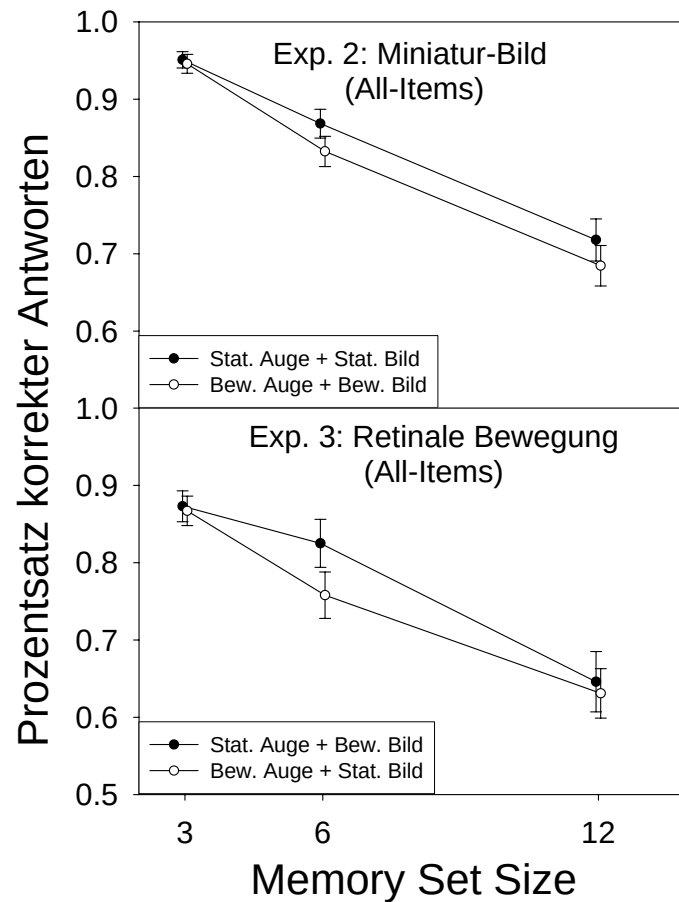


Abbildung 2.4 Die Ergebnisse aus den Experimenten 2 und 3. Dargestellt sind die mittleren Prozentsätze korrekter Antworten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) als eine Funktion der Memory Set Size (Anzahl zu erinnernder Items) und der Bewegungsbedingung. In Experiment 2 wurde das Bild in der Fovea präsentiert. In Experiment 3 bewegte sich das Bild in der Bedingung mit stationären Augen. Exp. = Experiment; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

2.6.3 Diskussion

Mit dem Miniatur-Bild auf dem Pursuit-Target verschwand plötzlich der hoch reliable Leistungsunterschied zwischen der Fixationsbedingung und der Augenfolgebewegungsbedingung aus Experiment 1. Die VKZG-Kapazität betrug in der Fixationsbedingung 4.9 und in der Augenfolgebewegungsbedingung 4.5 Items. Dieser Unterschied ist nur halb so groß wie der in Experiment 1 beobachtete. Dieses Ergebnis spricht

deshalb deutlich für einen Erklärungsansatz, der die Aufmerksamkeitsfokussierung während Smooth Pursuit berücksichtigt: Während GAFs wird die Aufmerksamkeit stark auf das Pursuit-Target fokussiert, was wohl dazu geführt hat, dass die Verarbeitung peripherer Reize in Experiment 1 beeinträchtigt wurde. Im Gegensatz dazu war das foveal dargebotene Bild im Focus der Aufmerksamkeit enthalten. Deswegen hat die GAF in diesem Fall keinen nachteiligen Einfluss auf das VKZG.

Eine andere Erklärung der Resultate wäre, dass die höhere Sehschärfe in der Fovea die Leistung während Smooth Pursuit verbessert hat. Dieser Ansatz birgt allerdings zwei Probleme: Zum einen wurden die Items während Pursuit und während Fixation dargeboten. Daher sollten beide Bedingungen gleichermaßen von der höheren retinalen Sehschärfe in der Fovea profitieren. Zum anderen war das Verhältnis von Raum zwischen den einzelnen Elementen des Bildes und dem retinalen „Jitter“ in diesem Experiment sehr viel kleiner als in den vorherigen Experimenten ($1.7 / 0.16 = 10.6$ in Experiment 1a; $0.03 / 0.13 = 0.23$ in Experiment 2). Frühere Studien haben gezeigt, dass die Wahrnehmung leidet, wenn während GAFs feine Details (hohe räumliche Frequenzen) gezeigt werden (Long und Homolka, 1992; Murphy, 1978). Der Grund dafür ist, dass feine Details verschmieren, wenn sie sich über die Retina bewegen. Auf Basis dieser perzeptuellen Faktoren könnte man erwarten, dass die Leistung unter Verwendung von kleinen, auf der Retina präsentierten Bildern schlecht ist. Gleichwohl war die Leistung im vorliegenden Experiment besser. Dieses Befundmuster spricht also eher für den aufmerksamkeits-basierten Erklärungsansatz.

Unter Berücksichtigung der verbleibenden Mechanismen, die das VKZG für die Position von Objekten während GAFs beeinträchtigen könnten, kann auf Grundlage der präsentierten Ergebnisse vorläufig folgende Antwort gegeben werden: Weil die Veränderungen der räumlichen Position in diesem Experiment genau die gleichen waren wie in der Augenfolgebewegungsbedingung mit sich bewegendem Bild in Experiment 1, scheint die räumliche Position eines Items keine größere Rolle für die VKZG-Leistung zu spielen. Wenn die räumliche Position für die Speicherung und den Abruf von Positionsinformationen im VKZG wichtig wäre, dann hätte die Leistung auch in der Smooth Pursuit-Bedingung mit in der Fovea präsentierten Miniatur-Bildern abfallen müssen. Dies war jedoch nicht der Fall,

zumindest dann nicht, wenn die (Veränderungen aufgrund von) Bewegung auf ein Referenzsystem (räumliche Position) beschränkt blieb. Auch die Annahme einer zentralen Leistungsbegrenzung kann nicht erklären, warum kein Unterschied zwischen der Smooth Pursuit-Bedingung und der Fixationsbedingung mit Miniatur-Bild gefunden wurde.

2.7 Experiment 3: Retinale Bewegung mit und ohne Augenbewegungen

Auf der Basis von Experiment 2 kann man zu der Schlussfolgerung gelangen, dass weder Veränderungen in der retinalen noch in der räumlichen Position eines Items das VKZG für Positionen beeinflusst. Diese Aussage stünde in Einklang mit der Wichtigkeit relationaler Positionsinformationen im VKZG. Und tatsächlich fand Irwin (1991) keine nachträglichen Effekte einer Verschiebung der Target-Anordnung auf das VKZG. Um zu kontrollieren, ob diese Schlussfolgerung auch bei kontinuierlichen Positionsveränderungen aufrecht erhalten werden kann, wurden in Experiment 3 zwei Bedingungen miteinander verglichen, die annähernd zu den gleichen retinalen Projektionen führen. Entweder war das Bild stationär, und die Augen bewegten sich durch es hindurch, oder die Augen waren stationär, und das Bild bewegte sich über den Monitor (und die Retina). Falls das VKZG für die Position von Objekten durch die relative Position alleine beeinflusst wird, sollte die Leistung der Probanden in der Bedingung mit stationärem Auge und sich bewegendem Bild besser sein als in der Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Bild. Denn in der Bedingung mit stationärem Auge (und sich bewegendem Bild) wird im Grunde die Fixationsbedingung aus Experiment 1 repliziert. Wenn allerdings räumliche und retinale Stabilität für das VKZG entscheidend sind, sollte die Leistung in der Bedingung mit stationären Augen auf das Leistungsniveau, das in der Smooth Pursuit-Bedingung erreicht wird, sinken, weil die Bewegung des Bildes zu Veränderungen sowohl im retinalen als auch im räumlichen Referenzsystem führt.

2.7.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: In einer Bedingung wurde die Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Gedächtnisbild aus Experiment 1a getestet. In der anderen Bedingung bewegte sich das Gedächtnisbild mit einer Geschwindigkeit von $11.3^\circ/\text{s}$ während die Versuchspersonen das Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms fixierten. Die Trajektorie des sich bewegenden Gedächtnisbilds war exakt die gleiche wie in der in diesem Experiment getesteten Smooth Pursuit-Bedingung. Das bedeutet, dass sich das Gedächtnisbild für 200 ms bewegte, bevor es den Bildschirmmittelpunkt erreichte, und nach dem Erreichen der Mitte sich für 200 ms weiterbewegte. Das Retentionsintervall betrug 500 ms, und nur die All-Items-Bedingung wurde getestet.

Die Bedingung mit stationärem Auge und die mit sich bewegendem Auge wurden in kleinen Blöcken von je 60 Trials durchlaufen. In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3, 6 oder 12 Quadrate) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Jede Blickbewegungsbedingung wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekaliert wurde (d.h. nach 60 Experimentaldurchgängen und 12 Blank-Trials). Jeder Beobachter bearbeitete zwei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, was insgesamt 264 Trials entspricht.

2.7.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert. Der mittlere Prozentsatz korrekter Antworten ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die zweifaktorielle (Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.87, 0.79 und 0.64 bei 3, 6 bzw. 12 Quadraten), $F(2,22) = 125.05$, $MSE = 1.591E-02$, $p < 0.001$).

Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Bedingung mit stationären Augen (0.78) und der Bedingung mit sich bewegendenden Augen (0.75), $F(1,11) = 1.51$, $MSE = 7.536E-02$, $p = 0.245$. Die Interaktion war nicht signifikant, $F(2,22) = 1.60$, $MSE = 2.880E-02$, $p = 0.225$.

2.7.3 Diskussion

Der Vorteil der Fixationsbedingung verschwand, wenn sich das Gedächtnisbild bewegte. Die Kapazität des VKZG für Objektpositionen war etwas, aber nicht statistisch signifikant höher (3.5 vs. 3.9 Items) bei stationären Augen. Sowohl retinale als auch räumliche Stabilität leisten folglich ihren Beitrag zum VKZG für die Position von Objekten. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass zwei Bedingungen mit annähernd dem gleichen retinalen Input nicht immer zu den gleichen Resultaten führen: In Experiment 1a waren die retinalen Projektionen in der Fixationsbedingung fast die gleichen, wie in der Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Bild in diesem Experiment. Dennoch war die Leistung in der Fixationsbedingung aus Experiment 1a besser. Ganz im Gegenteil, es ließ sich keine bessere Leistung in der Fixationsbedingung mit sich bewegendem Bild in diesem Experiment gegenüber der Smooth Pursuit-Bedingung finden. Diese Diskrepanz kann nur erklärt werden, wenn man die Anzahl der stabil gebliebenen Referenzsysteme berücksichtigt: In der Fixationsbedingung in Experiment 1 waren sowohl die räumliche als auch die retinale Position der Items stabil. Augenbewegungen waren in Experiment 1 mit Instabilitäten in nur

einem Bezugssystem assoziiert, retinale Bewegung war mit einem stationären Bild gekoppelt und räumliche Bewegung mit einem sich bewegenden Bild. Bei stationärem Auge und sich bewegendem Bild wie im vorliegenden Experiment ergaben sich plötzlich Instabilitäten in zwei Referenzsystemen (räumlich und retinal); allein die relative Position der Items zueinander blieb stabil. Deshalb mag der Verlust von Stabilität in mehr als einem Bezugssystem erklären, warum die Leistung in der Fixationsbedingung in diesem Experiment nicht besser war als in der Smooth Pursuit-Bedingung.

2.8 Experiment 4: Sensorisches Gedächtnis

In den Experimenten 1 bis 3 wurde das VKZG während GAFs untersucht. In diesen Experimenten konnte man beobachten, dass eine Fokussierung der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit und positionale Stabilität zum VKZG für Objektpositionen beitragen. Bis zu diesem Punkt betrug die Länge des Retentionsintervalls etwa 1.0 s, was sicher weit oberhalb des zeitlichen Limits des sensorischen Gedächtnisses ist. Bei einem sehr kurzen Retentionsintervall von weniger als 100 ms kann das sensorische Gedächtnis Veränderungen auf eine sehr einfache Art detektieren: Eine Positionsveränderung zwischen dem Gedächtnisbild und dem Testbild wird als Scheinbewegung zwischen zwei Bildelementen wahrgenommen. Der Beitrag des sensorischen Gedächtnisses zu diesem Phänomen ist dabei eher indirekter Natur: Das sensorische Gedächtnis speichert die Positionen der Items, die sich nicht bewegen. Dies erlaubt einem einzelnen Item, das seine Position verändert, als sich zu einer neuen Position bewegend oder „springend“ (mittlere Amplitude von 10.3°) im Umfeld des sonst stationären Musters wahrgenommen zu werden. Wenn die Position der stationären Items nicht gespeichert würde, wäre die Positionsveränderung nicht eindeutig, und die Bewegung eines einzelnen Elements könnte nicht wahrgenommen werden. Frühere Studien zum transsakkadischen Gedächtnis haben gezeigt, dass Scheinbewegungen eliminiert werden, wenn eine Sakkade zwischen dem Gedächtnisbild und dem Testbild auftritt (Irwin, 1991). Die Frage hier ist nun, ob das sensorische Gedächtnis durch GAFs beeinflusst wird. Wenn sich

beide, das Bild und die Augen, bewegen, ist die retinale Stimulation annähernd die gleiche wie bei einem stationären Bild ohne Augenbewegungen (Fixationsbedingung). Es ist allerdings nicht bekannt, ob in der Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Bild die Wahrnehmung von Scheinbewegungen unterdrückt ist. Im Gegensatz dazu produziert eine Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Gedächtnisbild starke retinale Bewegung. Weiterhin stellt sich die Frage, ob Scheinbewegungen unter diesen Umständen immer noch wahrgenommen werden können.

2.8.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen (siehe Abbildung 2.5): Eine Fixationsbedingung und zwei Augenfolgebewegungsbedingungen (mit stationärem Bild und mit sich bewegendem Bild) wurden getestet. Wie in Experiment 1a war die Trajektorie stets symmetrisch um den Bildschirmmittelpunkt. Die Länge der Trajektorie veränderte sich jedoch mit der Länge des Retentionsintervalls. Die Versuchspersonen mussten für 400 ms dem Pursuit-Target mit den Augen folgen, bevor das Gedächtnisbild präsentiert wurde. Nach dem Verschwinden des Testbilds mussten die Probanden für weitere 400 ms das Target mit den Augen verfolgen. Das Gedächtnisbild wurde für 400 ms dargeboten. Während des anschließenden Retentionsintervalls bewegte sich das Pursuit-Target entweder für 80 oder für 900 ms. Die in dieser Zeit vom GAF-Target zurückgelegte Distanz betrug 0.9 oder 1.0°. In der Augenfolgebewegungsbedingung mit sich bewegendem Bild wurde das Gedächtnisbild dargeboten, während sich das Target auf der einen Hälfte des Bildschirms befand, und das Testbild wurde gezeigt, wenn sich das Target auf der anderen Seite (immer um das Pursuit-Target herum zentriert) befand, nachdem es den Mittelpunkt des Monitors passiert hatte.

Dieses Vorgehen wurde deshalb gewählt, weil in der Bedingung mit dem kurzen Retentionsintervall eine Präsentation des Testbilds in der Bildschirmmitte nicht möglich war. Die Präsentation des Testbilds in der Bildschirmmitte hätte die GAF unterbrochen und zu einer Sakkade geführt. Der Nachteil dieser Manipulation war, dass das Gedächtnisbild und das Testbild in der Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Bild von unterschiedlichen Winkeln aus betrachtet wurden. Wenn sich z.B. das Target von links nach rechts über den Bildschirm bewegte, dann waren die Elemente links im Bild nahe der Fovea während der Präsentation des Gedächtnisbilds (also dem ersten Teil der Trajektorie), waren aber weiter in der Peripherie während der Darbietung des Testbilds (dem zweiten Teil der Trajektorie). Nur die All-Items-Bedingung wurde getestet.

Die Fixationsbedingung und die Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem bzw. sich bewegendem Bild wurden in kleinen Blöcken von je 48 Trials von den Probanden durchlaufen. In jedem Block wurden die aus einer faktoriellen Kombination aus Memory Set Size (3, 6 oder 12 Quadrate), Retentionsintervall (80 oder 900 ms) und Anwesenheit einer Veränderung (ja, nein) resultierenden Bedingungen zufällig durchmischt. Jede der drei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekali­briert wurde (d.h. nach 164 Experimentaldurchgängen und 20 Blank-Trials). Die Abfolge der einzelnen Blöcke wurde nach einem Latin-Square-Design variiert. Jeder Beobachter bearbeitete drei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung an zwei verschiedenen Tagen, d.h. im Ganzen 984 Trials.

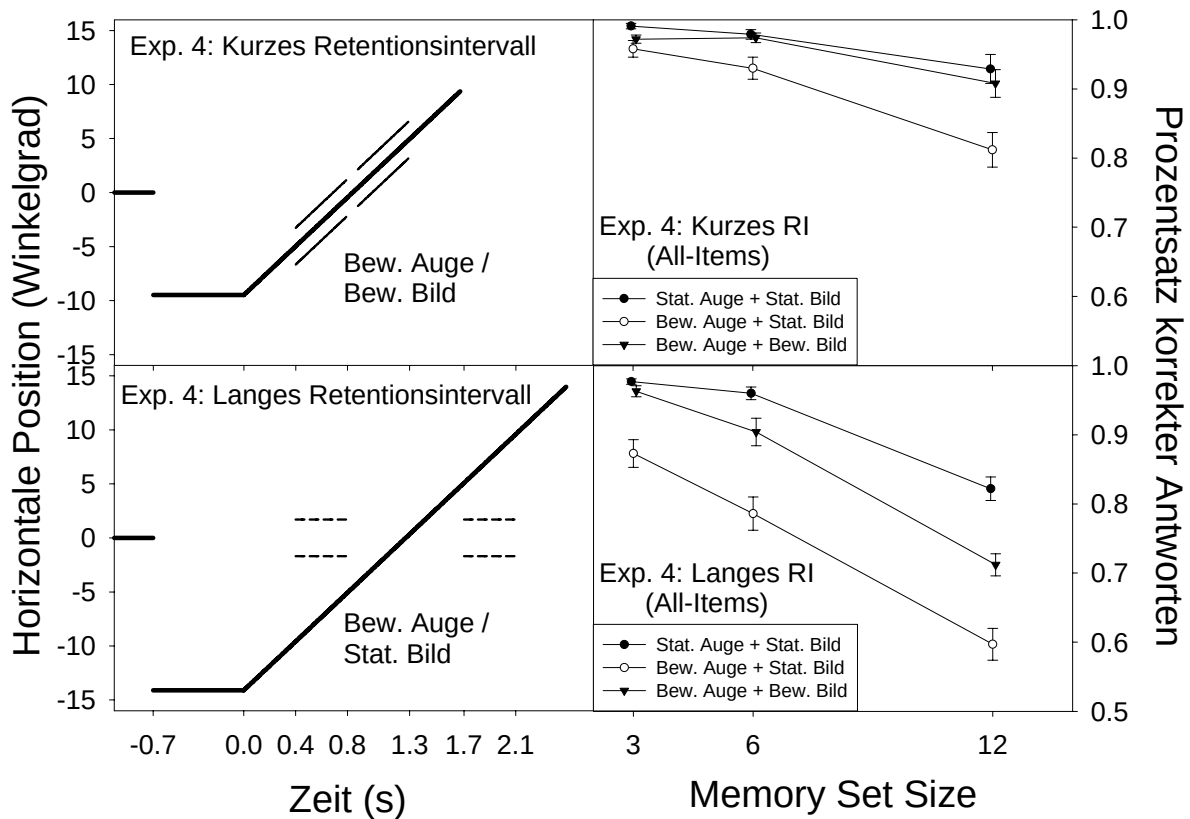


Abbildung 2.5 Auf der linken Seite sind die Raum-Zeit-Diagramme der Augen- und Bildbewegung in Experiment 4 dargestellt. Die gestrichelten Linien auf der linken Seite einer jeden Grafik stellen das Gedächtnisbild dar, das die zu erinnernden Items beinhaltet. Die gestrichelten Linien auf der rechten Seite einer jeden Grafik repräsentieren das Testbild, das das kritische Item enthält. Auf der rechten Seite sind die Ergebnisse aus Experiment 4 (die mittleren Prozentsätze korrekter Antworten und ihre Standardschätzfehler [zwischen den Versuchspersonen] als Funktion der Memory Set Size [Anzahl zu erinnernder Items], der Bewegungsbedingung und des Retentionsintervalls [RI]) dargestellt. Im Gegensatz zu Experiment 1 variierte hier der mittlere Blickwinkel zwischen den Gedächtnis- und Testbildern, wenn sich die Augen bewegten und das Bild stationär war. Exp. = Experiment; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

2.8.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert, und die mittleren Prozentsätze korrekter Antworten sind in den Abbildungen 2.5 und 2.6 dargestellt.

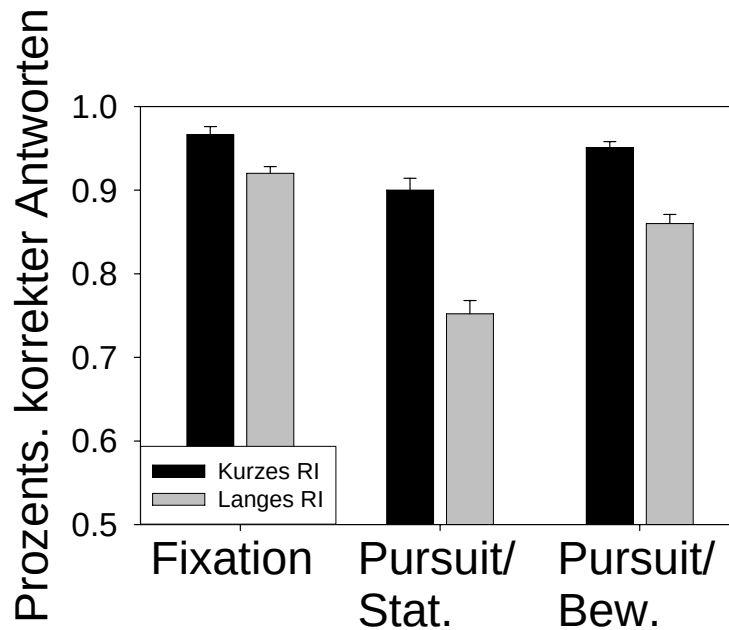


Abbildung 2.6 Die Ergebnisse aus Experiment 4. Die mittleren Prozentsätze (Prozents.) korrekter Antworten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) sind als Funktion des Retentionsintervalls (RI; kurz [80 ms], lang [900 ms]) und der Bewegungsbedingung (Fixation und stationäres [Stat.] Bild, Pursuit und stationäres Bild, Pursuit und bewegtes [Bew.] Bild) dargestellt und zwar unter der All-Items-Bedingung.

Die dreifaktorielle (Retentionsintervall X Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die arcsine-transformierten Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass sich die Leistung der Probanden mit größer werdender Memory Set Size verschlechterte (0.96, 0.92 und 0.80 bei 3, 6 bzw. 12 Quadraten), $F(2,22) = 126.33$, $MSE = 4.507E-02$, $p < 0.001$. Der Prozentsatz korrekter Antworten war höher mit kurzem (0.94) als mit langem Retentionsintervall (0.84), $F(1,11) = 158.22$, $MSE = 3.761E-02$, $p < 0.001$. Der signifikante Haupteffekt der Blickbewegungsbedingung, $F(2,22) = 84.24$, $MSE = 3.532E-02$, $p < 0.001$, zeigte, dass der Prozentsatz korrekter Antworten am höchsten in der Fixationsbedingung war (0.94) und dann abfiel, wenn sich entweder nur das Auge bewegte (0.82) oder aber wenn sich beide, das Auge und das Bild, bewegten (0.91). Die signifikante Zweifach-Interaktion aus Retentionsintervall und Memory Set Size, $F(2,22) = 12.91$, $MSE = 2.815E-02$, $p < 0.001$, deutete darauf hin, dass die Verschlechterung der Leistung bei größer

werdender Memory Set Size in der Bedingung mit langem Retentionsintervall größer war als in der mit kurzem. Die signifikante Zweifach-Interaktion aus Retentionsintervall und Blickbewegungsbedingung, $F(2,22) = 8.01$, $MSE = 2.469E-02$, $p < 0.01$, zeigte, dass sich die Leistung in den drei Blickbewegungsbedingungen mit langem Retentionsintervall stärker voneinander unterschied als in den drei Bedingungen mit kurzem Retentionsintervall. Separate t-Tests bestätigten jedoch, dass die Unterschiede zwischen den drei Blickbewegungsbedingungen für beide Retentionsintervalle signifikant waren (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2 Paarweise Vergleiche (t-Tests) der mittleren Leistung in den Bewegungsbedingungen von Experiment 4 als Funktion des Retentionsintervalls

	Stationäres Auge/ stationäres Bild	Bewegtes Auge/ stationäres Bild	Bewegtes Auge/ bewegtes Bild
Stationäres Auge/ stationäres Bild		6.63%**	1.49%*
Bewegtes Auge/ stationäres Bild	16.81%**		5.14%**
Bewegtes Auge/ bewegtes Bild	5.99%**	10.82%**	

Anmerkung. Fettgedruckte Werte stellen Unterschiede im Prozentsatz korrekter Antworten für das kurze Retentionsintervall (80 ms) dar. Normalgedruckte Werte repräsentieren Differenzen im Prozentsatz korrekter Antworten für das lange Retentionsintervall (900 ms). Die t-Tests wurden auf Basis der arcsin-transformierten Prozentsätze korrekter Antworten gerechnet. * $p < .0125$, ** $p < .001$

Schließlich war auch die Dreifach-Interaktion aus Retentionsintervall, Memory Set Size und Blickbewegungsbedingung signifikant, $F(4,44) = 3.00$ $MSE = 2.366E-02$, $p < 0.05$. Auf den ersten Blick schien diese Interaktion durch den großen Leistungsabfall bei kurzem Retentionsintervall und Smooth Pursuit mit stationärem Bild bedingt zu sein. Zwei separate zweifaktorielle ANOVAs (Memory Set Size X Blickbewegungsbedingung) für jedes der beiden Retentionsintervalle erbrachten jedoch keine signifikante Zweifach-Interaktion (kurzes

Retentionsintervall: $F[4,44] = 1.78$, $MSE = 3.174E-02$, $p = 0.149$; langes Retentionsintervall: $F[4,44] = 1.54$, $MSE = 2.674E-02$, $p = 0.206$).

2.8.3 Diskussion

Das Ergebnis aus Experiment 1, dass die Leistung am besten in der Fixationsbedingung war, konnte repliziert werden. Im Gegensatz zu Experiment 1 war die Leistung jedoch am schlechtesten in der Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Bild im Vergleich zur Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Bild. Die wahrscheinlichste Erklärung für dieses Ergebnis ist, dass es den Probanden mehr Schwierigkeiten bereitete, das Gedächtnisbild und das Testbild miteinander zu vergleichen, wenn sie aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet wurden. Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wurde das Gedächtnisbild betrachtet, während das Pursuit-Target auf der einen Seite des Bildschirms war. Das Testbild wurde hingegen betrachtet, während sich das Pursuit-Target auf der anderen Seite des Monitors befand. In Experiment 1 war der mittlere Betrachtungswinkel für die Gedächtnis- und Testbilder der gleiche. Ähnlich wie beim transsakkadischen Gedächtnis (Irwin, 1992; Irwin und Zelinsky, 2002) wäre es möglich, dass Objekte, die näher an der Fovea bzw. dem Fokus der Aufmerksamkeit (also dem Pursuit- oder Sakkaden-Target) präsentiert werden, besser im VKZG gespeichert werden als periphere Objekte. Weil unterschiedliche Items nahe dem Fixations-Target während der Präsentation des Gedächtnis- und des Testbilds dargeboten wurden, kann es für die Probanden schwieriger gewesen sein, die im VKZG gespeicherten Inhalte mit dem Testbild abzugleichen.

Die Gedächtnisleistung war besser mit kurzem Retentionsintervall (6.2 vs. 4.8 gespeicherte Items) und der Effekt der Memory Set Size war stark reduziert. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass Scheinbewegungen als Hinweisreize in allen drei Blickbewegungsbedingungen vorhanden waren, auch bei GAFs. Es ist möglich, dass die Verschiebung eines Elements in den Gedächtnis- und Testbildern (mittlere Amplitude von 10.3°) während des kurzen Retentionsintervalls von 80 ms mittels einer langfristigen Bewegungsverarbeitung detektiert wurde, während die Bewegung des durch die

Augenfolgebewegung induzierten Items über einen kurzfristigen Bewegungsmechanismus verarbeitet wurde (Braddick, 1980; aber siehe auch Cavanagh und Mather, 1989). Daher kann die funktionale Trennung von kurz- und langfristiger Bewegungsverarbeitung die Entdeckung einer abrupten Neuplatzierung eines Elements in der Bedingung mit kurzem Retentionsintervall ermöglicht haben. Dennoch kann die kurzfristige Bewegung eines Bilds die langfristige Bewegung zumindest zum Teil maskieren: Wie in Tabelle 2.2 dargestellt, ist die Leistung bei Smooth Pursuit und stationärem Bild schlechter als bei Smooth Pursuit mit sich bewegendem Bild. Außerdem spricht die Tatsache, dass die Leistung in der Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Bild etwa die gleiche wie in der Fixationsbedingung war, für die Annahme, dass das sensorische Gedächtnis während GAFs retinozentrisch organisiert ist (entspricht Sun und Irwin, 1987): Wenn der retinale Input während Smooth Pursuit und Fixation etwa gleich ist, dann waren Hinweisreize auf Scheinbewegungen gleichermaßen während Fixation und während Smooth Pursuit verfügbar, und etwa die gleiche Genauigkeit wurde erreicht.

2.9 Experiment 5: Farbe

Bisher konnte demonstriert werden, dass das VKZG für die Position von Objekten während GAFs verschlechtert war, wenn die Position peripherer Target-Objekte erinnert werden sollte. Weil die Ergebnisse in Experiment 2 zeigten, dass diese Leistungseinbuße nicht beobachtet werden konnte, wenn die Stimuli in der Fovea präsentiert wurden, wurde argumentiert, dass die visuell-räumliche Aufmerksamkeit während Smooth Pursuit an das Target der Augenfolgebewegung gebunden war. Diese Annahme ist plausibel, da das visuelle System während Smooth Pursuit den positionalen Fehler zwischen Fovea und Target überwachen muss, damit es nicht zu einem „Hinterhersein“ des Auges hinter dem Target kommt. Das bedeutet, dass immer dann, wenn die Abweichung zwischen Fovea und Target zu groß wird, eine kompensatorische Augenbewegung initiiert werden muss. Aus diesem Grund kann die Position als eine antwortrelevante Dimension angesehen werden, der in der Region um die

Fovea herum Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Dies würde wiederum erklären, warum das Ausführen einer GAF einen Leistungsabfall bei peripheren Objekten produziert, nicht aber bei foveal dargebotenen.

Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass Aufmerksamkeit auf mehr als nur eine einzelne Dimension einen Einfluss hat (Folk, Remington und Wright, 1994; Müller, Reimann und Krummenacher, 2003). Daher ist die Frage, ob der beobachtete Leistungsabfall während Smooth Pursuit auch auf andere Dimensionen generalisiert. Um diesem Punkt nachgehen zu können, wurde in Experiment 5 das Gedächtnis von Probanden für die Farbe eines Reizes während GAFs getestet.

2.9.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: Die Fixationsbedingung und die beiden Augenfolgebewegungsbedingungen aus Experiment 1a wurden getestet. Anstatt den Probanden graue Quadrate darzubieten, wurden in diesem Experiment acht gut zu unterscheidende isoluminante, farbige Quadrate verwendet. Die Farben wurden aus einer Äquiluminanzebene des RGB-Farbraums (Krauskopf, Williams und Heeley, 1982) entnommen. Acht Farben gleicher Sättigung und gleichen Winkelabstands von den Hauptdiagonalen und den kardinalen Achsen wurden ausgewählt. Die x- und y-Koordinaten nach der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) waren (0.370, 0.312), (0.395, 0.387), (0.374, 0.458), (0.308, 0.444), (0.263, 0.364), (0.264, 0.296), (0.290, 0.266) und (0.330, 0.270). Diese Farben waren zentriert auf einem neutralen Weißpunkt mit CIE-Koordinaten von (0.321, 0.336). Alle Stimuli hatten eine Helligkeit von 32 cd/m². Das Gedächtnis- und das Testbild beinhalteten acht Items, von denen keines seine Position

veränderte, d.h. es waren keine relativen Positionsänderungen vorhanden. In einem einzelnen Display waren Farbwiederholungen (z.B. zwei rote Quadrate) möglich, allerdings mit der Einschränkung, dass eine Farbe nicht mehr als dreimal vorkommen durfte, eine andere Farbe jedoch mindestens einmal in Display wiederholt werden musste. Die Probanden wurden instruiert, anzuzeigen, ob das kritische Target seine Farbe im Testbild im Vergleich zum Gedächtnisbild geändert hat. Es sei an dieser Stelle noch einmal daran erinnert, dass die Versuchspersonen in allen bisherigen Experimenten anzugeben hatten, ob sich die Position des kritischen Targets verändert hatte. Die Größe des Memory Sets (Memory Set Size) betrug acht Items, und die All-Items-Bedingung wurde getestet.

Die Fixationsbedingung und die Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem bzw. sich bewegendem Bild wurden in kleinen Blöcken von je 42 Trials von den Probanden durchlaufen. Jede der drei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät recalibriert wurde (d.h. nach 126 Experimentaldurchgängen und 16 Blank-Trials). Das kritische Target veränderte seine Farbe in der Hälfte aller Trials in einem Block. Die Abfolge der einzelnen Blöcke wurde entsprechend einem Latin-Square-Design variiert. Jeder Beobachter bearbeitete drei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, was im Ganzen 426 Trials ergab.

2.9.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert.

Die einfaktorielle, messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Leistungen in der Fixationsbedingung (0.65), der Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Bild (0.67) und der mit sich bewegendem Bild (0.67), $F(2,22) = 0.68$, $MSE = 7.738E-02$, $p = 0.517$).

2.9.3 Diskussion

Ganz anders als in Experiment 1 fand sich in diesem Experiment kein Unterschied zwischen den drei Blickbewegungsbedingungen. Die Leistung der Probanden unterschied sich nicht in den beiden Smooth Pursuit-Bedingungen und der Fixationsbedingung (je 2.6 Items wurden behalten). Man kann daher sagen, dass die Leistungseinbußen aufgrund von GAFs davon abhängig sind, welche Dimension berücksichtigt werden muss. Wenn die Position peripherer Objekte erinnert werden muss, verschlechtert sich die Leistung der Probanden, während sie eine GAF ausführen. Experiment 2 legt den Schluss nahe, dass diese Einbußen auf eine Einengung der Aufmerksamkeit auf das Target der Augenbewegung zurückzuführen sind. Diese Fokussierung der Aufmerksamkeit kann jedoch auf die Information über die Position eines Objekts beschränkt sein. Der Grund dafür könnte sein, dass die Positionsinformation wichtig für die Kontrolle der GAF ist: Die Entfernung zwischen dem Target und der Fovea muss ständig überwacht werden, um einen akkuraten Pursuit zu gewährleisten. Deswegen ist es schwierig, seine Aufmerksamkeit anderen räumlichen Relationen oder Entfernungen unter den peripheren Objekten zuzuwenden. Der Dimension Farbe kann jedoch auch während Smooth Pursuit Aufmerksamkeit zugewendet werden, weil sie für die Antwort nicht relevant ist.

Die Gesamtleistung der Probanden über die drei verschiedenen Bedingungen hinweg war etwas geringer als in einer vergleichbaren Bedingung von Jiang et al. (2000): Im gegenwärtigen Experiment lag der Prozentsatz richtiger Antworten bei etwa 0.67, wobei er in den oben genannten Studie bei ungefähr 0.90 lag. Dieses Ergebnismuster könnte mit der Verwendung isoluminanter Farbreize in Zusammenhang stehen. Bei Jiang et al. wurden Farbreize durch Permutationen der drei Phosphore (rot, grün, blau) geschaffen, was typischerweise mit Veränderungen in der Farbe und der Helligkeit einhergeht. Weil Helligkeitshinweise in der vorliegenden Studie fehlten, war die Aufgabe für die Probanden wahrscheinlich schwieriger. Um zu klären, ob ein zusätzlicher Helligkeitshinweis die Ergebnisse verändern würde, wurden vier Beobachter mit kombinierten Farb- und

Helligkeitsreizen getestet. Tatsächlich verbesserte sich die Leistung etwas (ungefähr 77% korrekte Antworten). Dennoch blieb das Ergebnismuster unverändert.

2.10 Experiment 6: Unterschiedliche Smooth Pursuit-Geschwindigkeiten

Als letztes wurde untersucht, ob das Ausmaß (bzw. die Geschwindigkeit), in welchem sich das Bild oder die Augen bewegen, einen Einfluss auf die Gedächtnisleistung hat. Zu diesem Zweck wurden die beiden Smooth Pursuit-Bedingungen mit stationärem und sich bewegendem Bild getestet: Eine ansteigende Target-Geschwindigkeit bei stationärem Bild führt zu einem Ansteigen in der retinalen Geschwindigkeit. Eine ansteigende Target-Geschwindigkeit bei einem sich bewegendem Bild verändert hingegen die mittlere retinale Geschwindigkeit nicht gravierend (die augenblickliche Geschwindigkeit nimmt selbstverständlich zu), aber der Anteil der räumlichen Verschiebung nimmt zu. Die Frage war nun, ob die Leistung bei steigender Pursuit-Geschwindigkeit schlechter werden oder stabil bleiben würde. Wenn die Leistung stabil bliebe, wäre der Prozess, der das VKZG für die Objektposition während GAFs beeinträchtigt, ein diskreter in dem Sinne, dass nur die Tatsache zählte, dass überhaupt eine GAF durchgeführt wird, aber nicht wie schnell diese Bewegung ist. Eine Verschlechterung der Leistung bei Smooth Pursuit würde hingegen darauf hindeuten, dass der Prozess, der für die Leistungseinbußen während GAFs verantwortlich ist, von den Anforderungen der Smooth Pursuit-Aufgabe abhängig ist. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass jede der in der Einleitung erwähnten Hypothesen mit dieser Idee kompatibel wäre: Es ist möglich, dass eine größere Veränderung der retinalen oder räumlichen Position eines Target-Objekts in einem größeren Ausmaß die Speicherung oder den Abruf der räumlichen oder retinalen Position stört. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass das sich schneller bewegendem Pursuit-Target mehr visuell-räumliche Aufmerksamkeit um die Fovea herum benötigt. Vielleicht ist aber auch die zentrale Verarbeitung bei einer schnelleren Target-Bewegung stärker gefordert.

2.10.1 Methode

Probanden

Die generellen Charakteristika der Probanden in diesem Experiment waren dieselben wie die der Versuchspersonen in Experiment 1a.

Material, Durchführung und Design

Material und Durchführung waren wie in Experiment 1a mit folgenden Modifikationen: Nur die zwei Augenfolgebewegungsbedingungen (mit stationärem Bild und mit sich bewegendem Bild) wurden getestet. Die Größe des Memory Sets wurde auf sechs Items festgelegt. Das Fixationskreuz (und in der entsprechenden Bedingung auch das Gedächtnisbild) bewegte sich mit 3.7, 11.3 oder 22.6°/s. Da die zeitlichen Parameter ansonsten unverändert blieben, wuchs die Länge der Trajektorie mit zunehmender Geschwindigkeit des Fixationskreuzes. Nur die All-Items-Bedingung wurde getestet.

Die drei Geschwindigkeiten wurden in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Die Smooth Pursuit-Bedingungen mit stationärem bzw. sich bewegendem Bild wurden in kleinen Blöcken von je 60 Trials (plus 12 Blank-Trials) von den Probanden durchlaufen. Das kritische Target veränderte seine Position in der Hälfte aller Trials in jedem Block. Die Reihenfolge der Blöcke war über die Probanden hinweg ausbalanciert. Jeder Beobachter bearbeitete zwei Wiederholungen jeder Blickbewegungsbedingung, d.h. im Ganzen 288 Trials.

2.10.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 1a analysiert.

Die zweifaktorielle (Geschwindigkeit X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass sich die Leistung der Probanden mit steigender Target-Geschwindigkeit verschlechterte (0.72, 0.70 und 0.65 bei 3.7, 11.3 bzw. 22.6°/s), $F(2,22) = 5.97$, $MSE = 2.604E-02$, $p < 0.01$). T-Tests zeigten, dass sich die niedrigste Geschwindigkeit nicht von der mittleren unterschied ($p > 0.30$). Die

höchste Geschwindigkeit unterschied sich jedoch von den beiden anderen Geschwindigkeiten signifikant ($t_s(11) > 2.8$; $p_s < 0.02$). Keiner der übrigen Effekte oder die Interaktion wurden signifikant ($p_s > 0.30$).

2.10.3 Diskussion

Die Leistung fiel von ungefähr 2.5 Items in den beiden Bedingungen mit der niedrigsten und der mittleren Geschwindigkeit auf 1.8 Items in der Bedingung mit der höchsten Target-Geschwindigkeit. Das VKZG für die Position von Objekten während GAFs wird also eindeutig durch die Target-Geschwindigkeit beeinflusst, der Zusammenhang ist allerdings nicht linear. Erneut verblüffend ist die Tatsache, dass die Smooth Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Bild (die zu einem annähernd stabilen Abbild auf der Retina führt) nicht zu besseren Ergebnissen führt als die Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Bild: Die retinale Geschwindigkeit der Projektion des Bildes wuchs linear mit der Target-Geschwindigkeit an, wenn das Bild auf dem Bildschirm stationär präsentiert wurde. Es gab jedoch keine Interaktion zwischen Target-Geschwindigkeit und Augenfolgebewegungsbedingung in der Art, dass die wachsende retinale Geschwindigkeit das VKZG nicht stärker beeinträchtigte als die wachsende räumliche Geschwindigkeit.

2.11 Allgemeine Diskussion

In den oben dargestellten Experimenten wurde das VKZG für die Position und die Farbe von Objekten während kontinuierlicher Augen- und Objektbewegung untersucht. Obwohl es eine Vielzahl von Untersuchungen zu abrupten Veränderungen der Augen- (Sakkaden) oder Objektposition gibt, sind Studien zu kontinuierlichen Veränderung eher spärlich gesät. Zwei Fragen sollten durch die durchgeführten Experimente zu beantworten versucht werden:

Erstens sollte in Erfahrung gebracht werden, ob das VKZG für die Position von Objekten während GAFs retinozentrisch oder räumlich organisiert ist. Zu diesem Zweck

wurden zwei Bedingungen, eine, die die räumliche, und eine, die die retinale Stabilität der Items gewährleistete, miteinander verglichen. Es wurden jedoch keine Unterschiede zwischen diesen beiden Bedingungen gefunden. Das VKZG für Positionen während Smooth Pursuit ist also weder strikt retinozentrisch noch strikt räumlich organisiert, sondern scheint eher abstrakter Natur zu sein.

Zweitens wurde untersucht, ob die Kapazität des VKZG für die Position oder die Farbe eines Objekts darunter leiden würde, wenn gleichzeitig eine GAF durchzuführen ist. Im Ganzen konnte beobachtet werden, dass die Kapazität des VKZG während Smooth Pursuit um etwa ein Item reduziert war (im Vergleich zu einer Fixationsbedingung), die Leistung der Probanden lag jedoch immer noch weit über dem Zufallsniveau.

In Experiment 1 wurde das VKZG für die Position von Objekten untersucht. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass die Durchführung einer GAF zu einer Beeinträchtigung der Gedächtnisleistung führt im Vergleich zu einer Bedingung ohne jegliche Bewegung der Augen oder der zu memorierenden Objekte (Fixationsbedingung). Dieses Resultat ist überraschend, weil sich in einer der beiden Smooth Pursuit-Bedingung das Gedächtnisbild mit gleicher Geschwindigkeit wie das Target der GAF über den Bildschirm bewegte, so dass der retinale Input ungefähr der gleiche war wie in der Fixationsbedingung.

In Experiment 2 konnte gezeigt werden, dass der Leistungsabfall während Smooth Pursuit verschwand, wenn das Gedächtnisbild in der Fovea der Probanden dargeboten wurde. Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass die visuell-räumliche Aufmerksamkeit während einer GAF an das Smooth Pursuit-Target gebunden ist. Die Bindung der Aufmerksamkeit zieht wiederum eine schlechtere Verarbeitung peripherer Reize nach sich.

Aber auch die Stabilität der retinalen und räumlichen Position der Items ist für die Leistung im VKZG von Bedeutung. Wenn nämlich beide, sowohl die retinale als auch die räumliche Position der Items sich veränderten, sank die Leistung der Probanden in einer Fixationsbedingung auf das gleiche Niveau wie in einer Smooth Pursuit-Bedingung (Experiment 3).

Experiment 4 untersuchte die Funktionalität des Ultra-Kurzzeit-Gedächtnisses (sensorisches Gedächtnis) während Smooth Pursuit. Das sensorische Gedächtnis speichert die

Objektposition stationärer Objekte und ermöglicht die Wahrnehmung von Scheinbewegungen, wenn ein Item seine Position verändert. Der Gebrauch dieser Scheinbewegungsinformationen war während Fixation und während Smooth Pursuit möglich.

Experiment 5 verdeutlichte, dass der bisher zuverlässig beobachtete Leistungsabfall bei GAFs für die Reizdimension Farbe nicht auftritt. Das VKZG für die Farbe eines Objekts blieb unbeeinflusst von der Ausführung einer GAF. Dieser Befund legt die Annahme nahe, dass die Fokussierung der Aufmerksamkeit während Smooth Pursuit auf die Dimension der Reizposition beschränkt ist.

In Experiment 6 wurde die Geschwindigkeit der GAF variiert: Mit steigender Pursuit-Geschwindigkeit verschlechterte sich die Gedächtnisleistung der Versuchspersonen. Das deutet darauf hin, dass die zunehmende Schwierigkeit der Blickbewegungsaufgabe das VKZG nachteilig beeinflusste.

Zusammengefasst zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass das VKZG während GAFs Reize in einem relativ abstrakten Format repräsentiert und dass die Verschlechterung des VKZG während Smooth Pursuit (im Vergleich zu einer Fixationsbedingung) nicht alle Reizattribute gleichermaßen betrifft: Obgleich das Gedächtnis für die Position peripherer Objekte verschlechtert war, war es das Gedächtnis für foveale Positionen oder etwa die Farbe eines Reizes nicht. Die Experimente haben gezeigt, dass die wahrscheinlichste Erklärung für den Leistungsabfall die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf das Pursuit-Target ist. Es wurde dabei argumentiert, dass Fokussierung der Aufmerksamkeit auf die Fovea insbesondere aufgrund der Anforderungen an die Probanden während der Durchführung der GAF notwendig ist: Die Versuchspersonen müssen ständig die Entfernung zwischen dem Target und der Fovea überwachen und die Parameter der Augenbewegung entsprechend adjustieren, um dem Target so akkurat wie möglich folgen zu können. Deshalb liefern die vorliegenden Untersuchungen auch einen Beweis für die enge Beziehung von Handlung, Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Dies steht im Einklang mit einigen neueren Befunden, die eine enge Verknüpfung zwischen den Erfordernissen einer beabsichtigten Handlung (oder einer, die gerade durchgeführt wird) und Aufmerksamkeit (Bekkering und Neggers, 2002) und Wahrnehmung (z.B. Ganel und Goodale, 2003) sehen.

Ein Beweis für solch eine Verknüpfung entstammt einer Studie, in der eine Suchaufgabe (Conjunction search-Task) Verwendung fand (Bekkering und Neggers, 2002): Beobachter mussten ein Target-Objekt mit einer bestimmten Orientierung und einer bestimmten Farbe (z.B. ein grüner rechteckiger Block in einem 45° Winkel orientiert) unter einer Reihe von Distraktoren (z.B. grüne Blöcke in einem Winkel von 135° orientiert oder orange Blöcke in einem Winkel 45° oder 135° orientiert) ausfindig machen. Die Teilnehmer wurden instruiert, auf das Target zu sehen, und dabei wurden die Genauigkeit und die Latenz der ersten Sakkade gemessen. Die wichtige Manipulation in diesem Experiment war die manuelle Aufgabe, die die Blickbewegungsaufgabe begleitete: Die Beobachter sollten entweder auf das Target zeigen oder nach ihm greifen. Diese beiden Aufgaben unterschieden sich hinsichtlich der antwortrelevanten Dimensionen: Für die Zeigebewegung war nur die Position des Targets relevant, nicht aber seine Orientierung. Im Gegensatz dazu waren für die Greifbewegung sowohl die Position des Targets als auch seine Orientierung von Bedeutung, weil die Versuchspersonen ihr Handgelenk drehen mussten, um erfolgreich nach dem Target greifen zu können. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass Probanden ein Objekt mit der falschen Orientierung wesentlich seltener auswählten, wenn sie nach dem Objekt greifen mussten, als wenn sie lediglich auf das Objekt zeigen mussten. Die Verarbeitung der Orientierung eines Objekts war also effizienter, wenn die Dimension Orientierung antwortrelevant war. Dieser Befund deutet darauf hin, dass die Versuchspersonen ihre Aufmerksamkeit vorzugsweise dann der Orientierung eines Reizes zuwendeten, wenn sie nach dem Objekt greifen sollten. Für die Farbe konnte jedoch keine Leistungsverschlechterung nachgewiesen werden: Die Versuchspersonen wählten etwa gleich häufig ein Objekt falscher Farbe aus, wenn sie nach ihm greifen oder auf es zeigen sollten. Aufgabenspezifische Anforderungen förderten also die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf aufgabenrelevante Dimensionen.

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse dieser Studie: Die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf die Position eines Objekts während Smooth Pursuit förderte nicht die Leistung entlang dieser Dimension. Im Gegenteil wurde die Aufmerksamkeit dergestalt auf das Pursuit-Target fokussiert, dass sie von der Peripherie abgezogen wurde. In der Fovea war

die Leistung mit oder ohne GAFs etwa die gleiche, während die Leistung in der Peripherie beeinträchtigt war. Dieses Ergebnis unterstützt Theorien, die postulieren, dass Aufmerksamkeit auf mehr als einer Dimension agieren kann (Folk et al., 1994; Müller et al., 2003). Insbesondere deuten die vorliegenden Ergebnisse darauf hin, dass die Aufmerksamkeit entlang einer antwortrelevanten Dimension (z.B. Position) beeinträchtigt sein kann, während sie entlang einer anderen Dimension nicht beeinträchtigt ist (z.B. Farbe).

Außerdem ist das VKZG während GAFs mit dem VKZG während Sakkaden (transsakkadisches Gedächtnis) vergleichbar. Irwin (1991) unternahm eine Reihe von Untersuchungen, die für die aktuelle Studie von großer Relevanz sind:

Erstens berichtete er einen Leistungsabfall von 20 bis 30% bezüglich des Prozentsatzes korrekter Antworten zwischen einer Bedingung, in der sich die räumliche und die retinale Position des Reizmusters überlappten, und einer Bedingung, in der die Probanden eine Sakkade ausführen mussten (diese Bedingung führte zu einem räumlichen, nicht aber einem retinalen Überlappen). Dieser Vergleich ist ähnlich dem hier vorliegenden Vergleich zwischen einer Fixationsbedingung und den beiden Smooth Pursuit-Bedingungen mit stationärem und sich bewegendem Bild. Verglichen mit den von Irwin (1991) berichteten Leistungsunterschieden waren die Unterschiede, die man in der vorliegenden Untersuchung beobachten konnte, relativ gering (in der Größenordnung von 6 bis 12% korrekter Antworten).

Zweitens berichtete Irwin, dass es beim transsakkadischen Gedächtnis keinen Vorteil eines kurzen Retentionsintervalls über ein langes gab (Retentionsintervalle von 40 ms bis zu 5s wurden getestet). Im Gegensatz dazu zeigte sich in der vorliegenden Studie ein deutlicher Vorteil des kurzen Retentionsintervalls über das lange, wenn eine GAF gefordert war. Dieser Befund zeigt, dass das sensorische Gedächtnis auch bei starker retinaler Bewegung (z.B. in der Smooth Pursuit-Bedingung mit stationärem Bild) noch funktional war. Jedoch war auch die Beziehung zwischen pursuit-induzierter kontinuierlicher Bewegung ($0.08\text{s} * 11.3^\circ/\text{s} = 0.9^\circ$) und Item-Bewegung (im Mittel 10.3°) in Irwins Untersuchung sehr verschieden. In Irwins (1991) Experimenten sollten die Versuchspersonen eine 3.0° große Sakkade machen, und die Anordnung zu erinnernder Reize war lediglich $2.4 \times 2.4^\circ$ groß. Daher kann das

Verhältnis der Amplituden aus kontinuierlicher und Scheinbewegung eine Entdeckung von Scheinbewegungen in dieser Studie begünstigt haben. Weitere Untersuchungen sind nötig, um zu klären, ob und, wenn ja, wann Scheinbewegungen von pursuit-induzierter kurzzeitiger Bewegung maskiert werden.

Zusammengefasst existieren also Unterschiede zwischen dem VKZG während Sakkaden und dem während GAFs. Allerdings reflektieren diese Unterschiede möglicherweise eher unterschiedliche Anforderungen der einzelnen Aufgaben und deuten nicht auf grundsätzlich unterschiedliche zugrunde liegende Gedächtnissysteme hin. Die Speichersysteme scheinen sehr ähnlich zu sein. Der Hauptgrund für diese Annahme ist, dass es eine starke Übereinstimmung über die einzelnen Studien hinweg darin gibt, dass die relationalen Informationen über Items im VKZG gespeichert werden (siehe Experiment 1).

3 Aufmerksamkeitsverteilung

während glatter Augenfolgebewegungen

3.1 Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Teil dieser Arbeit soll dem Zusammenhang von glatten Augenfolgebewegungen (GAFs; Singular: GAF) und Aufmerksamkeit, genauer gesagt der Verteilung von Aufmerksamkeit während GAFs nachgegangen werden.

Das Verhältnis von Aufmerksamkeit und der Steuerung von GAFs ist weitestgehend unerforscht. Erst kürzlich wurde gefunden, dass die Aufmerksamkeit dem Zielreiz vorausgeht (van Donkelaar, 1999). Testreize, die in Bewegungsrichtung der GAF erschienen, wurden schneller entdeckt als Testreize, die hinter dem Zielreiz der GAF auftauchten. Aufmerksamkeit antizipiert also zukünftige Zielreizpositionen. Dies ist ein Punkt, auf den später noch ausführlich eingegangen werden soll. In Übereinstimmung mit dieser Auffassung vermindert eine fehlende Aufmerksamkeitszuwendung die Qualität der Augenfolgebewegungen (Pola und Wyatt, 1997). Darüber hinaus ist Aufmerksamkeit an der Zielreizselektion für GAFs beteiligt: Wenn ein Ablenkreiz sich entgegen der Richtung des Zielreizes bewegt, dann kommt es zu einer Verlangsamung bei der Initiierung der GAFs (Ferrera und Lisberger, 1995). Ebenso ist die Initiierung der GAFs verlangsamt, wenn eine bestimmte Formeigenschaft den Ablenkreiz vom Zielreiz unterscheidet, so dass der Zielreiz mittels visueller Suche bestimmt werden muss (Krauzlis und Miles, 1996). Da in dieser Situation auch die erste Sakkade zum Zielreiz verlangsamt ist, kann angenommen werden, dass sakkadische und glatte Blickbewegungen gemeinsame Mechanismen nutzen. Insgesamt ist die Forschung zum Zusammenhang von GAFs und Aufmerksamkeit jedoch äußerst spärlich, was sicherlich daran liegt, dass die Steuerung von GAFs maßgeblich als negatives Rückkopplungssystem mit der Zielreizbewegung als Eingangssignal und der Augenbewegung als Ausgangssignal aufgefasst wurde (z.B. Pola und Wyatt, 1991; Robinson, Gordon und

Gordon, 1986). GAFs werden also durch retinale Abweichungen des Zielreizes von der Fovea gesteuert, die das System zu verringern versucht. In solchen Modellen hat Aufmerksamkeit keine Funktion. Neuere Forschungsarbeiten legen aber den Schluss nahe, dass dies die Funktionsweise des glatten Augenfolgesystems nur unzureichend widerspiegelt. Um weitere Beweise für eine enge Verzahnung von Aufmerksamkeit und GAFs zu gewinnen, könnte man die Asymmetrie der Aufmerksamkeitsverteilung, die für einfache lineare Bewegungen festgestellt wurde (van Donkelaar, 1999), näher untersuchen. Dies ist in der vorliegenden Arbeit geschehen.

Grundsätzlich ermöglicht Aufmerksamkeit es uns, ausgewählte Stimuli zu entdecken und zu diskriminieren, während die meisten der übrigen Stimuli, die die sensorischen Rezeptoren erreichen, effektiv ausgeblendet werden. Der Gewinn durch eine Aufmerksamkeitszuwendung auf einen bestimmten Reiz besteht u.a. darin, dass sich unsere Antwortlatenzen bezüglich dieses Reizes verringern: Wir können einen beachteten (mit Aufmerksamkeit versehenen) Stimulus schneller als anwesend identifizieren als einen unbeachteten Stimulus. Zusätzlich zu diesem Beitrag der Aufmerksamkeit zur visuellen Wahrnehmung trägt Aufmerksamkeit, wie bereits erwähnt, auch zur korrekten Produktion von Augenbewegungen bei. Obwohl sich die meisten Forschungsarbeiten in diesem Bereich auf die Rolle der Aufmerksamkeit bei Sakkaden konzentriert haben, gibt es genug Evidenzen, die für einen Beitrag von Aufmerksamkeit zur Ausführung von GAFs sprechen. An diesen Punkt anknüpfend wurde von van Donkelaar (1999) ein Experiment durchgeführt, in dem die Mechanismen untersucht werden sollten, die der räumlich-zeitlichen Verteilung der Aufmerksamkeit während GAFs zugrunde liegen. Vor der Darstellung der Ergebnisse dieses Versuchs soll jedoch zunächst ein Überblick über diejenige Forschungsliteratur gegeben werden, die die Rolle der Aufmerksamkeit während Sakkaden demonstriert. Hierbei wird außerdem kurz auf frühere Studien eingegangen, die für die Existenz einer Beziehung zwischen Aufmerksamkeit und GAFs sprechen.

Aufmerksamkeit und sakkadische Augenbewegungen

Obwohl Aufmerksamkeit typischerweise den Objekten geschenkt wird, die gerade betrachtet werden, kann sie jedoch auch auf Orte abseits des aktuellen Fixationspunktes der Augen gelenkt werden. Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass die räumliche Verteilung von Aufmerksamkeit für selektierte Objekte funktionell mit der Generierung von Sakkaden zu diesen Objekten verbunden ist (Fischer, 1999). Diese Theorie wird durch die Tatsache unterstützt, dass die Regionen des Gehirns, die während verdeckter Aufmerksamkeitsshifts aktiviert sind, sich zu einem wesentlichen Teil mit den Regionen überschneiden, die während sakkadischer Augenbewegungen aktiv sind (Corbetta, 1998). Des Weiteren wurden Ablenkungen in den Trajektorien von willentlich generierten Sakkaden bei Probanden beobachtet, wenn diese ihre Aufmerksamkeit einem Ort zuwenden mussten, der vom Target der Sakkade dissoziiert war (Sheliga et al., 1994, 1995a und b). Sakkaden, die unter solchen Dissoziations-Bedingungen generiert wurden, brauchten länger bis zu ihrer Initiierung und waren ungenauer als die Sakkaden, die produziert wurden, wenn der Ort der Aufmerksamkeit und das Target der Sakkade identisch waren (Hoffman und Subramaniam, 1995; Kowler et al., 1995; Deubel und Schneider, 1996). Zusammengenommen sprechen diese Ergebnisse dafür, dass die Lenkung der Aufmerksamkeit auf einen anderen Ort als den des Targets einer Sakkade einen direkten Einfluss auf die okulomotorische Programmierung der Sakkade selbst hat.

Aufmerksamkeit und glatte Augenfolgebewegungen

Im Gegensatz zu der Vielzahl an Literatur, die sich der Rolle der Aufmerksamkeit bei Sakkaden widmet, sind die Mechanismen, die der Verteilung der Aufmerksamkeit während GAFs zugrunde liegen, bisher nur unzureichend erforscht. Es gibt jedoch Belege die zeigen, dass Aufmerksamkeit einen Einfluss auf die dem Smooth Pursuit-Output zugrunde liegenden Prozess hat.

Zunächst hat sich gezeigt, dass das zentrale Nervensystem die Geschwindigkeit des Zielreizes einer GAF bestimmen muss, um dem visuellen Stimulus überhaupt akkurat verfolgen zu können. Neurophysiologische und funktionelle Bildgebungsverfahren konnten

demonstrieren, dass Neurone in MT (mediale temporale Area) und MST (mediale superiore temporale Area) bei Stimulation durch visuelle Bewegung aktiviert werden (Zeki et al., 1991; Salzman und Newsome, 1994) und zu GAFs beitragen (Newsome et al., 1988; Barton et al., 1996). Außerdem wurde gezeigt, dass sich die Aktivität in diesen Regionen erhöht, wenn der Beobachter dazu aufgefordert wird, spezifischen Attributen der visuellen Bewegung Aufmerksamkeit zu schenken (Treue und Maunsell, 1996; Beauchamp et al., 1997; Culham et al., 1998; Seidemann und Newsome, 1999; Treue und Martinez-Trujillo, 1999). Wenn man visueller Bewegung seine Aufmerksamkeit zuwendet, beeinflusst dies die Aktivität der zentralnervösen Kanäle, die in die anfängliche Transformation der sensorisch-perzeptuellen Informationen in eine anschließende Ausführung einer GAF involviert sind. Des Weiteren beinhalten die Regionen im Gehirn, die einander funktionell überlappen und für Aufmerksamkeitsshifts und die Generierung von Sakkaden zuständig sind (siehe oben), auch Zellen, die in die Verarbeitung visueller Bewegung (Colby et al., 1993) und GAFs verstrickt sind (MacAvoy et al., 1991; Petit et al., 1997; Shi et al., 1998).

Weiterhin kann man feststellen, dass, wenn ein Distraktor anwesend ist, ein aufmerksamkeitsmodulierter Selektionsprozess stattfindet schon vor der Initiierung der GAF (Ferrera und Lisberger, 1995). Die Bewegungsrichtung des Distraktors beeinflusst dabei systematisch die anfängliche Pursuit-Antwort: Die Latenz der Augenfolgebewegung ist beträchtlich erhöht, wenn sich der Distraktor in die entgegengesetzte Richtung als das Pursuit-Target bewegt im Vergleich zu einer Bedingung, in der sich beide Targets in ein und dieselbe Richtung bewegen. Außerdem ist bekannt, dass, wenn sich der Distraktor 100 ms vor oder nach dem Onset des Pursuit-Targets zu bewegen beginnt, die Größe dieses Latenzeffekts sichtlich reduziert ist (Ferrera und Lisberger, 1997a). Darüber hinaus konnten Ferrera und Lisberger (1997b) zeigen, dass eine Unterpopulation von Zellen in MT und MST die prädiktive modulatorische Aktivität während dieser Aufgabe widerspiegelt, die zum Teil die behavioralen Beobachtungen erklären können. Zusammengefasst sind die Ergebnisse konsistent mit der Annahme, dass Aufmerksamkeit während eines festen Zeitfensters bei der Initiierung einer Pursuit-Antwort mitwirkt und dass dieses Mitwirken oder dieser Einfluss zum Teil über die Aktivität von bewegungsverarbeitenden Zellen in MT und MST vermittelt wird.

Nimmt man also eine Beziehung zwischen Aufmerksamkeit und der Durchführung einer GAF an, dann stellt sich folgerichtig die Frage nach der Natur dieser Beziehung.

Die Verteilung von Aufmerksamkeit während glatter Augenfolgebewegungen

Obwohl die oben beschriebenen Resultate auf eine enge Beziehung zwischen Aufmerksamkeit und Smooth Pursuit hinweisen, ist bisher unklar, wie Aufmerksamkeit räumlich sowie zeitlich während GAFs verteilt ist. Für Sakkaden, die während Pursuit zu einem peripher dargebotenen Target ausgeführt werden sollen, weiß man, dass diese Sakkaden schneller initiiert (Krauzlis und Miles, 1996; Tanaka et al., 1998) und außerdem akkurater ausgeführt werden (Gellman und Fletcher, 1992), wenn das Target vor dem Pursuit-Stimulus erscheint, als wenn es hinter ihm präsentiert wird. Diese Beobachtung lässt sich so interpretieren, dass die Aufmerksamkeit stärker auf Positionen vor dem Pursuit-Target gelenkt wird als auf Positionen hinter ihm. Dies basiert auf der Annahme, dass Targets schneller und akkurater lokalisiert werden können, wenn Aufmerksamkeit auf die Region im Raum gelenkt wird, in der diese Reize später erscheinen werden (Posner, 1980). Diese Befunde mögen zum Teil jedoch konfundiert sein mit Unterschieden in den Mechanismen für das Ausführen vorwärts- bzw. rückwärtsgerichteter Sakkaden. Obwohl andere Studien nahe legen, dass dieser Erklärungsansatz nicht maßgeblich für die geschilderten Beobachtungen ist (Tanaka et al., 1998), ist es dennoch möglich, diesen Ansatz direkter zu überprüfen. In einer Reihe von Experimenten wurde von van Donkelaar (1999) und von van Donkelaar und Drew (2002) dazu eine Dual-Task-Aufgabe (Doppelaufgabe) verwendet. Anders als in den bisherigen Experimenten mussten die Probanden keine Sakkaden zu Targets ausführen, die während Pursuit in der Peripherie dargeboten wurden, sondern sie wurden instruiert, so schnell wie möglich auf dieses Ereignis (das Erscheinen eines peripheren Reizes) mit einem einfachen Tastendruck zu reagieren. Wenn die Aufmerksamkeit auf einen gewissen Teil des Raums um den Pursuit-Stimulus herum gerichtet ist, dann sollten die manuellen Antwortlatenzen kürzer sein für Reize, die in diesem Raum erscheinen, als für Reize, die an anderer Stelle dargeboten werden. Wenn also mehr Aufmerksamkeit auf Positionen vor dem Pursuit-Target gelenkt wird (wie die Ergebnisse aus den oben erwähnten Untersuchungen mit Sakkaden es nahe legen) als

auf Positionen hinter ihm, dann müssten die Latenzen für den Knopfdruck kürzer sein für periphere Targets, die vor dem Pursuit-Reiz dargeboten werden als für Targets, die hinter ihm präsentiert werden. Zusätzlich zu der Untersuchung der räumlichen Verteilung der Aufmerksamkeit während Smooth Pursuit, wurden jegliche Variationen in der Aufmerksamkeit über die Zeit hinweg mittels folgender Manipulation gemessen: die peripheren Targets wurden entweder während des Onsets der GAF, ihrer Aufrechterhaltung (steady state) oder ihres Offsets dargeboten. Auf diese Art und Weise war es van Donkelaar (1999) und van Donkelaar und Drew (2002) möglich zu bestimmen, ob die verschiedenen Phasen des Pursuits mehr oder weniger Aufmerksamkeit bedürfen. Die Ergebnisse der Untersuchungen von van Donkelaar (1999; van Donkelaar und Drew, 2002) legen den Schluss nahe, dass Aufmerksamkeit während GAFs nicht gleichmäßig verteilt ist:

Die Analyse der manuellen Reaktionszeiten der Versuchsteilnehmer zeigt, dass die Latenzen als eine Funktion sowohl von der Lokation des peripheren Targets als auch von der Phase des Pursuit, in der das Target präsentiert wurde, variieren. Die Latenzen waren kürzer für periphere Reize, die vor dem Pursuit-Target präsentiert wurden als für Reize, die hinter ihm dargeboten wurden. Zusätzlich antworteten die Probanden im Allgemeinen während der Phase der Aufrechterhaltung der GAF am schnellsten.

Diese Ergebnisse lassen zahlreiche Schlüsse zu: Zum einen demonstrieren sie, dass während jeder Phase der GAF die Aufmerksamkeit auf einen Teil des Raums vor dem Pursuit-Target gerichtet war. Daher waren die Reaktionszeiten auch kürzer, wenn der periphere Stimulus vor dem Pursuit-Target erschien als hinter ihm. Zum anderen zeigen diese Resultate, dass die Phase der Aufrechterhaltung der GAF weniger Aufmerksamkeit benötigt als die Phase der Initiierung bzw. der Beendigung des Pursuits. Dies erklärt sich, wenn man die Veränderungen berücksichtigt, die während dieser drei Phasen auftreten. Während des Onsets der GAF z.B. muss der Proband zunächst einmal den Zeitpunkt bestimmen, zu dem sich das Pursuit-Target zu bewegen anfängt und je nach Zusammenhang zusätzlich noch die Richtung und die Geschwindigkeit des sich bewegenden Reizes. All diese Informationen müssen in eine anfängliche Pursuit-Antwort transformiert werden. Wahrscheinlich beanspruchen diese Prozesse (ebenso wie die, die bei der Beendigung des Pursuits eine Rolle

spielen) die Aufmerksamkeit wesentlich stärker als solche, die zur Aufrechterhaltung einer GAF mit einer konstanten Geschwindigkeit beitragen. Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse dafür, dass die Aufmerksamkeit während einer GAF weder räumlich noch über die Zeit gleich verteilt ist.

Es gibt jedoch einige methodische Schwierigkeiten an dieser eben beschriebenen Untersuchung, die die Richtigkeit der gezogenen Schlussfolgerungen in Frage stellen könnten. Und obwohl die Schwachpunkte dieser Studien von van Donkelaar (1999) und von van Donkelaar und Drew (2002) relativ eindeutig sind, wurden die beiden Autoren in der Vergangenheit immer wieder im Zusammenhang mit der Aufmerksamkeitsverteilung während GAFs zitiert. Dem Wissen der Verfasserin nach wurde bisher auch kein Versuch unternommen, die oben beschriebenen Ergebnisse evtl. sogar noch unter Berücksichtigung der methodischen Schwächen, auf die nachfolgend eingegangen wird, zu replizieren. Folgende Mängel sind in der Studie von van Donkelaar (1999) zu beachten: Der gravierendste Mangel besteht darin, dass ausschließlich GAFs nach rechts untersucht wurden, ohne einen Grund für diese Vorgehensweise anzugeben. Es stellt sich hier jedoch die Frage, ob die gleichen Ergebnisse auch für eine GAF nach links zu erwarten gewesen wären oder ob gar eine in jedem Durchgang zufällig ausgewählte Bewegungsrichtung, d.h. eine GAF zufällig nach links oder nach rechts, womöglich zu unterschiedlichen Resultaten geführt hätte. Damit hängt ein weiterer Punkt eng zusammen: Leider machen die Autoren nur vage Angaben in Bezug auf etwaige Gütekriterien der GAF wie z.B. den Smooth Pursuit-Gain. Die Autoren berichten zwar, dass Durchgänge, in denen die Probanden eine Sakkade hin zum peripheren Target generierten, ebenso von der weiteren statistischen Analyse ausgeschlossen wurden wie Trials, in denen die manuellen Reaktionszeiten kürzer als 100 ms oder länger als 500 ms waren, aber wie „gut“ die GAFs der Teilnehmer waren, wird zu keinem Zeitpunkt dargestellt. Ein niedriger Smooth Pursuit-Gain (Werte deutlich kleiner als 1.0) würde die Ergebnisse in einem ganz anderen Licht erscheinen lassen als ein hoher Gain (Werte deutlich größer 1.0). Ein hoher Gain impliziert nämlich, dass sich das Auge einer Versuchsperson nicht genau auf dem Reiz der GAF befindet, sondern ihm vorausseilt. Abhängig davon um wie viel das Auge dem

Target der GAF voraus ist, ist es nur folgerichtig, dass auf periphere Reize, die vor dem Pursuit-Target dargeboten werden, schneller reagiert wird als auf periphere Reize, die hinter dem Target präsentiert werden. Im umgekehrten Fall, also bei einem niedrigen Gain, der mit einem „Hinterhersein“ des Auges hinter der tatsächlichen Reizposition assoziiert ist, wären kürzere Antwortlatenzen auf periphere Reize vor dem GAF-Target im Vergleich zu peripheren Reizen hinter dem Target ein weitaus stärkerer Hinweis auf eine tatsächliche Ungleichverteilung der Aufmerksamkeit während GAFs.

3.2 Experiment 7: Aufmerksamkeitsverteilung während Smooth

Pursuit

Aus der Motivation heraus, die Ergebnisse von van Donkelaar (1999) und van Donkelaar und Drew (2002) zu replizieren, gleichzeitig aber auch um den oben genannten Schwächen dieser Studien zu begegnen, wurde ein Experiment durchgeführt, das eng an die dargestellte Studie angelehnt war. Untersuchungsgegenstand war natürlich die Frage, wie Aufmerksamkeit während GAFs räumlich verteilt ist. Anders als in der oben besprochenen Untersuchung wurde jedoch auch der Einfluss der Bewegungsrichtung des Pursuit-Targets auf die Aufmerksamkeitsverteilung während GAFs getestet. Die manuellen Reaktionszeiten der Probanden auf das Erscheinen eines peripheren Targets während einer GAF wurden unter zwei verschiedenen Augenfolgebewegungsbedingungen gemessen. In der einen Bedingung bewegte sich das Target der GAF immer von links nach rechts horizontal über den Bildschirm. Diese Bedingung entsprach damit der in der Original-Untersuchung getesteten Bedingung. Darüber hinaus gab es eine zweite Bedingung, in der sich das Pursuit-Target zufällig von rechts nach links oder von links nach rechts bewegte. Diese beiden Bedingungen wurden jeweils in getrennten experimentellen Blöcken untersucht. Mittels dieser Manipulation sollte der Frage nachgegangen werden, ob der Reaktionszeitvorteil für peripher und vor dem Target der GAF dargebotene Stimuli eventuell damit zusammenhängt, dass die GAF im ursprünglichen Experiment immer nur in eine Richtung auszuführen gewesen und

damit in einem gewissen Maße vorhersehbar war. Denn möglicherweise hat erst die Tatsache, dass sich das Pursuit-Target immer nur in eine Richtung bewegte, zu einer Ungleichverteilung der Aufmerksamkeit geführt. Wenn dem so ist, dann sollte eine experimentelle Bedingung, in der vor Beginn eines Trials nicht klar ist, in welche Richtung sich das Target der GAF bewegen wird, zu einer Reduzierung wenn nicht gar zu einem Verschwinden des Reaktionszeitvorteils für periphere Reize vor dem GAF-Target führen. Zusammengefasst ging es also um die Beantwortung der Frage, ob die kürzeren Latenzen für periphere Reize, die vor dem Target der GAF präsentiert wurden, mit der Bewegungsrichtung des Pursuit-Targets in Zusammenhang stehen, oder genauer noch, ob der Faktor „geblockte“ (immer nach rechts) oder zufällige bzw. „ungeblockte“ (zufällig nach links oder nach rechts) Bewegungsrichtung des Pursuit-Targets einen Einfluss auf die Ungleichverteilung der Aufmerksamkeit während Pursuit hat. Außerdem wurde der Güte der GAFs, operationalisiert über den Pursuit-Gain, mehr Beachtung geschenkt, was sich u.a. in einer sorgfältigen Dokumentation der diesbezüglichen Ergebnisse widerspiegeln soll.

3.2.1 Methode

Probanden

Alle Probanden des in diesem Teil dieser Arbeit geschilderten Experiments waren Studenten der Justus-Liebig-Universität Gießen und wurden für ihre Teilnahme an den Untersuchungen bezahlt. Die Versuchspersonen waren zwischen 19 und 32 Jahren alt und waren normalsichtig oder trugen entsprechende Sehhilfen (Brille oder „weiche“ Kontaktlinsen), um ihre Sehfehler zu korrigieren. An dem Experiment nahmen insgesamt 18 Probanden teil. Während ein Proband über die experimentelle Fragestellung der Untersuchung informiert war, waren die übrigen Teilnehmer naiv, d.h. keiner von ihnen war über das experimentelle Design oder den theoretischen Hintergrund im Vorfeld aufgeklärt worden.

Material und Durchführung

Die Stimuli wurden auf einem 17 Zoll (43.18 cm) Monitor in einer Auflösung von 1152 (Höhe) x 864 (Breite) Pixeln und mit einer vertikalen Bildwiederholungsfrequenz von 75 Hz präsentiert. Die Kopfposition der Probanden wurde mit Hilfe einer Kinnstütze in einer Entfernung von 39 cm vom Bildschirmmittelpunkt stabilisiert. Die Blickbewegungen der Versuchspersonen wurden mit einem am Kopf der Probanden befestigten videobasierten Blickbewegungsmessgerät aufgezeichnet (EyeLink II; SR Research, Ltd. Mississauga, Ontario, Kanada; siehe Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1 Das Blickbewegungsmessgerät EyeLink II (SR Research, Ltd. Mississauga, Ontario, Kanada) in der Seitenansicht (links) und der Frontalansicht (rechts). Die Bilder wurden der Homepage von SR Research entnommen: www-eyelinkinfo.com/mount_main.php (Stand: 19.09.2005).

Zu Beginn eines jeden Durchgangs (Abbildung 3.2) erschien ein schwarzes $0.5 \times 0.5^\circ$ großes Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Wenn die Versuchspersonen bereit waren, einen Durchgang zu beginnen, drückten sie eine zuvor bestimmte Taste. Das Blickbewegungsmessgerät führte dann eine Drift-Korrektur durch, um evtl. aufgetretene Verlagerungen des auf dem Kopf des Probanden befestigten Aufzeichnungssystems zu korrigieren. War die Drift-Korrektur erfolgreich, wurde das Fixationskreuz rot.

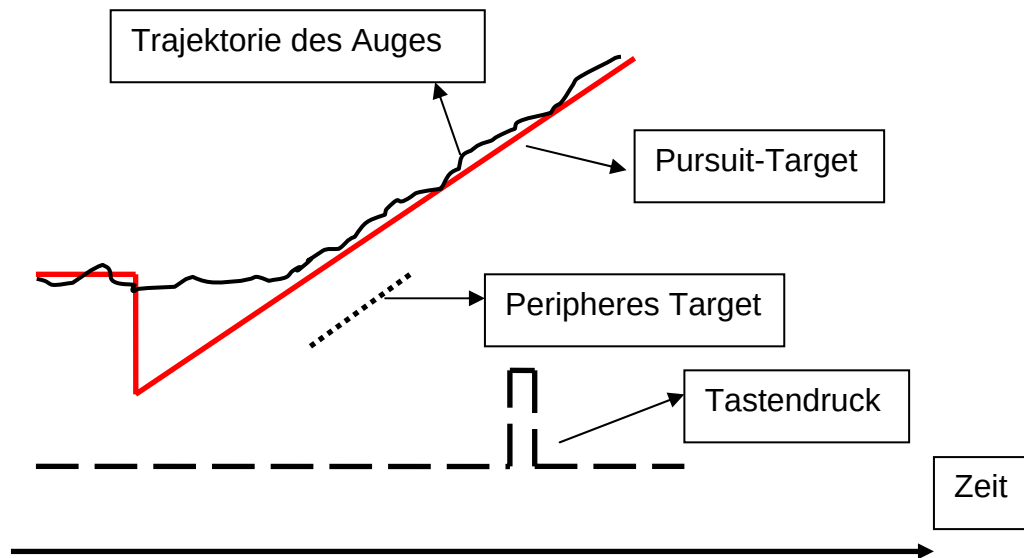


Abbildung 3.2 Schematische Darstellung eines Experimentaldurchgangs. Das Pursuit-Target wird zunächst in der Mitte des Bildschirms präsentiert, bevor es nach einem variablen Zeitintervall (500 – 2000 ms) 1.0° nach links springt und sich dann mit einer konstanten Geschwindigkeit von $10^\circ/\text{s}$ nach rechts über den Bildschirm zu bewegen beginnt (rote Linie). Die Probanden werden instruiert, dem Pursuit-Target mit den Augen zu folgen (schwarze Linie). 100, 300 oder 500 ms nach dem Bewegungsonset des Pursuit-Targets wird für 100 ms ein peripheres Target dargeboten (in diesem Fall 2.5° links vom Pursuit-Target; schwarze gepunktete Linie), auf das die Versuchspersonen so schnell wie möglich mit einem einfachen Tastendruck (schwarze gestrichelte Linie) reagieren sollten.

In der „geblockten“ Blickbewegungsbedingung sprang das Fixationskreuz nach einem variablen Zeitintervall (500 - 2000 ms) zunächst 1.0° nach links und begann dann sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von $10^\circ/\text{s}$ nach rechts für die Dauer von 600 ms über den Bildschirm zu bewegen. Diese Prozedur bezeichnet man auch als Step-ramp-Prozedur (Rashbass, 1961). Ein derartiges Vorgehen soll das Auftreten von Catch up-Sakkaden zu Beginn der GAF reduzieren. Dies ist wichtig, weil solche Sakkaden und die damit einhergehende sakkadische Suppression möglicherweise die Entdeckung eines peripheren Targets erschweren würden. Die Probanden wurden instruiert, dem bewegenden Target so gut wie möglich mit ihren Augen zu folgen. In der Mehrzahl der Trials (80%) wurde ein zweites peripheres Target für 100 ms kurzzeitig dargeboten. Dieses periphere Target war ein schwarzer Kreis mit einem Durchmesser von 0.5° . Beide Stimuli (das Target der GAF und das

periphere Target) erschienen auf einem gleichförmigen grauen Hintergrund. Das periphere Target erschien entweder 100, 300 oder 500 ms nach dem Bewegungsbeginn des Targets der GAF. Das periphere Target wurde 2.5° links oder rechts vom Pursuit-Target dargeboten und bewegte sich mit gleicher Geschwindigkeit wie das Target der GAF. Die Aufgabe der Probanden war es, so schnell wie möglich nach dem Erscheinen des peripheren Targets mit dem rechten Zeigefinger eine zuvor bestimmte Taste zu drücken, gleichzeitig dabei aber das Pursuit-Target weiter mit den Augen zu verfolgen. In den übrigen 20% der Durchgänge, in denen kein peripheres Target dargeboten wurde, den so genannte Catch-Trials, sollten die Versuchspersonen nur das Target der GAF mit den Augen verfolgen. Diese Catch-Trials dienten u.a. als Baseline-Trials für die Evaluierung der Pursuit-Leistung der Versuchspersonen. Die so gewonnenen Daten wurden mit dem mittleren Smooth Pursuit-Gain in den Experimentalbedingungen, in denen ein peripheres Target präsentiert wurde, verglichen.

In der „ungeblockten“ Blickbewegungsbedingung sprang das Fixationskreuz nach einem variablen Zeitintervall (500 - 2000 ms) in der einen Hälfte der Durchgänge zufällig 1.0° nach links und begann dann, sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von $10^\circ/\text{s}$ nach rechts über den Bildschirm zu bewegen, in der anderen Hälfte der Trials sprang es 1.0° nach rechts, um sich anschließend nach links über den Bildschirm zu bewegen. Von diesem Punkt abgesehen, waren alle übrigen Parameter dieser Blickbewegungsbedingung identisch mit denen in der geblockten Bedingung.

Design

Die Reihenfolge der beiden Blickbewegungsbedingungen (geblockt vs. ungeblockt) wurde folgendermaßen variiert: Insgesamt hatten die Probanden vier experimentelle Blöcke zu absolvieren – zwei, in denen sich das Target der GAF immer nur nach rechts bewegte (geblockt) und zwei, in denen sich das Target zufällig nach rechts oder links bewegte (ungeblockt). Alle Probanden mit einer geraden Versuchspersonennummer (2, 4, 6 usw.) durchliefen als erstes einen Block mit ungeblockter Bewegungsrichtung, dann einen mit geblockter Bewegungsrichtung, dann wieder einen mit ungeblockter und abschließend einen

mit geblockter Bewegungsrichtung. Alle Versuchsteilnehmer, denen eine ungerade Versuchspersonennummer zugewiesen wurde (1, 3, 5 usw.), bearbeiteten die vier experimentellen Blöcke in genau umgekehrter Reihenfolge. Ein experimenteller Block bestand aus 60 Trials. Bei insgesamt vier experimentellen Blöcken absolvierte ein einzelner Teilnehmer 240 Trials. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung (geblockt vs. ungeblockt) sie als nächste zu bearbeiten hätten. Jede Blickbewegungsbedingung wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekali­briert wurde.

3.2.2 Ergebnisse

Zum einen wurden die manuellen Antwortlatenzen der Versuchspersonen (Reaktionszeiten) einer inferenzstatistischen Analyse zugeführt, zum anderen wurde aber auch der Smooth Pursuit-Gain (als Maß zur Charakterisierung der Güte einer GAF) berechnet und dieser ebenfalls einer inferenzstatistischen Betrachtung unterzogen. Vor der Darstellung der Ergebnisse soll zunächst geschildert werden, welche Ereignisse zum Ausschluss eines Trials von der weiteren statistischen Analyse geführt haben.

In Bezug auf die Auswertung der Reaktionszeiten wurden alle diejenigen Durchgänge ausgeschlossen, in denen die Probanden offensichtlich eine Sakkade hin zum peripheren Target ausführten. Außerdem mussten die Versuchsteilnehmer innerhalb eines gewissen Zeitrahmens nach Erscheinen des peripheren Targets reagieren. Alle Durchgänge, in denen die individuellen Reaktionszeiten kürzer als 100 ms und länger als 500 ms waren oder in denen trotz Anwesenheit eines peripheren Targets überhaupt nicht reagiert wurde, wurden verworfen. Auch wenn während der Präsentation des peripheren Targets geblinzelt wurde, fand ein Trial keinen Eingang in die Datenanalyse.

Alle diese Punkte führten auch in Bezug auf die Analyse des Gains zum Ausschluss eines Durchgangs von der weiteren Auswertung. Zusätzlich wurden in Bezug auf den Gain die Catch-Trials ausgeschlossen, in denen ein Proband trotz des Fehlens eines peripheren Targets reagierte und dadurch einen so genannten „falschen Alarm“ produzierte. Darüber

hinaus musste der Gain einen Wert größer als 0.50 und kleiner als 1.5 annehmen. Ein Gain außerhalb dieses Wertebereichs ist mit einer unzureichend genau ausgeführten GAF assoziiert.

Insgesamt wurden 11% der erhobenen Durchgänge von der weiteren Analyse der Reaktionszeiten und 19% der Trials von der Auswertung des Gains ausgeschlossen.

Reaktionszeiten

Die mittleren Reaktionszeiten für die manuellen Antworten auf das Erscheinen eines peripheren Target vor oder hinter dem Target der GAF sind in Abbildung 3.3 getrennt für die geblockte vs. die ungeblockte Blickbewegungsbedingung des Pursuit-Targets graphisch dargestellt.

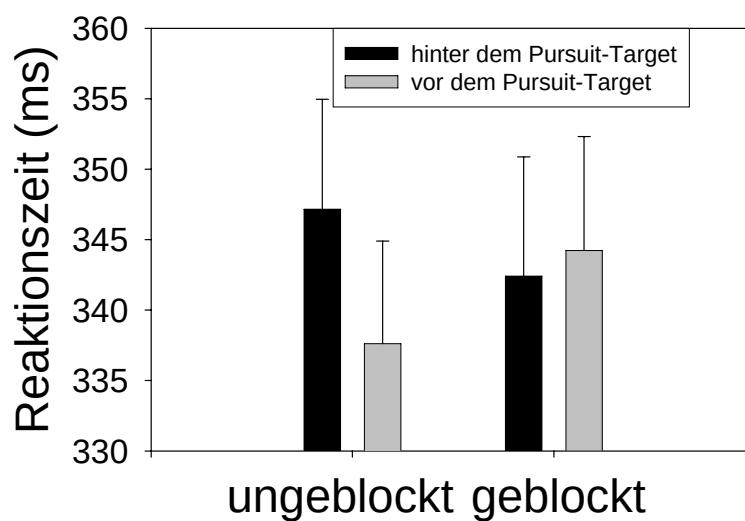


Abbildung 3.3 Ergebnisse zu Experiment 7. Die mittleren manuellen Reaktionszeiten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) sind als Funktion der Blickbewegungsbedingung (ungeblockt, geblockt) und der Position des peripheren Targets (hinter, vor) dargestellt.

Die zweifaktorielle (Position des peripheren Targets X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über die manuellen Reaktionszeiten zeigte, dass die Probanden

schneller reagierten, wenn das periphere Target vor dem Target der GAF präsentiert wurde (341 ms), als wenn es hinter dem Pursuit-Target präsentiert wurde (345 ms), $F(1,17) = 7.79$, $MSE = 34.35$, $p = 0.013$. Der Faktor „geblockte vs. ungeblockte Blickbewegungsbedingung“ hatte keinen Einfluss auf die Reaktionszeiten, $F(1,17) = 0.076$, $MSE = 203.01$, $p = 0.786$. Die signifikante Zweifach-Interaktion, $F(1,17) = 5.95$, $MSE = 97.68$, $p = 0.026$, deutete daraufhin, dass die Versuchspersonen nur in der ungeblockten Blickbewegungsbedingung schneller auf ein peripheres Target vor dem Pursuit-Target als hinter ihm reagierten und dieser Vorteil in der geblockten Blickbewegungsbedingung verschwand. T-Tests für jede der einzelnen Bedingungen bestätigten, dass der Reaktionszeit-Vorteil für ein peripheres Target vor dem Pursuit-Target im Vergleich zu einem Target dahinter nur für die ungeblockte Blickbewegungsbedingung bestand ($p = 0.008$); alle anderen Bedingungen unterschieden sich nicht signifikant voneinander ($ps > 0.1$).

Um etwaige Einflussfaktoren auf den Reaktionszeitvorteil für periphere Targets, die vor dem Target der GAF präsentiert wurden, auszuschließen, wurden zwei weitere Varianzanalysen berechnet – eine dreifaktorielle und eine zweifaktorielle: Mit Hilfe der dreifaktoriellen, messwiederholten ANOVA über die Faktoren „erste vs. wiederholte Bearbeitung der Blickbewegungsbedingung“, „Blickbewegungsbedingung“ und „Position des peripheren Targets“ wurde der Frage nachgegangen, ob sich das bisher gefundene Ergebnismuster eventuell verändert, wenn die Abfolge der vier einzelnen Experimentalblöcke berücksichtigt wird. Grundsätzlich wären im Fall eines signifikanten Effekts zwei Alternativen denkbar gewesen: Zum einen könnte die Wiederholung einer Blickbewegungsbedingung zu einem Größerwerden des Reaktionszeitvorteils für periphere Reize vor dem Pursuit-Target führen zum anderen aber auch zu einem Kleinerwerden. Die Analyse ergab keinen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „erste vs. wiederholte Bearbeitung der Blickbewegungsbedingung“ ($p = 0.14$).

Mittels der zweifaktoriellen, messwiederholten ANOVA über die Faktoren „Bewegungsrichtung (nach links vs. nach rechts) in der ungeblockten Blickbewegungsbedingung“ und „Position des peripheren Targtes“ wurde getestet, ob der Reaktionszeitvorteil für periphere Reize vor dem Pursuit-Target davon abhängig ist, ob die

Probanden eine GAF nach links oder rechts ausführen mussten. Auch hier ergab die statistische Analyse keinen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Bewegung des Targets der GAF nach links oder rechts“ ($p = 0.65$). Allein die Blickbewegungsbedingung führte in beiden Varianzanalysen wieder zu einem signifikanten Haupteffekten ($ps < 0.02$).

Augenbewegungen

Jede einzelne Blickspur wurde zunächst individuell in Augenschein genommen. Anschließend wurde der mittlere Pursuit-Gain für ein Intervall von Bewegungsonset bis Bewegungsoffset des Targets der GAF berechnet, nachdem alle Sakkaden aus der Blickspur entfernt wurden. Zum Aufspüren der Sakkaden wurde ein relativ sensitives Beschleunigungskriterium von $3.250 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ benutzt, was es möglich machte, auch kleine ruckartige Bewegungen des Auges zu detektieren. Unter dem Begriff Pursuit-Gain, versteht man, um es noch einmal zu wiederholen, den Quotienten aus der Geschwindigkeit des Auges einer Versuchsperson und der tatsächlichen Reizgeschwindigkeit.

Zunächst zeigte eine zweifaktorielle (Blickbewegungsbedingung X Position des peripheren Targets), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain der Experimentaldurchgänge (Trials in denen ein peripheres Target dargeboten wurde), dass die Probanden einen höheren Gain hatten, wenn die Bewegungsrichtung des Pursuit-Targets geblockt war (0.87), als wenn sie ungeblockt war (0.84), $F(1,17) = 6.461$, $MSE = 2.065\text{E-}03$, $p = 0.021$. Der Faktor „Position des peripheren Targets“ hatte keinen Einfluss auf den Gain, $F(1,17) = 0.086$, $MSE = 0.376\text{E-}03$, $p = 0.086$. Auch die Zweifach-Interaktion war nicht signifikant ($p = 0.325$).

Anschließend wurde eine einfaktorielle (Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain der Catch-Trials gerechnet. Die Blickbewegungsbedingung hatte keinen Einfluss auf den Gain, $F(1,17) = 0.008$, $MSE = 1.623\text{E-}03$, $p = 0.930$.

Abschließend zeigte eine zweifaktorielle (Catch- vs. Experimentaldurchgänge X Blickbewegungsbedingung), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain der Catch- und Experimentaldurchgänge, dass zwar keiner der beiden Faktoren alleine einen Einfluss auf den Pursuit-Gain hatten ($p = 0.064$ für den Faktor „Catch- vs. Experimentaldurchgang“; $p = 0.228$

für den Faktor „Blickbewegungsbedingung“), dass ihr Zusammenspiel jedoch zu einer signifikanten Interaktion führte, $F(1,17) = 11.583$, $MSE = 0.270E-03$, $p = 0.003$. Diese Interaktion deutet darauf hin, dass der Pursuit-Gain in den ungeblockten Experimentaltrials am schlechtesten war (0.83) im Vergleich zu allen übrigen Bedingungen, in denen stets ähnliche Werte erreicht wurden (0.87). Dieser Eindruck wurde durch separate t-Tests bestätigt, aus denen deutlich wurde, dass sich in der Tat nur die Gain-Werte der ungeblockten Experimentaltrials ($ps < 0.04$) jeweils signifikant von den restlichen Werten ($ps > 0.93$) unterschieden.

3.2.3 Diskussion

Ausgangspunkt für die hier dargestellte Untersuchung waren die Ergebnisse von van Donkelaar (1999) und van Donkelaar und Drew (2002), die besagen, dass Probanden schneller auf einen peripheren Reiz reagieren, wenn dieser Reiz vor dem Target einer GAF dargeboten wurde, als wenn er hinter ihm präsentiert wurde. Das Anliegen der vorliegenden Untersuchung war es, diesen interessanten Befund grundsätzlich zu replizieren, wobei die Verfasserin jedoch gleichzeitig bemüht war, in der aktuellen Studie den methodischen Schwächen des van Donkelaar-Experiments zu begegnen. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu einer Bedingung, in der sich das Pursuit-Target – wie in van Donkelaars Experiment (1999) – ausschließlich nach rechts bewegte, auch eine Bedingung getestet, in der sich das GAF-Target zufällig nach rechts oder links bewegen konnte. Die Auswertung der Reaktionszeiten zeigte, dass die Probanden tatsächlich schneller reagierten, wenn das periphere Target vor dem Pursuit-Reiz dargeboten wurde, dass dies aber nur in der Bedingung der Fall war, in der sich das Pursuit-Target zufällig nach links oder rechts bewegte. In der Bedingung, in der sich das Pursuit-Target nur nach rechts bewegte, waren die Probanden gleich schnell, egal an welchem Ort das Target dargeboten wurde. Es gelang also die Ergebnisse von van Donkelaar (1999) zu replizieren, allerdings nur für einen Teil der getesteten Bedingungen.

Wodurch könnten diese abweichenden Ergebnisse zustande gekommen sein? Zuerst soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass der von der Verfasserin gefundene Reaktionszeitvorteil für periphere Targets positioniert vor dem Pursuit-Target sehr viel kleiner war als der, den van Donkelaar (1999) berichtete, obwohl insgesamt mehr Versuchspersonen getestet wurden. Van Donkelaar (1999) berichtete einen Reaktionszeitvorteil für Target-Positionen vor dem Pursuit-Reiz von 50 ms, während der Vorteil in der aktuellen Untersuchung lediglich 4 ms betrug. Warum der von van Donkelaar (1999) gefundene Reaktionszeitvorteil so viel größer ist als der in der vorliegenden Untersuchung, wird sich letztlich nicht klären lassen, aber dennoch soll in diesem Kontext auf zwei Punkte aufmerksam gemacht werden: Zum einen lässt van Donkelaar den Leser darüber im Unklaren, wie „gut“ seine Probanden dem Target der GAF mit den Augen folgten; wie bereits oben erwähnt, werden von ihm keine Kennwerte die Augenfolgebewegungsleistung der Probanden betreffend berichtet. Zum anderen gibt er keine Auskunft darüber, ob es sich bei den Teilnehmern seiner Untersuchung eventuell um extrem geübte Versuchspersonen handelt. In der vorliegenden Untersuchung hatte zwar der überwiegende Teil der Probanden schon vorher an Blickbewegungsexperimenten teilgenommen. Dennoch hatten auch die geübten Versuchspersonen durchaus Schwierigkeiten mit der an sie gestellten Aufgabe. So war es z.B. nötig, diejenigen Trials von der Auswertung auszuschließen, in denen die Versuchsteilnehmer offensichtlich Mühe hatten, dem Target der GAF mit den Augen zu folgen und der Gain kleiner als 0.50 bzw. größer als 1.50 war. Möglicherweise waren van Donkelaars Probanden Experten für diesen Typ von Aufgabe und es mag ihnen – im Vergleich zu den Versuchspersonen im aktuellen Experiment – um einiges leichter gefallen sein, eine GAF durchzuführen und gleichzeitig das periphere Target zu beachten. Dies wiederum könnte sich schließlich in dem größeren Reaktionszeitvorteil in van Donkelaars Daten niedergeschlagen haben.

Auf den anderen Punkt wurde in der Einleitung schon eingegangen: Van Donkelaar berichtet zu keinem Zeitpunkt den durchschnittlichen Gain seiner Versuchspersonen. Ein niedriger Smooth Pursuit-Gain (Werte deutlich kleiner als 1.0) würde seine Ergebnisse in einem ganz anderen Licht erscheinen lassen, als ein hoher Gain (Werte deutlich größer 1.0).

Ein hoher Gain impliziert, dass sich das Auge einer Versuchsperson nicht genau auf dem Reiz der GAF befindet, sondern ihm vorausseilt. Je nachdem um wie viel nun das Auge dem Target der GAF voraus ist, wäre es nur logisch, wenn auf periphere Reize, die vor dem Pursuit-Target dargeboten werden, schneller reagiert wird als auf periphere Reize, die hinter dem Target präsentiert werden. Der Gain der Versuchspersonen in der aktuellen Untersuchung lag etwa zwischen 0.83 und 0.87 (siehe oben). Man kann also annehmen, dass die Augen der Probanden eher etwas hinter dem Pursuit-Target zurück waren. Wenn nun der Gain bei van Donkelaar im Mittel bei 1.0 lag oder sogar noch etwas darüber, würde dies eventuell die unterschiedliche Größe des Reaktionszeitvorteils erklären können: Die Versuchspersonen im vorliegenden Experiment wären aufgrund des niedrigeren Gains mit den Augen weiter entfernt gewesen von einem peripheren Target, das vor dem Pursuit-Target dargeboten worden ist, als die in van Donkelaars Experiment. Das periphere Target in van Donkelaars Experiment wäre somit näher an der Fovea und dem Fokus der Aufmerksamkeit seiner Probanden gewesen, was sich wiederum in dem größeren Reaktionszeitunterschied geäußert habe könnte. Da van Donkelaar jedoch keine Angaben bezüglich des Gains macht, wird sich dieser Aspekt nicht klären lassen.

Keiner dieser Punkte kann jedoch erklären, warum der Vorteil für periphere Targets, die vor dem Pursuit-Target dargeboten wurden, nur für die ungeblockte Blickbewegungsbedingung gefunden wurde, nicht aber für die geblockte. Es scheint, dass in der aktuellen Untersuchung – im Gegensatz zu den Befunden von van Donkelaar – die Bewegung des Pursuit-Targets immer nur in eine Richtung dazu geführt hat, dass der Reaktionszeitvorteil verschwand. Warum die Ergebnisse sich in diesem Punkt widersprechen, bleibt unklar. Abschließend lässt sich festhalten, dass die vorliegenden Ergebnisse einen Hinweis darauf liefern, dass der von van Donkelaar (1999) berichtete Zusammenhang zwischen GAFs, Aufmerksamkeitsverteilung und Reaktionszeiten unter Umständen nicht so eindeutig ist, wie seine Resultate zunächst nahe gelegt haben.

4 Aufmerksamkeitsverlagerungen

während glatter Augenfolgebewegungen

4.1 Theoretischer Hintergrund

Aufmerksamkeit wird als die mentale Fähigkeit definiert, verhaltensrelevante Stimuli zwischen verhaltensirrelevanten Stimuli auszuwählen. Stark vereinfacht formuliert, fördert visuelle Aufmerksamkeit also die bevorzugte Verarbeitung von bestimmten visuellen Informationen. Wie diese bevorzugte Verarbeitung erreicht wird, ist Thema einer Reihe konkurrierender Theorien (z.B. Treisman, 1988; LaBerge und Brown, 1989; Wolfe und Cave, 1990; van der Heijden, 1992; für einen Überblick siehe Schneider, 1993). Einig sind sich jedoch all diese Theorien in dem Punkt, dass die Selektion von Informationen grundsätzlich nötig ist, weil der Verarbeitungskapazität des Gehirns Grenzen gesetzt sind, und weil sichergestellt werden muss, dass das Verhalten von tatsächlich relevanten Informationen bestimmt wird.

Visuell-räumliche Aufmerksamkeit wurde ausgiebig im Kontext von „visual orienting“ untersucht, womit die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf bestimmte Reize oder Orte gemeint ist. Im täglichen Leben explorieren wir eine visuelle Szene mit Hilfe von sakkadischen Augenbewegungen, die alle 50 bis 70 ms unsere Fovea auf einem bestimmten Bereich des visuellen Feldes stabilisieren. Reize von Interesse werden während der bis zu 200 ms dauernden Fixationsintervalle zwischen den einzelnen Sakkaden verarbeitet. Diese Prozesse werden unter dem Begriff „overt visual orienting“ (zu Deutsch overte oder offene Aufmerksamkeitsverlagerungen oder Aufmerksamkeitsshifts [ASs]; Singular: Aufmerksamkeitsverlagerung bzw. -shift [AS]) beschrieben. Dennoch ist seit längerem bekannt, dass Aufmerksamkeit auf verhaltensrelevante Stimuli auch ausgerichtet werden kann, ohne die Augen zu bewegen, also ohne eine Sakkade zum jeweiligen Stimulus auszuführen. In diesem Fall sind der Ort der Aufmerksamkeitszuwendung und die Fixation

des Auges auf einen Reiz voneinander dissoziiert. Posner (1980) hat dieses Phänomen als „covert visual orienting“ bezeichnet. Im Deutschen spricht man von einer coverten oder verdeckten Aufmerksamkeitsverlagerung bzw. einem coverten oder verdeckten Aufmerksamkeitsshift. Posner (1980) hat zwei verschiedene Formen der Kontrolle über covertes ASs vorgeschlagen: Der erste Kontrollmodus ist exogen und bezieht sich auf reflexive ASs als Antwort auf saliente Stimuli im visuellen Feld, wie z.B. periphere Blitze (peripherer Cue oder Hinweisreiz). Der zweite Modus ist endogen und beinhaltet eine willentliche Aufmerksamkeitsverlagerung als Antwort auf einen symbolischen Hinweisreiz, wie z.B. einen zentralen Pfeil (zentraler Cue). Diese beiden von Posner (1980) angenommenen Kontrollmodi über visuelle Aufmerksamkeit stellen eine Differenzierung zwischen zwei Wegen dar, wie ein gemeinsamer Aufmerksamkeitsmechanismus aktiviert werden kann.

Verdeckte Aufmerksamkeitsshifts

Viele Wissenschaftler konnten nachweisen, dass vorheriges Wissen über die Position eines bevorstehenden Reizes das Entdecken dieses Reizes erleichtert, und das auch dann, wenn keine Augenbewegungen erlaubt waren (Eriksen und Hoffman, 1972; Posner, 1980). Posner (1980) präsentierte beispielsweise ein Target 7° links oder rechts von einem zentralen Fixationspunkt. Vor der Präsentation des Targets wurde ein Pfeil am Fixationspunkt dargeboten, der in 80% aller Durchgänge zur richtigen Targetposition zeigte. In 20% der Trials wies der Pfeil in die falsche (entgegengesetzte) Richtung. Die manuellen Reaktionszeiten für die Entdeckung oder Diskriminierung des Targets waren schneller, wenn die Versuchspersonen in der Lage waren, den Präsentationsort des Targets zu antizipieren. Der Pfeil (zentraler Cue) beinhaltete Vorabinformationen über den Ort, die verwendet werden konnten, um die Verarbeitung des Targets zu beeinflussen. Weil der Hinweisreiz von der Versuchsperson interpretiert und willentlich genutzt werden muss, handelt es sich – wie oben bereits angesprochen – um einen endogenen Cue. In ähnlicher Weise wird die Reizverarbeitung erleichtert, wenn im Vorfeld Ortsinformationen in Form eines sensorischen Reizes gegeben werden, der an der wahrscheinlichsten Reiz-Lokation präsentiert wird. Bei diesem Typ von Cueing spricht man von exogenem oder sensorischem Cueing, um seine

Abhängigkeit von sensorischen Informationen zu betonen. Diese Effekte des räumlichen Cueings auf die visuelle Verarbeitung sind nicht auf die einfache Entdeckung überschwelliger Reize begrenzt, sondern lassen sich auf die Diskrimination von Form, Größe, Farbe und Bewegung ausweiten (Bashinski und Bachrach, 1980; Downing, 1988).

Von der erleichterten Reizverarbeitung durch räumliches Cueing in der Abwesenheit von Augenbewegungen wird daher angenommen, dass sie die Aktivierung eines Mechanismus reflektiert, der die Aufmerksamkeit (oder zumindest den Fokus der Verarbeitung) zum Ort des Stimulus verschiebt, noch bevor er dort erscheint. Dies erleichtert die Analyse des Stimulus auf zweierlei Weise: Die visuellen Prozesse können die Analyse des Stimulus schneller an einem beachteten Ort abschließen, weil es Zeit benötigt, die Aufmerksamkeit auf einen neuen Ort zu lenken. Darüber hinaus kann Aufmerksamkeit visuelle Prozesse direkt beeinflussen, indem sie z.B. die Sensitivität an beachteten Lokationen erhöht.

Offene Aufmerksamkeitsshifts

Die Entdeckung der Mechanismen verdeckter ASs zog die Frage nach sich, inwieweit diese Aufmerksamkeitsverlagerungen mit den Mechanismen, die für die Generierung von Sakkaden verantwortlich sind, in Beziehung stehen. Unter normalen Umständen bewegen sich Aufmerksamkeit und Augenbewegungen synchron und wählen ein gemeinsames Target im visuellen Feld. Nach Shepherd und Kollegen (Shepherd, Findlay und Hockey, 1986) kann diese Beziehung drei verschiedene Formen annehmen:

Die Independence-Hypothese besagt, dass Aufmerksamkeit und die Generierung von Sakkaden vollkommen verschiedene Mechanismen umfassen. Diese Annahme hat zur Folge, dass es gleichzeitig möglich sein muss, seine Aufmerksamkeit z.B. nach links zu wenden und eine Augenbewegung nach rechts durchzuführen.

Die Identity-Hypothese beinhaltet hingegen die Auffassung, dass Aufmerksamkeit und die Prozesse zur Generierung von Augenbewegungen auf identischen Mechanismen beruhen. Nach dieser Hypothese soll es nicht möglich sein, seine Aufmerksamkeit z.B. einem Reiz

rechts von einem Fixationspunkt zuzuwenden und zur gleichen Zeit eine Sakkade zu einem Target links vom Fixationspunkt zu initiieren.

Eine Zwischenposition nimmt die so genannte Interdependence-Hypothese ein. Sie geht davon aus, dass Aufmerksamkeit und Prozesse zur Generierung von Augenbewegungen gemeinsame Ressourcen teilen (zumindest auf einigen Verarbeitungsstufen).

Frühere Studien lieferten sich widersprechende Befunde auf die Frage, ob die Vorbereitung einer Augenbewegung zu einem bestimmten Ort die visuelle Verarbeitung von Stimuli, die an eben diesem Ort präsentiert werden, erleichtert, oder umgekehrt, ob ein AS erst die Ausführung einer Augenbewegung ermöglicht (Remington, 1980; Klein, 1980). Außerdem kann unter bestimmten Umständen die Aufmerksamkeit in die entgegengesetzte Richtung einer Augenbewegung gelenkt werden (Posner, 1980). Zusammengefasst wiesen die Ergebnisse darauf hin, dass Aufmerksamkeit und Augenbewegungen entweder unabhängige (Remington, 1980) oder getrennte, aber funktional ähnliche Prozesse waren, so dass sie entweder alleine oder zusammen – je nach Anforderung der Aufgabe – in Aktion treten konnten.

Aufmerksamkeitsshifts und Sakkaden

Neuere Arbeiten eröffneten jedoch die Einsicht, dass Aufmerksamkeit und Augenbewegungen enger miteinander in Verbindung stehen als zunächst angenommen:

Shepherd et al. (1986) eliminierten in ihren Untersuchungen einige methodische Probleme früherer Untersuchungen. Sie kombinierten eine einfache Detektionsaufgabe mit einer Sakkadenaufgabe. Reaktionszeiten dienten als Maß für die Aufmerksamkeit. Ihre Probanden sollten eine Sakkade hin zu einer von zwei Boxen links oder rechts von einem Fixationspunkt ausführen. In welche Richtung die Sakkade ausgeführt werden sollte, wurde durch einen zentralen Pfeil angezeigt. Kurz vor oder nach der Sakkade erschien ein zweiter Stimulus in einer dieser Boxen. Sobald die Versuchspersonen diesen zweiten Reiz entdeckt hatten, sollten sie so schnell wie möglich einen Knopf drücken. Die manuellen Reaktionszeiten waren kürzer, wenn der Ort des Sakkaden-Targets und der Ort des Targets für die manuelle Reaktionszeitaufgabe identisch waren im Vergleich zu der Bedingung, in der

Sakkaden-Target und Target der manuellen Reaktion in unterschiedlichen Hemisphären platziert waren.

Hoffman und Subramaniam (1995) verwendeten ebenfalls eine Doppelaufgabe, in der Versuchspersonen eine Sakkade zu einem spezifischen Ort machen mussten und einen Buchstaben entdecken sollten. Der Buchstabe wurde kurz vor der Augenbewegung an einem von vier möglichen Orten dargeboten. Die Entdeckungsleistung war am besten, wenn die Präsentationsorte von Sakkaden-Target und Buchstabe identisch waren im Vergleich zu den Bedingungen, in denen sie unterschiedlich waren.

Kowler, Anderson, Doshier und Blaser (1995) kombinierten eine Identifikationsaufgabe (Buchstaben) mit einer Augenbewegungsaufgabe. Wieder war die perzeptuelle Leistung am besten, wenn die Sakkade auf den zu identifizierenden Buchstaben ausgerichtet war. Alle diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Mechanismen für eine vorrangige visuelle Verarbeitung und der Programmierung einer Sakkade räumlich aneinander gekoppelt sind. Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist, wie räumlich selektiv diese Kopplung ist: Weil Shepherd et al. (1986) z.B. die Positionen des Targets der Sakkade und des Targets für die manuelle Reaktion zwischen den Hemisphären manipulierten, können ihre Daten keine Auskunft darüber geben, ob der gefundene Reaktionszeitvorteil nur ganz bestimmte Orte betrifft oder das komplette Halbfeld.

Die Annahme eines gemeinsamen aufmerksamkeitsbasierten Mechanismus impliziert, dass die Programmierung von Sakkaden und die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf das Sakkaden-Target nicht voneinander zu trennen sind. Alternativ besteht die Möglichkeit, dass zwei Selektionsmechanismen existieren, die unter normalen Umständen aber nicht notwendigerweise mit einander gekoppelt sind (siehe oben).

Die Befunde von Shepherd et al. (1986), Hoffman und Subramaniam (1995) und Kowler et al. (1995) haben erste Hinweise darauf gegeben, dass eine Trennung zwischen visueller Aufmerksamkeit und der Auswahl eines Sakkaden-Targets nicht möglich ist.

Deubel und Schneider (1996) sind in Anknüpfung an diese Ergebnisse der Frage nachgegangen, wie weit die räumliche Kopplung zwischen visueller Aufmerksamkeit und Sakkaden an einen spezifischen Ort geht. Außerdem sollte in ihren Experimenten geklärt

werden, ob diese Kopplung obligatorischer oder optionaler Natur ist: In einem Dual-Task-Paradigma wurden eine zielgerichtete Sakkade und eine Diskriminationsaufgabe als Maß für die Aufmerksamkeit miteinander kombiniert. Ein zentraler Cue wies auf ein Sakkaden-Target hin, das aus einem Item, platziert in einer von zwei horizontalen Buchstabenketten, bestand, die links und rechts eines zentralen Fixationspunktes präsentiert wurden. Nachdem der Cue dargeboten worden war, aber noch vor der Ausführung der Augenbewegung, wurde ein Diskriminations-Target für eine kurze Zeit eingeblendet, und zwar in der Buchstabenkette auf der Seite des Fixationspunktes, in der das Sakkaden-Target präsentiert worden war. In Experiment 1 variierten Deubel und Schneider (1996) die Positionen des Sakkaden- und des Diskriminations-Targets innerhalb der Kette unabhängig voneinander. Wenn visuelle Aufmerksamkeit und Sakkaden unabhängig voneinander kontrolliert werden können, dann sollte die Diskriminationsleistung nicht vom Ort des Sakkaden-Targets abhängen. Wenn andererseits beide Selektionsprozesse aneinander gekoppelt sind, dann sollte die Diskrimination am besten sein, wenn Sakkaden- und Diskriminations-Target an der gleichen Stelle präsentiert wurden im Vergleich zu Bedingungen mit nicht zusammenfallenden Lokationen. In Experiment 2 untersuchten Deubel und Schneider, ob die Kopplung von Aufmerksamkeit und Sakkaden-Programmierung obligatorisch ist. In diesem Experiment war das Diskriminations-Target immer das zentrale Item der Buchstabenkette. Wenn die Kopplung von Aufmerksamkeit und Sakkaden-Programmierung lediglich optional ist, sollten Versuchspersonen dazu in der Lage sein, eine Sakkade zu einem ausgewählten Ort zu programmieren, während sie gleichzeitig ihre visuelle Aufmerksamkeit auf die zentrale Position in der Buchstabenkette richten, um eine optimale Diskriminationsleistung sicherzustellen. Die Daten der beiden Experimente zeigen, dass die visuelle Diskrimination am besten ist, wenn sich Diskriminations- und Sakkaden-Target auf das gleiche Objekt beziehen; die Unterscheidung benachbarter Items lag etwa auf Zufallsniveau. Außerdem ist es trotz vorheriger Informationen über die Position des Diskriminations-Targets nicht möglich, seine Aufmerksamkeit dem Diskriminations-Target zuzuwenden, während eine Sakkade zu einem räumlich nahen Sakkaden-Target ausgeführt wird. Die Daten sprechen stark für eine

obligatorische und selektive Kopplung von Sakkadenprogrammierung und visueller Aufmerksamkeit an ein gemeinsames Zielobjekt.

Visuelle Aufmerksamkeit und glatte Augenfolgebewegungen

Da das Verhältnis zwischen coverten ASs und Sakkaden weitestgehend geklärt zu sein scheint, wurde in der vorliegenden Untersuchung nun der Frage nachgegangen, in welcher Beziehung covert ASs und glatte Augenfolgebewegungen (GAFs, Singular: GAF) zueinander stehen. Dazu erfolgte zunächst eine Auseinandersetzung mit dem Thema Aufmerksamkeit während GAFs im Allgemeinen. In der Forschungsliteratur zu dieser Thematik fallen zwei bzw. drei Befunde besonders ins Auge: Zum einen sind das die Ergebnisse von van Donkelaar (1999; van Donkelaar und Drew, 2002) und zum anderen die von Khurana und Kowler (1987) sowie die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Resultate zum visuellen Kurzzeitgedächtnis während glatter Augenfolgebewegungen (siehe auch Kerzel und Ziegler, 2005). Van Donkelaar (1999) konnte nämlich nachweisen, dass die visuell-räumliche Aufmerksamkeit während GAFs nicht gleichmäßig verteilt ist. Versuchspersonen reagierten auf periphere Reize, die vor dem Pursuit-Target präsentiert wurden, schneller als auf Reize, die hinter ihm dargeboten wurden. Darüber hinaus war der Reaktionszeitvorteil am größten für Reize, die etwa 1° vor dem Pursuit-Target platziert wurden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Aufmerksamkeit die zukünftige Position des Pursuit-Targets antizipiert. Dieser Befund ist zwar für sich genommen interessant, da aber van Donkelaar (1999) die Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit seiner Probanden nicht experimentell manipulierte, lassen sich keine Aussagen über die Möglich- oder Unmöglichkeit von ASs während Pursuit anhand dieser Ergebnisse machen.

Khurana und Kowler (1987) konnten in ihren Experimenten darlegen, dass die visuelle Suche nach einer kurzzeitig präsentierten Zahl, die in einer Buchstabenkette enthalten war, besser ist, wenn das Target der GAF (eine von vier Buchstabenketten) die Zahl selbst enthält, verglichen mit einer Bedingung, in der ein dem Pursuit-Target naher Distraktor (der sich mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target bewegt) die Zahl enthält. Dieses Ergebnis legt die Annahme nahe, dass visuell-räumliche Aufmerksamkeit an das Target einer GAF

gebunden ist, und dass sie einem Reiz, der nicht das Target der GAF ist, nicht zugewendet werden kann.

Auch die Daten, die im ersten Teil dieser Arbeit beschrieben wurden (siehe auch Kerzel und Ziegler, 2005), legen eine Kopplung visuell-räumlicher Aufmerksamkeit an das Target einer GAF nahe: Die Kapazität des VKZG für die Position peripherer Objekte war reduziert, wenn die Probanden eine GAF durchzuführen hatten, im Vergleich zu einer Bedingung, in der sie einen stationären Reiz lediglich fixieren mussten. Die Reduzierung der Kapazität für die Position von Objekten verschwand, wenn Miniaturreize Verwendung fanden, die auf dem Target der GAF und somit im Fokus der Aufmerksamkeit dargeboten werden konnten.

Sowohl die Studie von Khurana und Kowler (1987) wie auch die im ersten Teil dieser Arbeit dargestellten Daten der Verfasserin sind jedoch dazu ungeeignet, die Frage zu klären, ob covert ASs im Sinne eines exogenen oder endogenen Cueings während GAFs möglich sind. In beiden Untersuchungen mussten die Probanden weite Teile der Peripherie während der Ausführung einer GAF überwachen bzw. dort platzierte Reize verarbeiten. Dieser Punkt steht im Gegensatz zum experimentellen Vorgehen beim Cueing, bei dem ganz bestimmte und räumlich zumeist eng umgrenzte Orte mit Hinweisreizen versehen werden. Die Fragestellung dieser Arbeit war daher, ob trotz der gefundenen Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Target einer GAF dennoch räumlich eng umgrenzte ASs als Antwort auf die Präsentation eines exogenen oder endogenen Cues während Smooth Pursuit möglich sind. Nach dem Wissen der Verfasserin ist dieser Frage bisher nicht nachgegangen worden, was in Anbetracht der Anzahl an Studien zum Thema Sakkaden und Aufmerksamkeit doch erstaunlich erscheint.

Im Detail sollte versucht werden, auf folgende Punkte eine Antwort zu finden: Sind ASs während GAFs möglich? Sind ASs vom verwendeten Cue abhängig (exogen oder endogen)? Finden ASs vielleicht nur in einem bestimmten Referenzsystem statt (hier soll es um die Frage gehen, ob die Veränderung oder Stabilität retinaler oder räumlicher Bezugssysteme während Pursuit einen Einfluss auf den AS hat)? Sind ASs vom verwendeten Aufgabentyp (motorisch oder perzeptuell) abhängig? Welche Auswirkungen haben ASs auf

die GAF selbst, d.h. verändert sich z.B. der Pursuit-Gain in Folge eines AS? Um diesen Fragen nachgehen zu können, führte die Verfasserin eine Serie von Experimenten durch.

Überblick über die einzelnen Experimente

In Experiment 8a wurde untersucht, ob exogene ASs während GAFs möglich sind. Hierzu wurde eine perzeptuelle Diskriminationsaufgabe verwendet, die mit einer Augenfolgebewegungsaufgabe kombiniert wurde. In Experiment 9a wurde mit Hilfe des gleichen Aufgabentyps getestet, ob Versuchspersonen in der Lage sind, auch endogene ASs während einer GAF durchzuführen. In den Experimenten 8b und 9b wurde überprüft, ob die in den Experimenten 8a und 9a gefundenen Resultate bezüglich des Pursuit-Gains tatsächlich auf eine Aufmerksamkeitsverlagerung zurückzuführen sind, oder ob eventuell andere Faktoren für die Ergebnisse ursächlich waren. In den Experimenten 10 und 11 wurden exogene (Experiment 10) und endogene (Experiment 11) ASs während GAFs für eine einfache Detektionsaufgabe untersucht. In Experiment 12 wurden exogene ASs während Pursuit getestet unter Verwendung einer manuellen Diskriminationsaufgabe, in der die Probanden so schnell wie möglich auf das Erscheinen eines peripheren Reizes mit einem Tastendruck reagieren sollten (im Englischen daher auch „speeded discrimination“ genannt). In Experiment 13 wurden schließlich exogene ASs für eine visuelle Diskriminationsaufgabe untersucht, in der die Versuchsteilnehmer unter Zeitdruck eine Sakkade zum Präsentationsort eines peripheren Reizes ausführen sollten.

4.2 Experiment 8a: Exogene Aufmerksamkeitsshifts (perzeptuelle Diskrimination)

In Experiment 8a wurde getestet, ob ASs als Antwort auf ein exogenes Cueing während GAFs möglich sind. Dazu wurden in einem Dual-Task-Paradigma eine Augenbewegungsaufgabe und eine Diskriminationsaufgabe miteinander kombiniert.

In der Diskriminationsaufgabe (Abbildung 4.1) zeigte ein exogener Cue mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% den Ort richtig an, an dem das Diskriminations-Target (ein normales oder ein spiegelverkehrtes „E“) erscheinen würde. In 20% der Durchgänge zeigte der exogene Cue den späteren Präsentationsort des Diskriminations-Targets falsch an. Trials, in denen das Diskriminations-Target an dem Ort dargeboten wird, der zuvor mit einem Cue versehen worden war, bezeichnet man als valide Trials, Durchgänge, in denen Diskriminations-Target und Cue an unterschiedlichen Orten gezeigt werden, als invalide Trials.

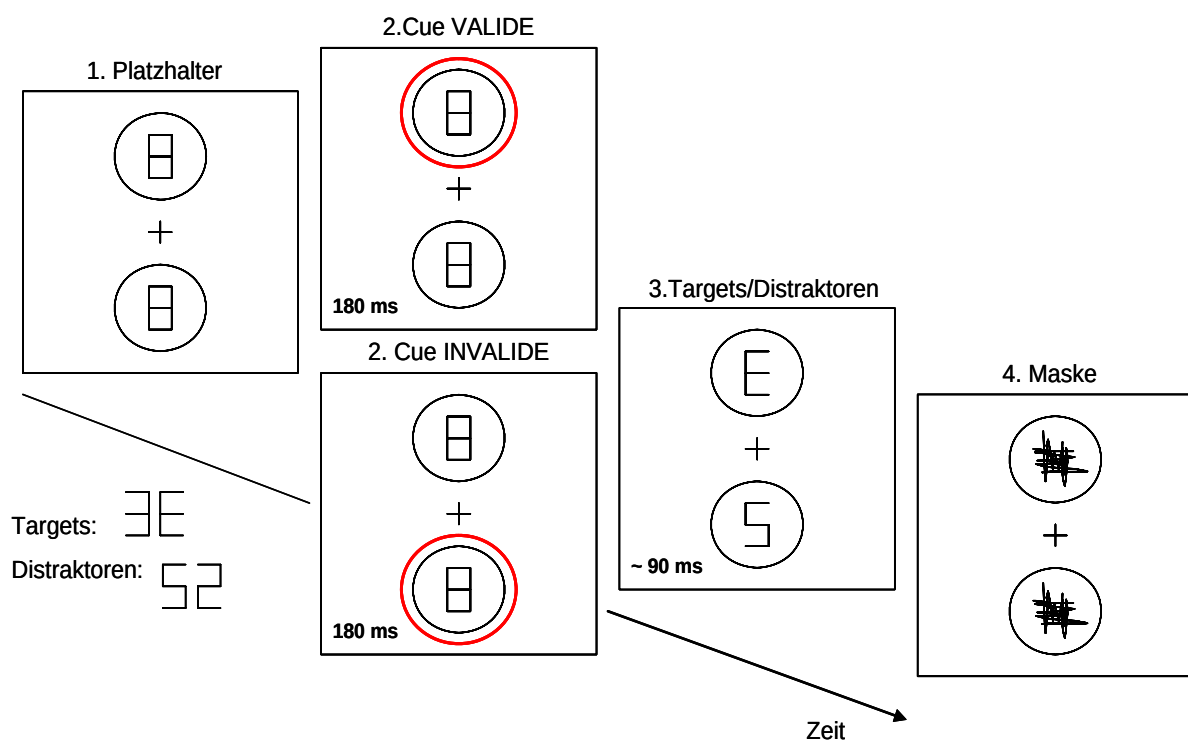


Abbildung 4.1 Schematische Darstellung der Diskriminationsaufgabe mit exogenem Cue aus Experiment 8a. Zu Beginn des Trials erscheint ein zentrales Fixationskreuz. Ober- und unterhalb dieses Fixationskreuzes wird je ein Platzhalter dargeboten. Anschließend wird ein exogener Cue präsentiert, der in dem Dunkelwerden eines der beiden Kreise besteht (hier ist der Cue als roter Kreis, der den Platzhalter umgibt, angedeutet). Der Cue ist in 80% der Trials valide, in 20% invalide. Nach einem SOA von 180 ms werden die Targets und Distraktoren dargeboten. In Experiment 8a lag die durchschnittliche Präsentationsdauer der Targets und Distraktoren bei etwa 90 ms. Anschließend wird eine Maske eingeblendet. Die Aufgabe der Probanden war es anzugeben, ob das E ein normales oder ein spiegelverkehrtes war.

Die Aufgabe der Probanden war es, anzugeben, ob es sich bei dem Diskriminations-Target um ein normales oder ein spiegelverkehrtes E handelte, und jeweils eine entsprechende Taste der Computermouse zu drücken. Der Unterschied in der Diskriminationsleistung der Versuchspersonen zwischen validen und invaliden Trials diente als Maß für die visuelle Aufmerksamkeit.

Diese Diskriminationsaufgabe wurde, wie oben angedeutet, mit einer Augenbewegungsaufgabe kombiniert. Insgesamt wurden vier verschiedene Blickbewegungsbedingungen getestet – zwei Fixationsbedingungen und zwei Smooth Pursuit-Bedingungen (Abbildung 4.2):

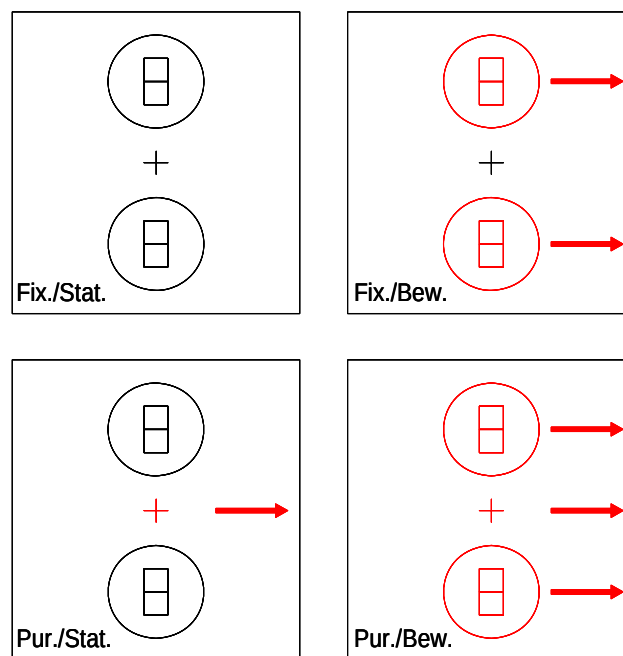


Abbildung 4.2 Schematische Darstellung der Blickbewegungs Aufgabe aus den Experimenten 8a, 8b, 9a und 9b. In den Fixationsbedingungen sollten die Probanden das Fixationskreuz fixieren, in den Pursuit-Bedingungen sollten sie es mit den Augen verfolgen. Weitere Erläuterungen finden sich im Text. Fix./Stat. (oben links) = Fixationsbedingung mit stationären Reizen; Pur./Bew. (unten rechts) = Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen; Fix./Bew. (oben rechts) = Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen; Pur./Stat. (unten links) = Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen. Rote Bildelemente repräsentieren sich bewegende Reize, schwarze Bildelemente repräsentieren stationär dargebotene Reize.

In der ersten Fixationsbedingung (Fixationsbedingung mit stationären Reizen) sollten die Versuchsteilnehmer ein Kreuz in der Mitte des Bildschirms fixieren. Die Reize der Diskriminationsaufgabe, die im Folgenden noch ausführlich beschrieben werden, wurden um das zentrale Fixationskreuz herum stationär dargeboten. Da sich in dieser Bedingung weder die Augen der Versuchsperson noch die Reize der Diskriminationsaufgabe bewegten, würden die Stimuli der Diskriminationsaufgabe sowohl in einem retinalen (retinozentrischen) als auch in einem räumlichen (egozentrischen) Referenzsystem stabil abgebildet werden (siehe dazu auch den ersten Teil dieser Arbeit zum visuellen Kurzzeitgedächtnis während glatter Augenfolgebewegungen).

In der zweiten Fixationsbedingung (Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen) sollten die Probanden wieder ein zentrales Fixationskreuz fixieren, während sich jedoch die Reize der Diskriminationsaufgabe mit einer konstanten Geschwindigkeit horizontal von links nach rechts oder von rechts nach links über den Monitor bewegten. Die in dieser Bedingung vorliegende Kombination aus stationärem Auge und bewegten Diskriminationsreizen führt zu Bewegung bzw. Instabilität im retinalen sowie im räumlichen Bezugssystem.

In der ersten der beiden Smooth Pursuit-Bedingungen (Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen) erschien am linken oder rechten Bildschirmrand ein Fixationskreuz, das sich mit konstanter Geschwindigkeit zunächst auf die Mitte des Monitors zu und anschließend weiter in Richtung des gegenüberliegenden Bildschirmrands bewegte. Diesem sich bewegenden Target sollten die Versuchspersonen so gut wie möglich mit den Augen folgen. Ähnlich wie in der zweiten Fixationsbedingung bewegten sich in dieser Pursuit-Bedingung die Reize der Diskriminationsaufgabe. Die Stimuli, wieder positioniert ober- und unterhalb der Pursuit-Targets, bewegten sich mit gleicher Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung wie das Target der GAF. Die Tatsache, dass sich die Augen der Versuchspersonen mit fast der gleichen Geschwindigkeit wie die Diskriminationsreize bewegten, führte dazu, dass die Diskriminationsreize selbst annähernd stabil auf der Retina der Probanden abgebildet wurden (ähnlich wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen). Während im retinalen Bezugssystem keine Bewegung stattfand, veränderten die Diskriminationsreize ihre Position im Raum, was wiederum Instabilitäten im räumlichen Referenzsystem nach sich zog.

In der zweiten Smooth Pursuit-Bedingung (Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen) erschien wieder am linken oder rechten Bildschirmrand ein Fixationskreuz, das sich mit konstanter Geschwindigkeit zunächst auf die Mitte des Monitors zu und anschließend weiter in Richtung des gegenüberliegenden Bildschirmrands bewegte und das die Versuchsteilnehmer mit den Augen verfolgen sollten. Anders als in der zuvor geschilderten Pursuit-Bedingung wurden die Reize der Diskriminationsaufgabe allerdings nicht bewegt, sondern stationär um den Bildschirmmittelpunkt dargeboten. Dies führte dazu, dass nun die Position der Reize im räumlichen Bezugssystem stabil blieb, während sie sich – aufgrund der Augenbewegung – im retinalen Referenzrahmen veränderte.

Um es nochmals zusammenzufassen, während die Versuchspersonen einen Blickbewegungsreiz fixierten oder ihn – wenn er sich denn bewegte – mit den Augen verfolgten, mussten sie gleichzeitig eine Diskriminationsaufgabe bearbeiten, deren Reize entweder stationär dargeboten wurden oder sich über den Bildschirm bewegten.

Wenn die Probanden grundsätzlich in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit auf einen peripheren Cue zu verlagern, dann würde man eine bessere Diskriminationsleistung in den validen im Vergleich zu den invaliden Durchgängen erwarten. Die Fixationsbedingung mit stationären Reizen diene in diesem Zusammenhang als Baseline-Bedingung, anhand welcher überprüft werden sollte, ob die Präsentation des Cues überhaupt einen Effekt auf die Diskriminationsleistung hat. Ein Vergleich der Fixationsbedingungen mit den Smooth Pursuit-Bedingungen sollte klären, ob exogene ASs auch während GAFs möglich sind, und wenn ja, wie sich die Leistung in den verschiedenen Bedingungen im Einzelnen darstellt. Ein Vergleich der vier Blickbewegungsbedingungen sollte außerdem Klarheit darüber verschaffen, ob – neben der Tatsache, ob sich das Auge bewegt oder nicht – Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden einen Einfluss auf die Diskriminationsleistung haben. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob der AS über mögliche Effekte auf die Diskriminationsleistung hinaus eventuell auch einen Einfluss auf die GAF selbst hat. Dazu wurde der Smooth Pursuit-Gain in den beiden Pursuit-Bedingungen einer eingehenden Betrachtung unterzogen.

4.2.1 Methode

Probanden

Alle Probanden der in diesem Teil der Arbeit geschilderten Experimente waren Studenten der Justus-Liebig-Universität Gießen und wurden für ihre Teilnahme an den Untersuchungen bezahlt. Die Versuchspersonen waren zwischen 22 und 35 Jahren alt und normalsichtig oder trugen entsprechende Sehhilfen (Brille oder „weiche“ Kontaktlinsen), um ihre Sehfehler zu korrigieren. An allen Experimenten nahmen je sechs Probanden teil, mit Ausnahme der Experimente 12 und 13, an denen je sieben Versuchspersonen teilnahmen, und des Experiments 10, für das an insgesamt acht Freiwilligen Daten erhoben wurden. Während die Verfasserin, die an jedem der Experimente selbst teilnahm, über die experimentelle Fragestellung der jeweiligen Untersuchung informiert war, waren die übrigen Probanden naiv. Die Ergebnisse der Verfasserin waren von denen der naiven Probanden nicht signifikant verschieden. Die meisten der naiven Probanden nahmen an mehr als einem Versuch teil, aber keiner von ihnen war über das experimentelle Design oder den theoretischen Hintergrund im Vorfeld aufgeklärt worden. Es erschien sinnvoll, geübte bzw. trainierte Beobachter für die Datenerhebung zu rekrutieren, weil es untrainierten Probanden in der Regel sehr schwer fällt, einem Target mit den Augen zu folgen und gleichzeitig ihre Aufmerksamkeit anderen Objekten zuzuwenden. Es mussten keinerlei Daten von der statistischen Analyse ausgeschlossen werden.

Material und Durchführung

Die Stimuli wurden auf einem 21 Zoll (53.34 cm) CRT-Monitor in einer Auflösung von 1280 (Höhe) x 1024 (Breite) Pixeln und mit einer vertikalen Bildwiederholungsfrequenz von 100 Hz präsentiert. Die Kopfposition der Probanden wurde mit Hilfe einer Kinnstütze in einer Entfernung von 47 cm vom Bildschirm stabilisiert. Die Blickbewegungen der Versuchspersonen wurden mit einem am Kopf der Probanden befestigten, videobasierten Blickbewegungsmessgerät aufgezeichnet (EyeLink II; SR Research, Ltd. Mississauga, Ontario, Kanada).

Alle nachfolgend beschriebenen Stimuli wurden auf einem gleichförmigen, grauen Hintergrund mit einer Helligkeit von 32 cd/m^2 dargeboten. Zu Beginn eines jeden Trials erschien ein $0.4 \times 0.4^\circ$ großes schwarzes Fixationskreuz. Wenn die Versuchsperson bereit war, einen Durchgang zu beginnen, drückte sie eine zuvor bestimmte Taste. Das Blickbewegungsmessgerät führte dann eine Drift-Korrektur durch, um eventuell aufgetretene Verlagerungen des auf dem Kopf des Versuchsteilnehmers befestigten Aufzeichnungssystems zu korrigieren. War die Drift-Korrektur erfolgreich, wurde das Fixationskreuz rot. Die Gesamtdauer eines Trials betrug 2 s.

In der Fixationsbedingung mit stationären Reizen wurde das Fixationskreuz stets in der Bildschirmmitte präsentiert. Die Probanden wurden instruiert, die Fixation auf dem Fixationskreuz aufrechtzuerhalten. Sobald das Fixationskreuz rot wurde, wurde jeweils ober- und unterhalb des Kreuzes ein Kreis mit einem Durchmesser von 2° eingeblendet, welcher je einen Platzhalter enthielten. Der Platzhalter bestand aus zwei $0.5 \times 0.5^\circ$ großen Quadraten, die vertikal direkt übereinander platziert wurden. Die Entfernung des Fixationskreuzes zum jeweiligen Mittelpunkt der beiden Kreise betrug 5° . Die Helligkeit der Kreise und der darin enthaltenen Platzhalter betrug 25 cd/m^2 . Nach einer gewissen Zeit (siehe unten) veränderte sich dann die Helligkeit eines der beiden Kreise. Die Helligkeit wurde für 50 ms auf 0 cd/m^2 herab gesetzt; nach Ablauf der 50 ms nahm der Kreis wieder seine Ausgangshelligkeit an. Das Dunkelwerden eines der beiden Kreise fungierte als exogener Cue, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% den späteren Präsentationsort des Diskriminations-Targets anzeigte. 180 ms nach dem Onset des Cues wurden an der Stelle der Platzhalter die Targets und Distraktoren der Diskriminationsaufgabe dargeboten (das SOA [stimulus onset asynchrony] zwischen Cue und Targets / Distraktoren betrug also 180 ms). Das zeitliche Intervall zwischen Start des Trials und Präsentation des Cues (siehe oben) wurde derart variiert, dass die zeitliche Mitte zwischen Cue und Target zwischen $\pm 300 \text{ ms}$ um den Mittelpunkt der Trajektorie von 2 s Gesamtdauer lag. Als Targets dienten ein E und eine spiegelverkehrtes E, als Distraktoren „Zweien“ und „Fünfen“ (siehe Abbildung 4.1). In einem validen Durchgang wurde an demjenigen Platzhalter, ein E oder ein spiegelverkehrtes E dargeboten, der zuvor durch den Cue markiert worden war. In den invaliden Trials wurde an

demjenigen Platzhalter eines der beiden Targets dargeboten, an dem zuvor kein Cue präsentiert worden war. Die Präsentationsdauer für die Targets und Distraktoren wurde für jede Versuchsperson individuell ermittelt (für eine ausführliche Darstellung der Methode siehe Macmillian und Creelman, 1991): Im Rahmen einer so genannten Staircase-Prozedur wurden den Probanden zunächst diejenigen Stimuli präsentiert, die in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen Verwendung fanden. Aufgabe der Versuchspersonen in jedem Trial war es anzugeben, ob es sich beim Target um ein normales oder ein spiegelverkehrtes E handelte. Dabei wurde die anfängliche Präsentationsdauer der Diskriminationsstimuli nach drei richtigen Urteilen um 10 ms verkürzt, sobald ein falsches Urteil abgegeben wurde, erhöhte sie sich wieder um 10 ms. Als empirische Präsentationsdauer wurde derjenige Wert gewählt, der nach dreimaligem Wechsel von Herauf- und Herabsetzen der Präsentationsdauer erreicht wurde. Dieser Wert wurde dann in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen und der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen verwendet. Für die Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, wurde diese Prozedur wiederholt, allerdings unter Verwendung der Stimuli der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen. Im Mittel lag die Präsentationsdauer der Targets und Distraktoren in diesem Experiment bei 90 ms. Nach der Präsentation der Targets und Distraktoren wurde an der Stelle der Platzhalter eine Maske eingeblendet. Die Maske bestand aus einer zufälligen Anordnung vertikaler und horizontaler schwarzer Striche und wurde bis zum Ende des Trials dargeboten. Die Helligkeit der Targets und Distraktoren und der Maske betrug 0 cd/m^2 .

Die Versuchspersonen wurden instruiert, auf das Erscheinen des Cues hin ihre Aufmerksamkeit auf den jeweiligen Präsentationsort des Cues zu lenken, ohne jedoch dabei den Blick vom Fixationskreuz zu lösen. Die Versuchsteilnehmer wurden außerdem darüber informiert, dass der Cue in 80% der Fälle den Ort des späteren Targets zuverlässig anzeigt und dass es, um in der späteren Diskriminationsaufgabe gut abzuschneiden, daher von Vorteil wäre, tatsächlich seine Aufmerksamkeit zu verlagern. Am Ende eines jeden Trials sollten die Probanden dann angeben, ob es sich bei dem Target um ein E oder ein spiegelverkehrtes E gehandelt hat, und eine entsprechende Taste auf der Computermouse drücken. Für das

Abgeben ihrer Antwort hatten die Versuchsteilnehmer unbegrenzt viel Zeit; war ihre Antwort falsch, wurde ihnen das akustisch rückgemeldet.

In der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen wurde das Fixationskreuz, das zu Beginn eines jeden Trials präsentiert wurde, nicht in der Mitte, sondern zufällig in einer exzentrischen Position 7° links oder rechts vom Bildschirmmittelpunkt dargeboten. In dieser exzentrischen Position sollte das Kreuz von den Probanden zunächst fixiert werden. Nachdem die Versuchsteilnehmer, um den Durchgang zu starten, den entsprechenden Knopf gedrückt hatten, wurde das Fixationskreuz rot. In dieser exzentrischen Position wurden nun ober- und unterhalb des Kreuzes die oben schon beschriebenen Reize der Diskriminationsaufgabe (Kreise und Platzhalter) eingeblendet. Anschließend begannen sich das Fixationskreuz und die Stimuli der Diskriminationsaufgabe zusammen mit einer konstanten Geschwindigkeit von $7^\circ/\text{s}$ auf die Mitte des Bildschirms hin zu bewegen. Die Probanden wurden instruiert, dem sich bewegenden Fixationskreuz so gut wie möglich mit zu Augen zu folgen. Während sich die Reize nun über den Monitor bewegten, wurden der Cue und die Targets und Distraktoren präsentiert und zwar unter Verwendung der gleichen zeitlichen Parameter wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen. Nach Verschwinden der Targets und Distraktoren wurde die Maske dargeboten, und die Reize bewegten sich bis zum Ende des Trials weiter, jetzt in Richtung des Bildschirmrands. Auch in dieser Bedingung sollten die Probanden ihre Aufmerksamkeit auf den Cue verlagern, allerdings sollten sie dies – anders als in der ersten Bedingung – tun, während sich ihre Augen und der Cue bewegten. Alle übrigen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

In der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen verblieb das Fixationskreuz während der Dauer des gesamten Trials – wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen – in der Mitte des Bildschirms. Die Probanden sollten die Fixation auf dem Kreuz aufrechterhalten. Die Stimuli der Diskriminationsaufgabe (Kreise und Platzhalter) erschienen allerdings nicht in der Mitte des Monitors, sondern zufällig in einer exzentrischen Position 7° links oder rechts vom Bildschirmmittelpunkt. Während das Fixationskreuz in der Mitte des Monitors stationär dargeboten wurde, fingen die Stimuli der Diskriminationsaufgabe an, sich auf genau der gleichen Trajektorie über den Bildschirm zu bewegen, wie die Stimuli der

Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen. Auch hier sollten die Probanden ihre Aufmerksamkeit wieder auf den Cue verlagern, dieses Mal jedoch bewegte sich der Cue, während das Fixationskreuz stationär dargeboten wurde. Alle übrigen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

In der vierten experimentellen Bedingung, der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen erschien das Fixationskreuz zufällig in einer exzentrischen Position 7° links oder rechts des Bildschirmmittelpunkts und begann, sich mit konstanter Geschwindigkeit auf die Mitte des Monitors hin zu bewegen. Die Trajektorie des Pursuit-Targets in dieser Bedingung entsprach exakt der Trajektorie in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen. Die Probanden sollten dem Pursuit-Target so gut wie möglich mit den Augen folgen. Die Stimuli der Diskriminationsaufgabe (Kreise und Platzhalter) erschienen in der Mitte des Bildschirms an den Positionen, an denen sie auch in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen dargeboten worden waren, und verblieben dort stationär während der gesamten Dauer des Trials. Wieder sollten die Versuchsteilnehmer ihre Aufmerksamkeit auf den Cue lenken, in dieser Bedingung jedoch während der Cue stationär dargeboten wurde und die Augen der Probanden sich bewegten. Alle übrigen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

Design

Die Daten der Fixationsbedingung mit stationären Reizen und die der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen einerseits und die Daten der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen und die der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen andererseits wurden an zwei unterschiedlichen Tagen erhoben. Die Reihenfolge dieser beiden Experimentalsitzungen wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. Innerhalb einer Experimentalsitzung wurden die verschiedenen Blickbewegungsbedingungen (je eine Fixationsbedingung und eine Pursuit-Bedingung) in Blöcken dargeboten. Die Fixationsbedingung und die Pursuit-Bedingung wurden in kleinen Blöcken von je 40 Trials von den Probanden durchlaufen. In jedem Block wurden valide und invalide Durchgänge zufällig durchmischt. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung

sie als nächste zu bearbeiten hätten. Jede der zwei Blickbewegungsbedingungen wurde zweimal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekali­briert wurde (d.h. nach 160 Durchgängen). Die Abfolge der Experimentalblöcke wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. In einer Experimentalsitzung wurden von den Probanden drei dieser Einzelblöcke à 160 Trials bearbeitet, was insgesamt 480 Durchgänge ergibt. In den zwei Experimentalsitzungen zusammen wurden demnach 960 Trials erhoben.

4.2.2 Ergebnisse

Zunächst wurde für jede experimentelle Bedingung der Prozentsatz korrekter Antworten berechnet. Die Prozentsätze wurden anschließend einer inferenzstatistischen Auswertung zugeführt. Des Weiteren wurde der Smooth Pursuit-Gain berechnet und diese Werte ebenfalls einer inferenzstatistischen Betrachtung unterzogen.

Prozentsatz korrekter Antworten

In Bezug auf die Auswertung der Prozentsätze korrekter Antworten wurden alle diejenigen Durchgänge von der Analyse ausgeschlossen, in denen der Beobachter blinzelte oder in denen er die Fixation nicht aufrecht erhielt (Fixationsbedingungen) bzw. dem Fixationskreuz offensichtlich nicht mit den Augen folgte (Pursuit-Bedingungen) (also z.B. auch, wenn der Proband eine Sakkade zu den Reizen der Diskriminationsaufgabe ausführte). Insgesamt wurden in den Experimenten 8a und 9a weniger als 1% der erhobenen Durchgänge von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Vor der inferenzstatistischen Analyse (t-Test; Varianzanalyse = ANOVA [analysis of variance]) wurden die Prozentsätze korrekter Antworten arcsin transformiert (transformierter Prozentsatz korrekter Antworten = $2 * \arcsin [\text{Prozentsatz korrekter Antworten}]^{0,5}$). Im Text und in den Abbildungen werden jedoch die untransformierten Werte berichtet, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die verschiedenen Experimente hinweg zu erzielen. Die Prozentsätze korrekter Antworten für das Experiment 8a sind in Abbildung 4.3 graphisch dargestellt.

Die dreifaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X valide vs. invalide Trials X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung), messwiederholte ANOVA über die arcsin-transformierten Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass die Leistung der Probanden in den validen Trials (0.78) statistisch signifikant besser war als in den invaliden Trials (0.57), $F(1,5) = 47.66$, $MSE = 52.67E-03$, $p < 0.002$. Alle anderen Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant ($ps > 0.4$). Gepaarte t-Tests für jede der vier Blickbewegungsbedingungen bestätigten den statistisch signifikant Unterschied zwischen validen und invaliden Trials ($ps < 0.009$).

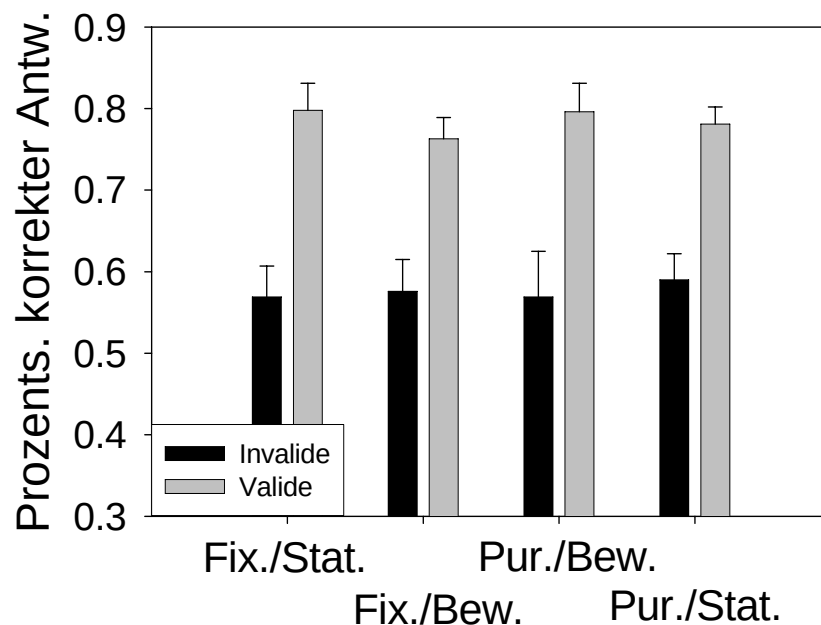


Abbildung 4.3 Die Ergebnisse aus Experiment 8a. Dargestellt sind die mittleren Prozentsätze (Prozents.) korrekter Antworten (Antw.) und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) als Funktion der vier Blickbewegungsbedingungen (Fixationsbedingung mit stationären Diskriminationsreizen = Fix./Stat., Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen = Fix./Bew., Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen = Pur./Bew., Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen = Pur./Stat.) und valider und invalider Trials. Fix. = Fixation; Pur. = Pursuit; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Augenbewegungen

Jede Blickspur wurde zunächst individuell in Augenschein genommen. In Bezug auf die Analyse der Augenbewegungen führten dieselben Kriterien wie bei der Analyse der Prozentsätze korrekter Antworten zum Ausschluss eines Durchgangs von der weiteren

Analyse. Die Anzahl zurückgewiesener Trials betrug in keinem der Experimente (8a, 8b, 9a und 9b) mehr als 1%. Es wurde die mittlere Pursuit-Geschwindigkeit berechnet, nachdem alle Sakkaden aus der Blickspur entfernt wurden. Für die Detektion der Sakkaden wurde der Output des EyeLink II-Augenbewegungs-Parsers verwendet. Dieser Parser klassifiziert Episoden der Blickspur als Sakkaden, in denen die Beschleunigung größer als $4000 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ und die Geschwindigkeit größer als $22 \text{ }^\circ/\text{s}$ ist. Der Gain wurde in diesem Experiment sowie in den Experimenten 8b, 9a und 9b, über insgesamt vierzehn Intervalle von je 50 ms Länge berechnet. Das erste 50 ms-Intervall erstreckte sich von 50 ms vor der Präsentation des Cues bis zum Onset des Cues. Im zweiten Intervall wurde über den Zeitraum von Cue-Onset bis Cue-Offset gemittelt. Das dritte Intervall erstreckte sich vom Cue-Offset bis 100 ms nach Cue-Onset usw. Der Grund dafür, dass der Gain über Intervalle von einer Dauer von 50 ms berechnet wurde, liegt darin, dass die Präsentationsdauer des Cues 50 ms betrug. In der graphischen Darstellung des Gains wurde im Übrigen auf der Zeitachse stets der Cue-Onset als Nullpunkt gewählt. Der Pursuit-Gain für das Experiment 8a ist in Abbildung 4.4 graphisch dargestellt.

Die zweifaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass die Probanden einen höheren Gain hatten, wenn sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target über den Bildschirm bewegten (0.99), was zu einem näherungsweise stabilen Bild der Reize auf der Retina der Versuchspersonen führte im Vergleich zu der Pursuit-Bedingung, in der die Diskriminationsreize stationär dargeboten wurden (0.89) und somit ein retinal instabiles Abbild nach sich zogen, $F(1,5) = 30.17$, $MSE = 14.62\text{E-}03$, $p < 0.004$. Der Haupteffekt des Faktors Zeit zeigte, dass der Gain über die vierzehn 50 ms-Intervalle hinweg abnahm, $F(13,56) = 5.87$, $MSE = 1.10\text{E-}03$, $p < 0.001$. Im ersten Intervall lag der Gain bei 0.97, im letzten Intervall betrug er 0.93. Die signifikante Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Diskriminationsreize X Zeit), $F(13,56) = 8.66$, $MSE = 0.66\text{E-}03$, $p < 0.001$ verdeutlicht jedoch, dass der Haupteffekt des Faktors Zeit im Wesentlichen auf eine Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli zurückzuführen ist (erstes Intervall: 0.94; letztes Intervall:

0.86), während die Werte für den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen über die Zeit hinweg etwa auf dem selben hohen Niveau blieben (erstes Intervall: 1.00; letztes Intervall: 0.99). Dieser Punkt spiegelt sich auch in den Ergebnissen zweier einfaktorieller ANOVAs wider, die für jede Bewegungsbedingung der Diskriminationstimuli einzeln über den Faktor Zeit gerechnet wurden: Während der Haupteffekt der Zeit in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reize nur knapp das Signifikanzniveau erreichte, $F(13,56) = 1.93$, $MSE = 0.40E-03$, $p = 0.043$, zeigte sich ein deutlicher statistisch bedeutsamer Effekt lediglich in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli, $F(13,56) = 8.38$, $MSE = 1.37E-03$, $p < 0.001$. Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant. Auf weitere Ergebnisse bezüglich des Pursuit-Gains wird im Anschluss an die Darstellung des nächsten Experiments noch ausführlicher eingegangen.

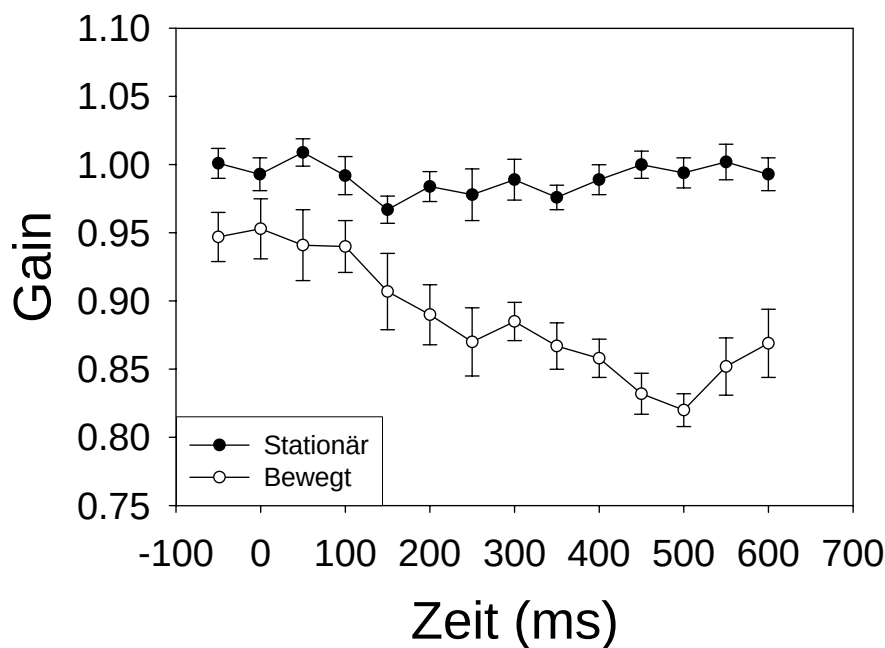


Abbildung 4.4 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 8a. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationsonset des exogenen Cues.

Zusätzlich zu den Prozentsätzen korrekter Antworten und dem Smooth Pursuit-Gain wurde in diesem wie auch in allen übrigen Experimenten in diesem Teil der Arbeit die y-Positionen des Auges der Versuchsteilnehmer während eines Trials analysiert: Sheliga, Riggio und Rizzolatti (1994; siehe auch Sheliga, Riggio, Craighero und Rizzolatti, 1995a; Sheliga, Riggio und Rizzolatti, 1995b; Sheliga, Craighero, Riggio und Rizzolatti, 1997) untersuchten in einer ganzen Reihe von Studien die Trajektorien von Sakkaden während einer Cueing-Aufgabe und konnten nachweisen, dass die Auslenkung der Aufmerksamkeit auf einen Reiz die sakkadische Trajektorie modifiziert. Wenn die Probanden ihre Aufmerksamkeit auf einen Stimuli in der rechten Hemisphäre richteten, wurde eine vertikal auszuführende Sakkade nach links abgelenkt. Wenn sie hingegen die Aufmerksamkeit auf einen Reiz im linken Halbfeld verlagerten, wurde die vertikale Sakkade nach rechts abgelenkt. Die kontralaterale Ablenkung der Sakkade war größer, wenn der visuelle Stimulus, der die Sakkade triggerte, im gleichen Halbfeld (oben oder unten) war wie das Target der Sakkade im Vergleich zu einer Bedingung, in der der visuelle Stimulus, der die Sakkade triggerte, und das Target der Sakkade in unterschiedlichen Hemisphären präsentiert wurden. Die Analyse der Trajektorien der Sakkade zeigte außerdem, dass die kontralaterale Abweichung signifikant größer in den Bedingungen war, in denen Hinweisreize präsentiert wurden im Vergleich zu Bedingungen, in denen keine Cues dargeboten wurden.

Diese Befunde sind von Sheliga und Kollegen im Rahmen der so genannten „Premotor theory of attention“ (Rizzolatti 1983; Rizzolatti und Camarda, 1987a; Rizzolatti et al., 1987b; Umiltà et al., 1991) interpretiert worden. Demnach erwartet ein Proband in der Bedingung, in der ein Cue dargeboten wird, einen imperativen Stimulus in einer präzisen räumlichen Lokation. Diese Erwartung impliziert ein endogen generiertes okulomotorisches Programm in Richtung des Präsentationsortes des Cues, das wahrscheinlich die Aktivierung der Basalganglien einbezieht (Rizzolatti et al., 1994; Sheliga et al., 1994). Im Gegensatz dazu wird die räumliche Verteilung der Aufmerksamkeit in der Bedingung ohne Darbietung eines Cues passiv durch einen Mechanismus bestimmt, in den hauptsächlich der superiore Colliculus involviert ist. Wenn man nun die Annahme akzeptiert, dass die Abweichungen in der Trajektorie der Sakkaden eine Konsequenz der Notwendigkeit ist, bestehende

okulomotorische Programme zu unterdrücken (Rizzolatti et al., 1994; Sheliga et al., 1994), sollte der Unterschied in der Komplexität der Motorprogramme in der Bedingung mit Cue und in der ohne Cue zu den beobachteten Unterschieden in der Stärke der Abweichung der Sakkaden führen.

In der aktuellen Studie sollte nun der Frage nachgegangen werden, ob eine solche Abweichung in der Trajektorie kontralateral zum Präsentationsort eines Cues auch für ein Cueing während GAFs zu beobachten ist. Da die Probanden in diesem Experiment eine GAF in der Horizontalen auszuführen hatten, sollte laut der oben dargestellten Befunde ein oberhalb des Pursuit-Targets präsentierter Cue möglicherweise zu einer Abweichung in der Trajektorie der GAF nach unten führen und umgekehrt. Um dieser Frage nachgehen zu können, wurden die y-Positionen der Augen der Versuchsteilnehmer untersucht und zwar für die vierzehn 50 ms-Intervalle, die auch schon für die Analyse des Gains herangezogen worden waren.

In diesem wie auch in allen anderen Experimenten konnten allerdings keine eindeutigen Ergebnisse gefunden werden: Einmal wich die Trajektorie der GAF tatsächlich in die kontralaterale Richtung des Cues ab, ein anderes Mal zeigte sich eine Abweichung in ipsilateraler Richtung. Diese Abweichungen waren nicht von zeitlichen Aspekten (wie etwa der Präsentation des Cues) abhängig. Weil einerseits die Befundlage zu den Abweichungen der Trajektorie sehr uneinheitlich war und weil andererseits die Abweichungen an sich extrem klein waren (in einer Größenordnung von weniger als einem Pixel), wird darauf verzichtet, die statistischen Analysen zu diesem Punkt der Datenauswertung zu berichten. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und GAFs in dem Sinne, wie Sheliga und Mitarbeiter ihn für Sakkaden und Aufmerksamkeit darlegen konnten, nicht nachweisen ließ.

4.2.3 Diskussion

Das Experiment 8a lieferte vier Hauptbefunde:

Erstens zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die Leistung der Probanden in den validen Durchgängen insgesamt besser war als in den invaliden, was wiederum in Übereinstimmung zu den Resultaten frühere Untersuchungen steht (Posner, 1980).

Zweitens konnte dieser Cueing-Effekt für alle vier Blickbewegungsbedingungen (Fixation und stationäre Reize, Pursuit und sich bewegende Reize, Fixation und sich bewegende Reize und Pursuit und stationäre Reize) nachgewiesen werden. Dabei war der gefundene Cueing-Effekt für alle vier Blickbewegungsbedingungen interessanterweise ähnlich groß. Die Resultate weisen daraufhin, dass im Gegensatz zu früheren Befunden (z.B. Khurana und Kowler, 1987) Versuchspersonen in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit vom Target einer GAF zu lösen und einem peripheren Reiz, hier einem exogenen Cue, zuzuwenden. Aufmerksamkeitsverlagerungen als Antwort auf die Präsentation eines exogenen Cues sind während GAFs also möglich. An diesem Punkt wird auch deutlich, dass die vorliegenden Ergebnisse zu Aufmerksamkeit und Pursuit von den Ergebnissen, die zu Sakkaden und ASs berichtete wurden (Deubel und Schneider, 1996), deutlich verschieden sind.

Drittens ist festzuhalten, dass auch Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden keinen Einfluss auf die Ausführung von ASs während GAFs zu haben scheinen. Die Leistung der Probanden war stets gleich gut, unabhängig davon, ob sowohl das retinale als auch das räumliche Referenzsystem stabil gehalten wurden (Fixationsbedingung mit stationären Diskriminationsstimuli), in beiden Systemen Veränderungen auftraten (Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen) oder ob nur in einem der beiden Bezugssysteme stabile Bedingungen aufrechterhalten wurden (in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen blieb nur das retinale Abbild der Stimuli unverändert, in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen hingegen war nur die räumliche Position der Stimuli immer identisch).

Viertens und letztens ist festzuhalten, dass die Tatsache, ob sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe bewegten oder nicht (im Sinne von [In-]Stabilität im räumlichen oder retinalen Referenzsystem), – anders als in Bezug auf den Prozentsatz korrekter Antworten – einen ganz erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hatte: Bewegten sich die Diskriminationsreize mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Target der GAF (was zu einem annähernd stabilen Abbild der Reize auf der Retina führt), war der Gain über den gesamten Zeitraum der Messung stabil einem Wert nahe 1.0. Wenn hingegen die Diskriminationsreize stationär in der Mitte des Bildschirm dargeboten wurden, sie sich also durch die auszuführende GAF auf der Retina der Probanden bewegten, zeigte sich ein deutlicher Leistungsabfall in den Werten des Gains über die Zeit. Hier kann zusammenfassend festgehalten werden, dass exogene ASs und retinal stabile Diskriminationsreize scheinbar keinen nachteiligen Einfluss auf den Pursuit-Gain haben; exogene ASs und retinal bewegte Diskriminationsstimuli führen hingegen zu einer Verschlechterung des Gains über die Zeit.

Diese letzte Beobachtung führte nun zu der Frage, ob die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen im Vergleich zu der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen ausschließlich auf den von den Probanden ausgeführten AS zurückzuführen ist, oder aber ob andererseits nur die Tatsache, dass sich die Diskriminationsreize in einem retinalen Bezugssystem bewegten, ursächlich für diesen Befund ist. Dabei kann nahezu ausgeschlossen werden, dass eventuell das Betrachten der Diskriminationsreize aus unterschiedlichen Blickwinkeln in den beiden Pursuit-Bedingungen für die gefundenen Unterschiede verantwortlich ist. Denn obwohl die Diskriminationsstimuli in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen in der Mitte des Monitors präsentiert wurden, war der Winkel, aus dem sie betrachtet wurden, aufgrund der zeitlichen Parameter eines Trials, weitestgehend der gleiche wie in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen. Um diesem Punkt zu klären, wurde das Experiment 8b durchgeführt.

4.3 Experiment 8b: Smooth Pursuit während der Darbietung eines exogenen Cues

In Experiment 8b sollte der Frage nachgegangen werden, ob die Verschlechterung des Smooth Pursuit-Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen in Experiment 8a tatsächlich auf einen AS zurückzuführen ist oder ob sie nur auf Faktoren des experimentellen Display betreffend zurückgeht. Wenn für die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen ausschließlich die Durchführung eines AS verantwortlich ist, dann sollte diese Verschlechterung nicht auftreten, wenn den Probanden die gleichen experimentellen Stimuli wie in Experiment 8a präsentiert werden, sie jedoch keinen AS durchführen müssen. Wenn die Verschlechterung des Gains hingegen nicht auf eine AS zurückgeht sondern, darauf, dass sich die Diskriminationsstimuli im retinalen Referenzsystem bewegten, dann sollte die Verschlechterung des Gains bestehen bleiben, wenn unter Verwendung der gleichen Reize wie in Experiment 8a, den Probanden kein AS abverlangt wird.

Das Experiment 8a wurde also unter Verwendung der exakt gleichen Stimuli wiederholt, der einzige Unterschied bestand darin, dass die Versuchspersonen instruiert wurden, dem Target der GAF so gut wie möglich mit den Augen zu folgen, während die Diskriminationsstimuli vollkommen zu ignorieren waren. Die Diskriminationsaufgabe aus Experiment 8a entfiel demnach.

4.3.1 Methode

Probanden

An Experiment 8b nahmen die gleichen Versuchspersonen wie an Experiment 8a teil.

Material, Durchführung und Design

Material, Durchführung und Design waren wie in Experiment 8a mit folgenden Modifikationen: Nur die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen und die Pursuit-

Bedingung mit stationären Reizen wurden getestet. Anders als in Experiment 8a wurden die Probanden instruiert, dem Target der GAF so gut wie möglich mit den Augen zu folgen und dabei die Diskriminationsaufgabe zu ignorieren. Die Versuchsteilnehmer sollten ausdrücklich nicht ihre Aufmerksamkeit auf den Präsentationsort des Cues verlagern.

Da in Experiment 8b nur zwei der insgesamt vier Bedingungen aus Experiment 8a getestet wurden, konnten die Daten in einer einzigen Experimentalsitzung erhoben werden. Die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen wurden in zwei Blöcken von je 160 Trials von den Probanden durchlaufen. Nach einem Block à 160 Trials wurde das Blickbewegungsmessgerät rekali­briert. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung sie als nächste zu bearbeiten hätten. Die Abfolge der 160er-Blöcke wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. In einer Experimentalsitzung wurden 320 Trials erhoben.

4.3.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 8a analysiert. Der Smooth Pursuit-Gain für Experiment 8b ist in Abbildung 4.5 graphisch dargestellt.

Die zweifaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass die Probanden einen leicht höheren Gain hatten, wenn sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target über den Bildschirm bewegten (0.99) im Vergleich zu der Pursuit-Bedingung in der die Diskriminationsreize stationär dargeboten wurden (0.97), $F(1,5) = 11.99$, $MSE = 1.30E-03$, $p < 0.02$. Obwohl die Tatsache, ob sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe bewegten oder nicht, auch in diesem Experiment einen Einfluss auf die Ergebnisse hatte, war der Effekt statistisch weniger bedeutsam ($p < 0.02$) als in Experiment 8a ($p < 0.004$). Der Haupteffekt des Faktors Zeit war nicht signifikant, $F(13,56) = 1.39$, $MSE = 0.59E-03$, $p = 0.189$. Die Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Diskriminationsreize X Zeit) war jedoch wieder signifikant, $F(13,56) = 2.22$, $MSE = 0.39E-03$, $p < 0.02$. Diese Interaktion wurde nochmals in zwei

einfaktoriellen ANOVAs, die für jede Bewegungsbedingung der Diskriminationstimuli einzeln über den Faktor Zeit gerechnet wurden, einer genaueren Betrachtung unterzogen: Während der Haupteffekt der Zeit in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen nicht signifikant wurde, $F(13,56) = 1.58$, $MSE = 0.55E-03$, $p = 0.113$, zeigte sich ein knapp statistisch bedeutsamer Effekt in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli, $F(13,56) = 1.89$, $MSE = 0.43E-03$, $p = 0.047$. Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant.

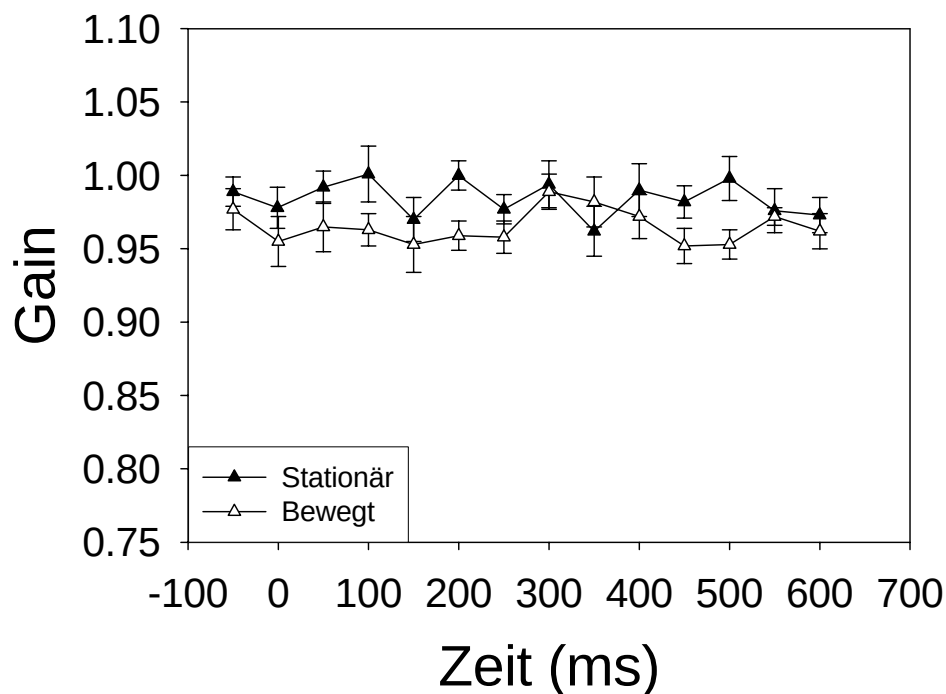


Abbildung 4.5 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 8b. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Dreiecke) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Dreiecke). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationonset des exogenen Cues.

4.3.3 Diskussion

Die Ergebnisse des Experiments 8b zeigen, dass die in Experiment 8a beobachtete Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen über den zeitlichen Verlauf eines Trials hinweg nahezu verschwindet, wenn die Versuchspersonen instruiert werden, ausdrücklich keinen AS zum exogenen Cue auszuführen. Dieses Resultat macht deutlich, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen in Experiment 8a auf das Ausführen eines AS zurück geht und nicht etwa ausschließlich damit in Zusammenhang steht, dass anders als in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die Stimuli der Diskriminationsaufgabe stationär in der Mitte des Monitors dargeboten wurden. Das Nicht-Ausführen eines AS hatte auf den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reize keinen Einfluss: Er war über den Experimentaldurchgang hinweg immer nahe einem Wert von 1.0.

4.4 Vergleich des Gains der Experimente 8a und 8b

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezüglich des Smooth Pursuit-Gains aus dem Experimenten 8a und 8b noch einmal zusammenfassend dargestellt. Aus diesem Grund ist der Gain der beiden Experimente in Abbildung 4.6 gemeinsam graphisch abgebildet.

Aus Experiment 8a geht hervor, dass retinale Bewegung der Diskriminationsstimuli einen erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hat. In der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen führt die identische Geschwindigkeit von Diskriminationsreizen und Target der GAF über den Bildschirm dazu, dass die Reize auf der Retina der Probanden annähernd stabil abgebildet werden. In dieser Bedingung war der Pursuit-Gain über den gesamten gemessenen Zeitraum hinweg nahe dem Wert 1.0. Die Pursuit-Bedingung mit stationär dargebotenen Reizen führt aufgrund der Kombination einer GAF mit stationären Stimuli dazu, dass die Diskriminations-Targets sich über die Retina der Probanden bewegen. Der Gain verschlechterte sich in dieser Bedingung mit Fortschreiten der Zeit. Zu Beginn der

Messung lag der Gain etwa bei 0.95, am Ende der Messung war er auf einen Wert um 0.87 abgefallen.

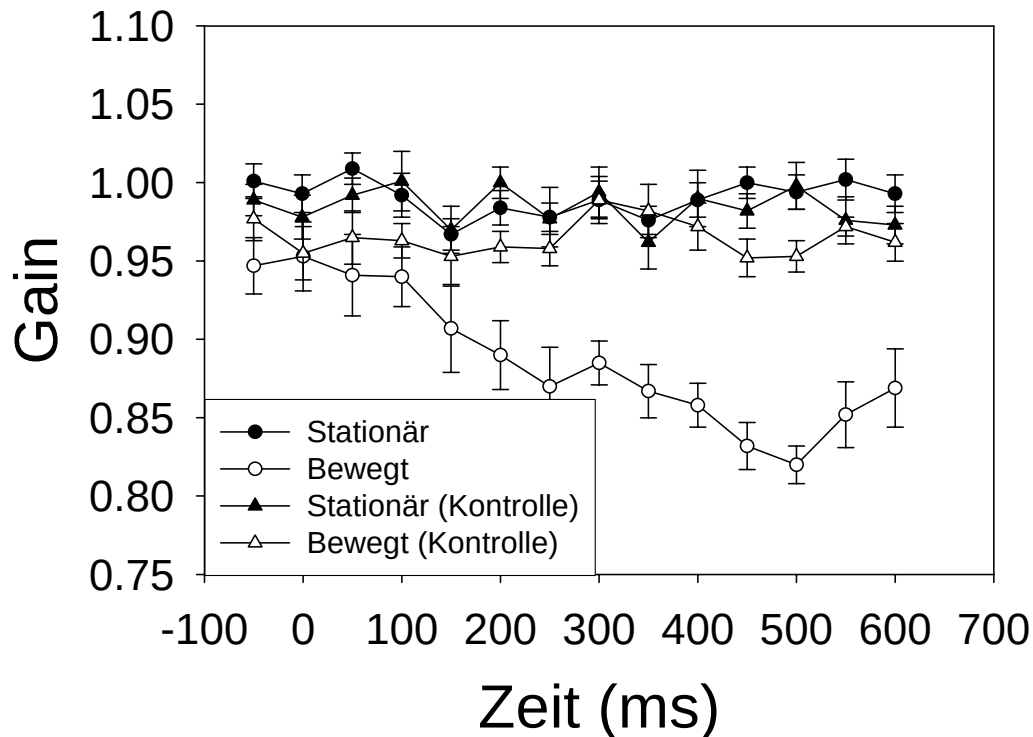


Abbildung 4.6 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 8a und Experiment 8b. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder stationären Abbild führt (schwarze Kreise = Experiment 8a; schwarze Dreiecke = Experiment 8b [Kontrolle]) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina bewegendem Abbild führt (weiße Kreise = Experiment 8a; weiße Dreiecke = Experiment 8b [Kontrolle]). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationsonset des exogenen Cues.

Die Ergebnisse des Experiments 8b zeigen deutlich, dass der Abfall des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen aus Experiment 8a verschwindet, wenn die Probanden ausdrücklich instruiert werden, keinen AS auszuführen. Es bestehen zwar weiterhin statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen (siehe oben), diese sind jedoch wesentlich kleiner als in Experiment 8a. Die Resultate der beiden

Experimente zusammen legen den Schluss nahe, dass die Verschlechterung der Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen (Experiment 8a) tatsächlich auf die Ausführung eines AS zurückzuführen ist und nicht allein auf die Tatsache, dass die Diskriminations-Targets in der Bildschirmmitte stationär dargeboten wurden (wenn dies der Fall gewesen wäre, dann hätte sich eine Abnahme des Gains auch in Experiment 8b zeigen müssen).

Ob das Ausführen eines AS während GAFs einen Einfluss auf den Pursuit-Gain hat, hängt im Sinne einer Interaktion davon ab, ob sich die Diskriminations-Targets bewegen oder stationär präsentiert werden. Exogene ASs und retinal stabile Diskriminationsreize haben keine nachteiligen Auswirkungen auf den Gain; exogene ASs haben nur dann einen negativen Effekt auf den Gain, wenn die Diskriminationstimuli stationär dargeboten werden.

Um schließlich zu klären, zu welchem Zeitpunkt die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen statistisch nachzuweisen ist, wurde eine Reihe gepaarter t-Tests gerechnet. Dazu wurden jeweils die Werte für den Gain der Pursuit-Bedingungen mit sich bewegenden Reize aus Experiment 8a und Experiment 8b für jedes der vierzehn 50 ms-Intervalle miteinander verglichen; für den Gain der Pursuit-Bedingungen mit stationären Reizen wurde ebenso verfahren. Die p-Werte für den Vergleich der beiden Pursuit-Bedingungen mit sich bewegenden Reizen zeigen, wie erwartet, keine signifikanten Unterschiede (p-Werte für den Vergleich der vierzehn Intervalle: 0.460, 0.527, 0.418, 0.773, 0.895, 0.448, 0.983, 0.860, 0.505, 0.956, 0.077, 0.850, 0.335, 0.254). Die p-Werte für den Vergleich der beiden stationären Pursuit-Bedingungen verdeutlichen, dass das Absinken des Gains in Experiment 8a zu einem Zeitpunkt etwa 150 ms nach Onset des Diskriminations-Target statistisch bedeutsame Ausmaße annimmt (p-Werte für den Vergleich der vierzehn Intervalle: 0.251, 0.951, 0.449, 0.382, 0.198, 0.021, 0.022, 0.005, 0.007, 0.001, 0.001, 0.001, 0.001, 0.003). Auf diesen Punkt wird nach der Schilderung der nächsten beiden Experimente noch einmal eingegangen.

4.5 Experiment 9a: Endogene Aufmerksamkeitsshifts (perzeptuelle Diskrimination)

Bereits in der Einleitung zu Experiment 8a ist neben dem Begriff „exogene“ Aufmerksamkeitsverlagerung auch schon der Terminus „endogener“ Aufmerksamkeitsshift gefallen. Diese beiden Modi der Aufmerksamkeitsverlagerung werden häufig auch als „reflexiv“ (exogen) und „willentlich“ (endogen) bezeichnet. Jonides (1981) hat in Anlehnung an Posner (1980) diese Unterscheidung erweitert, indem er vorschlug, dass sich reflexive und willentliche ASs in ihrer Automatizität unterscheiden. Reflexive ASs, getriggert von peripheren Cues, sind automatisch, während willentliche ASs, initiiert durch zentrale Cues, kontrolliert sind. Ähnlich wie Posner (1980) hat Jonides (1981) angenommen, dass es einen Mechanismus gibt, der für ASs verantwortlich ist, aber dass dieser Mechanismus entweder automatisch oder willentlich kontrolliert wird. Müller und Findlay (1988) hingegen haben die Annahme eines gemeinsamen Aufmerksamkeitsmechanismus durch den Vorschlag ersetzt, es gäbe zwei separate Mechanismen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Onset des Cues zum Tragen kommen. Periphere Cues triggern demnach sowohl schnelle reflexive (automatische) als auch langsame willentliche (kontrollierte) Aufmerksamkeitsmechanismen. Zentrale Cues initiieren dagegen nur den willentlichen Aufmerksamkeitsmechanismus.

Was hier schon angedeutet wird, dass es also Unterschiede im zeitlichen Verlauf von exogenem und endogenem Cueing gibt (Unterschiede im zeitlichen Verlauf zwischen peripherem und zentralem Cueing reflektieren wahrscheinlich Unterschiede in der Zeit, die nötig ist, um einen Cue zu verarbeiten; siehe dazu auch Eriksen und Colegate, 1971 sowie Eriksen und Hoffman, 1972), haben Müller und Findlay (1988) sowie später Müller und Rabbitt (1989) eingehender untersucht: Sie konnten nachweisen, dass periphere (exogene) Cues die größten fördernden Effekte auf die Wahrnehmung innerhalb der ersten 150 ms nach dem Cue-Onset haben. Die größten Effekte eines zentralen (endogenen) Cues auf die Wahrnehmung zeigen sich hingegen erst 300 ms nach Onsets des Cues. Dieser Punkt ist insofern nicht erstaunlich, weil der endogene Cue im Gegensatz zum exogenen Cue zunächst von den Probanden interpretiert werden muss und diese Interpretation Zeit benötigt.

In Experiment 9a sollte einerseits die Frage geklärt werden, ob endogene ASs grundsätzlich genauso wie exogene ASs während GAFs möglich sind, andererseits diene dieses Experiment im Vergleich mit Experiment 8a aber auch dazu, eventuell vorhandene Unterschiede der zeitlichen Charakteristika von exo- und endogenem Cueing darzustellen.

Dazu wurden wie in Experiment 8a in einem Dual-Task-Paradigma eine Augenbewegungsaufgabe und eine Diskriminationsaufgabe miteinander kombiniert. Bezüglich der Diskriminationsaufgabe (Abbildung 4.7) zeigte ein endogener Cue mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% den Ort richtig an, an dem das Diskriminations-Target (ein normales oder ein spiegelverkehrtes „E“) erscheinen würde. In 20% der Durchgänge zeigte der endogene Cue den späteren Präsentationsort des Diskriminations-Targets falsch an. Die Aufgabe der Probanden war es, anzugeben, ob es sich bei dem Diskriminations-Target um ein normales oder eine spiegelverkehrtes E handelte.

Diese Diskriminationsaufgabe wurde – wie in Experiment 8a – mit einer Augenbewegungsaufgabe kombiniert. Insgesamt wurden wieder die vier verschiedenen und oben schon ausführlich beschriebenen Blickbewegungsbedingungen getestet (Abbildung 4.2).

In Experiment 9a wurden dieselben Annahmen überprüft wie in Experiment 8a: Wenn die Versuchsteilnehmer fähig sind, ihre Aufmerksamkeit auf die Präsentation eines zentralen Cues hin zu verlagern, dann würde man eine bessere Diskriminationsleistung in den validen im Vergleich zu den invaliden Durchgängen erwarten. Ein Vergleich der Fixationsbedingungen mit den Smooth Pursuit-Bedingungen sollte klären, ob endogene ASs während GAFs möglich sind und wenn ja, wie sich die Leistung in den verschiedenen Bedingungen im Einzelnen darstellt. Ein Vergleich der vier Blickbewegungsbedingungen sollte Klarheit darüber verschaffen, ob Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden einen Einfluss auf die Diskriminationsleistung haben. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob der endogene AS einen Effekt auf den Smooth Pursuit-Gain in den beiden Pursuit-Bedingungen hat.

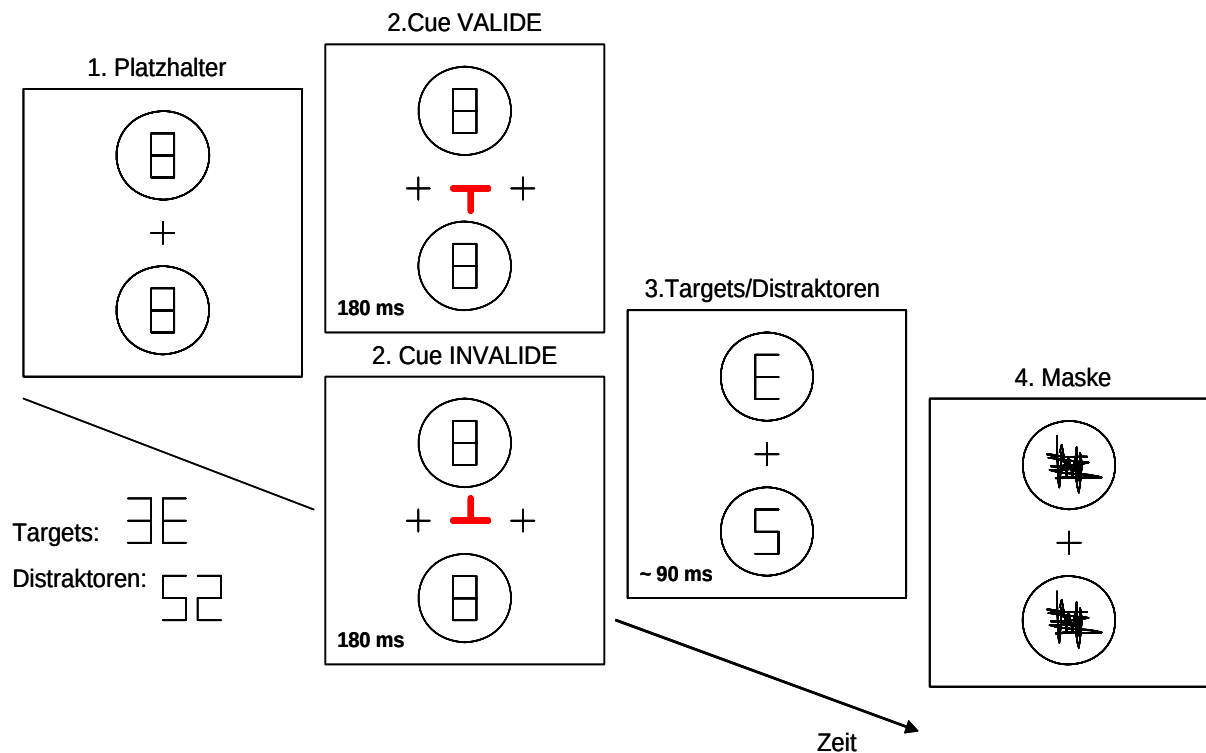


Abbildung 4.7 Schematische Darstellung der Diskriminationsaufgabe aus Experiment 9a in einem Experimentaldurchgang mit endogenem Cue. Zu Beginn des Trials erscheint ein zentrales Fixationskreuz. Ober- und unterhalb dieses Fixationskreuzes wird je ein Platzhalter dargeboten, bestehend aus einem Kreis und zwei darin enthaltenen Quadraten. Anschließend wird ein endogener Cue präsentiert, der in dem Verschwinden des oberen oder unteren Arms des Fixationskreuzes besteht. Der Cue ist in 80 % der Trials valide, in 20 % invalide. Nach einem SOA von 180 ms werden die Targets und Distraktoren dargeboten. In Experiment 9a lag die durchschnittliche Präsentationsdauer der Targets und Distraktoren bei etwa 90 ms. Anschließend wird eine Maske eingeblendet. Die Aufgabe der Probanden war es anzugeben, ob das E ein normales oder ein spiegelverkehrtes war.

4.5.1 Methode

Probanden

An Experiment 9a nahmen die gleichen sechs Versuchspersonen teil, die zuvor bereits an Experimenten 8a teilgenommen hatten.

Material, Durchführung und Design

Material, Durchführung und Design waren exakt wie in Experiment 8a mit folgenden Modifikationen: Alle vier Blickbewegungsbedingungen aus Experiment 8a (Fixationsbedingung mit stationären Reizen, Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen, Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen) wurden in Kombination mit der Diskriminationsaufgabe getestet. Der einzige Unterschied zwischen diesem Experiment und dem Experiment 8a bestand in der Verwendung eines anderen Cues: Während in Experiment 8a ein exogener Cue dargeboten wurde, wurde im aktuellen Experiment ein endogener Cue präsentiert. Anders als in Experiment 8a veränderte sich die Helligkeit des Kreises (Platzhalter) nicht. Als endogener Cue fungierte in diesem Experiment das Verschwinden des oberen bzw. unteren „Arms“ des Fixationskreuzes (Abbildung 4.7). Verschwand der obere Arm des Fixationskreuzes für 50 ms (nach Ablauf der 50 ms erschien der Arm wieder und komplettierte somit das Fixationskreuz), sollten die Probanden ihre Aufmerksamkeit auf die Diskriminationsstimuli oberhalb des Fixationskreuzes ausrichten, verschwand der untere Arm (ebenfalls für 50 ms), sollten die Versuchsteilnehmer ihre Aufmerksamkeit auf die Stimuli unterhalb des Fixationskreuzes lenken.

Der entscheidende Unterschied im Vergleich zu Experiment 8a ist also, dass der Cue nicht am Präsentationsort der Taregts und Distraktoren dargeboten wurde, sondern an räumlich anderer (zentraler) Stelle. Der endogene Cue musste von den Versuchspersonen vor der Ausführung der Aufmerksamkeitsverlagerung also zunächst interpretiert werden. Dieser Aspekt der Interpretation führte dazu, dass endogene Cues auch als kognitive Cues bezeichnet wurden (Corbetta, 1998).

4.5.2 Ergebnisse

Die Rohdaten aus Experiment 9a wurden wie in Experiment 8a analysiert.

Prozentsatz korrekter Antworten

Die Prozentsätze korrekter Antworten für das Experiment 9a sind in Abbildung 4.8 graphisch dargestellt.

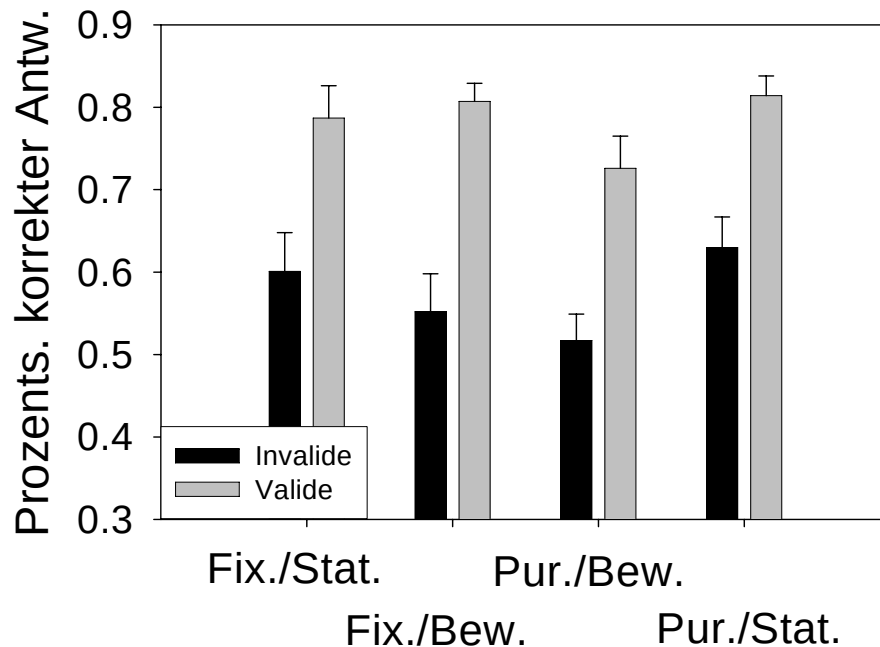


Abbildung 4.8 Die Ergebnisse aus Experiment 9a. Dargestellt sind die mittleren Prozentsätze (Prozents.) korrekter Antworten (Antw.) und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) als Funktion der vier Blickbewegungsbedingungen (Fixationsbedingung mit stationären Diskriminationsreizen = Fix./Stat., Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen = Fix./Bew., Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen = Pur./Bew., Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen = Pur./Stat.) und valider und invalider Trials. Fix. = Fixation; Pur. = Pursuit; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Die dreifaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X valide vs. invalide Trials X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung), messwiederholte ANOVA über die arcsin-transformierten Prozentsätze korrekter Antworten zeigte, dass die Leistung der Probanden in den validen Trials (0.78) statistisch signifikant besser war als in den invaliden Trials (0.58), $F(1,5) = 55.27$, $MSE = 46.38E-03$, $p < 0.002$). Alle anderen Haupteffekte waren nicht signifikant ($ps > 0.1$). Nur die Zweifach-Interaktion (stationäre vs. bewegte

Diskriminationsreize X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung) war signifikant, $F(1,5) = 40.13$, $MSE = 4.78E-03$, $p < 0.002$. Diese Interaktion deutet darauf hin, dass die Probanden in den beiden Bedingungen, in denen die Diskriminationsstimuli stationär dargeboten wurden, besser waren, wenn sie das Fixationskreuz fixieren mussten (0.69), als wenn es sich bewegte und sie es mit den Augen verfolgen mussten (0.62) und dass dieser Effekt in den Bedingungen mit sich bewegenden Stimuli genau umgekehrt war (Fixation: 0.68; Pursuit: 0.72). Gepaarte t-Tests für jede der vier Blickbewegungsbedingung bestätigten den statistisch signifikanten Unterschied zwischen validen und invaliden Trials ($ps < 0.05$).

Augenbewegungen

Die Pursuit-Gain für das Experiment 9a ist in Abbildung 4.9 graphisch dargestellt.

Die zweifaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass die Probanden einen höheren Gain hatten, wenn sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target über den Bildschirm bewegten (1.00) im Vergleich zu der Pursuit-Bedingung in der die Diskriminationsreize stationär dargeboten wurden (0.92), $F(1,5) = 80.12$, $MSE = 3.76E-03$, $p < 0.001$. Der Haupteffekt des Faktors Zeit zeigte, dass der Gain über die vierzehn 50 ms-Intervalle hinweg abnahm, $F(13,56) = 14.20$, $MSE = 1.18E-03$, $p < 0.001$. Im ersten Intervall lag der Gain beispielsweise bei 1.00, im letzten Intervall betrug er nur noch 0.91. Die signifikante Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Diskriminationsreize X Zeit), $F(13,56) = 31.17$, $MSE = 0.40E-03$, $p < 0.001$ verdeutlicht jedoch, dass der Haupteffekt des Faktors Zeit im Wesentlichen auf eine Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli zurückzuführen ist (erstes Intervall: 0.98; letztes Intervall: 0.84), während die Werte für den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen über die Zeit hinweg etwa auf dem selben hohen Niveau blieben (erstes Intervall: 1.02; letztes Intervall: 0.98). Dieser Punkt spiegelt sich auch in den Ergebnissen zweier einfaktorieller ANOVAs wider, die für jede Bewegungsbedingung der Diskriminationstimuli einzeln über den Faktor Zeit gerechnet wurden: Während der Haupteffekt der Zeit in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen nur knapp das

Signifikanzniveau erreichte, $F(13,56) = 2.18$, $MSE = 0.50E-03$, $p = 0.02$, zeigte sich ein statistisch bedeutsamer Effekt lediglich in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli, $F(13,56) = 26.04$, $MSE = 1.063E-03$, $p < 0.001$. Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant. Auf weitere Ergebnisse bezüglich des Pursuit-Gains wird im Anschluss an die Darstellung des nächsten Experiments noch ausführlicher eingegangen.

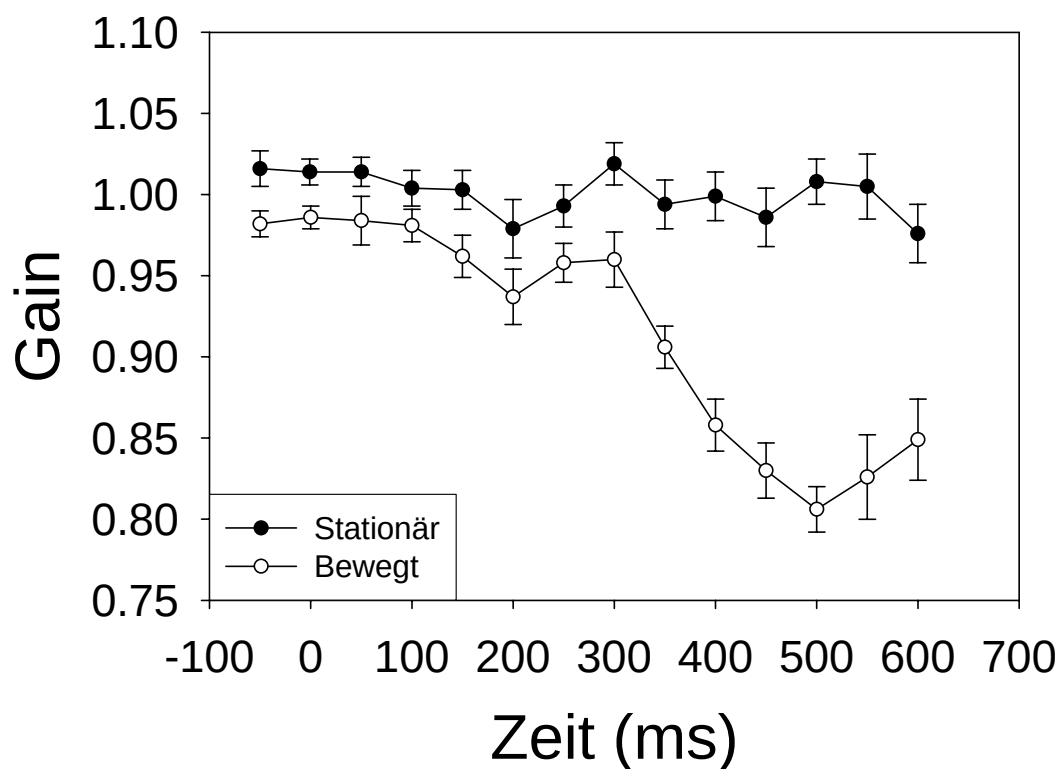


Abbildung 4.9 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 9a. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationsonset des endogenen Cues.

4.5.3 Diskussion

Das Experiment 9a lieferte vier Hauptbefunde:

Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistung der Probanden in den validen Durchgängen insgesamt besser war als in den invaliden, was wiederum in Übereinstimmung zu den Resultaten früherer Untersuchungen steht (Posner, 1980).

Zweitens konnte dieser Cueing-Effekt für alle vier Blickbewegungsbedingungen nachgewiesen werden. Der gefundene Cueing-Effekt ist für alle vier Blickbewegungsbedingungen ähnlich groß. Auch diese Resultate weisen wieder daraufhin, dass im Gegensatz zu früheren Befunden (z.B. Khurana und Kowler, 1987), Versuchspersonen in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit vom Target einer GAF zu lösen und sie als Antwort auf einen endogenen Cue einem anderen Ort zuzuwenden. Aufmerksamkeitsverlagerungen als Antwort auf die Präsentation eines endogenen Cues sind während GAFs möglich.

Drittens ist festzuhalten, dass auch Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden keinen Einfluss auf die Ausführung von ASs während GAFs zu haben scheinen. Die Leistung der Probanden war stets gleich gut, unabhängig davon, ob sowohl das retinale als auch das räumliche Referenzsystem stabil gehalten wurden, in beiden Systemen Veränderungen auftraten oder ob nur in einem der beiden Bezugssysteme stabile Bedingungen aufrechterhalten wurden.

Viertens ist festzuhalten, dass die Tatsache, ob sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe bewegten oder nicht, – anders als in Bezug auf den Prozentsatz korrekter Antworten – einen erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hatte: Bewegten sich die Diskriminationsreize mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Target der GAF, war der Gain über den gesamten Zeitraum der Messung stabil nahe einem Wert von 1.0. Wenn hingegen die Diskriminationsreize stationär in der Mitte des Bildschirm dargeboten wurden, sie sich also durch die auszuführende GAF auf der Retina der Probanden bewegten, zeigte sich ein deutlicher Leistungsabfall in den Werten des Gains über die Zeit. Zusammenfassend lässt festhalten, dass endogene ASs und retinal stabile

Diskriminationsreize scheinbar keinen nachteiligen Einfluss auf den Pursuit-Gain haben; endogene ASs und retinal bewegte Diskriminationsstimuli hingegen führen zu einer Verschlechterung des Gains über die Zeit.

Damit spiegeln die Ergebnisse aus Experiment 9a unter Verwendung eines endogenen Cues insgesamt die Resultate aus Experiment 8a wider, in dem ein exogener Cue präsentiert wurde.

Diese Beobachtungen führten wie schon in Experiment 8a zu der Frage, ob die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen im Vergleich zu der Pursuit-Bedingung mit sich bewegendenden Reizen ausschließlich auf den von den Probanden ausgeführten AS zurückzuführen ist oder aber ob nur die Tatsache, dass sich die Diskriminationsreize in einem retinalen Bezugssystem bewegten, ursächlich für diesen Befund ist. Um diesem Punkt nachzugehen, wurde das Experiment 9b durchgeführt.

4.6 Experiment 9b: Smooth Pursuit während der Darbietung eines endogenen Cues

In Experiment 9b sollte der Frage nachgegangen werden, ob die Verschlechterung des Smooth Pursuit-Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen in Experiment 9a tatsächlich auf einen AS zurückzuführen ist oder ob sie nur auf Faktoren des experimentellen Displays betreffend zurückgeht.

Zu diesem Zweck wurde das Experiment 9a unter Verwendung der exakt gleichen Stimuli wiederholt, der einzige Unterschied bestand darin, dass die Versuchspersonen instruiert wurden, dem Target der GAF so gut wie möglich mit den Augen zu folgen, während die Diskriminationsstimuli zu ignorieren waren.

4.6.1 Methode

Probanden

An Experiment 8b nahmen die gleichen Versuchspersonen wie an Experiment 8a teil.

Material, Durchführung und Design

Material, Durchführung und Design waren exakt wie in Experiment 8b mit folgenden Modifikationen: Da es sich bei Experiment 9b um ein Kontrollexperiment zu Experiment 9a handelte, wurde selbstverständlich der endogene Cue präsentiert und nicht der exogene.

4.6.2 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 8a analysiert. Der Smooth Pursuit-Gain für Experiment 9b ist in Abbildung 4.10 graphisch dargestellt.

Die zweifaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain ergab lediglich einen signifikanten Haupteffekt in Bezug auf den Faktor Zeit, $F(13,65) = 2.76$, $MSE = 3.84E-03$, $p < 0.005$. Allem Anschein nach ist dieser Effekt aber eher zufälliger Natur, denn sobald man die korrigierten p-Werte in die Betrachtung mit einbezieht (z.B. Greenhouse-Geisser-Korrektur: $p = 0.06$), ist der Faktor Zeit nicht länger signifikant. Alle übrigen Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant ($ps > 0.5$). Gleichwohl wurden auch in diesem Experiment nochmals zwei einfaktorielle ANOVAs für jede Bewegungsbedingung der Diskriminationstimuli einzeln über den Faktor Zeit gerechnet: Während der Haupteffekt der Zeit in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegendenden Reizen (zumindest unkorrigiert) signifikant wurde, $F(13,56) = 2.55$, $MSE = 0.28E-03$, $p < 0.008$, zeigte sich kein statistisch bedeutsamer Effekt in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli, $F(13,56) = 1.26$, $MSE = 0.54E-03$, $p = 0.259$. Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant.

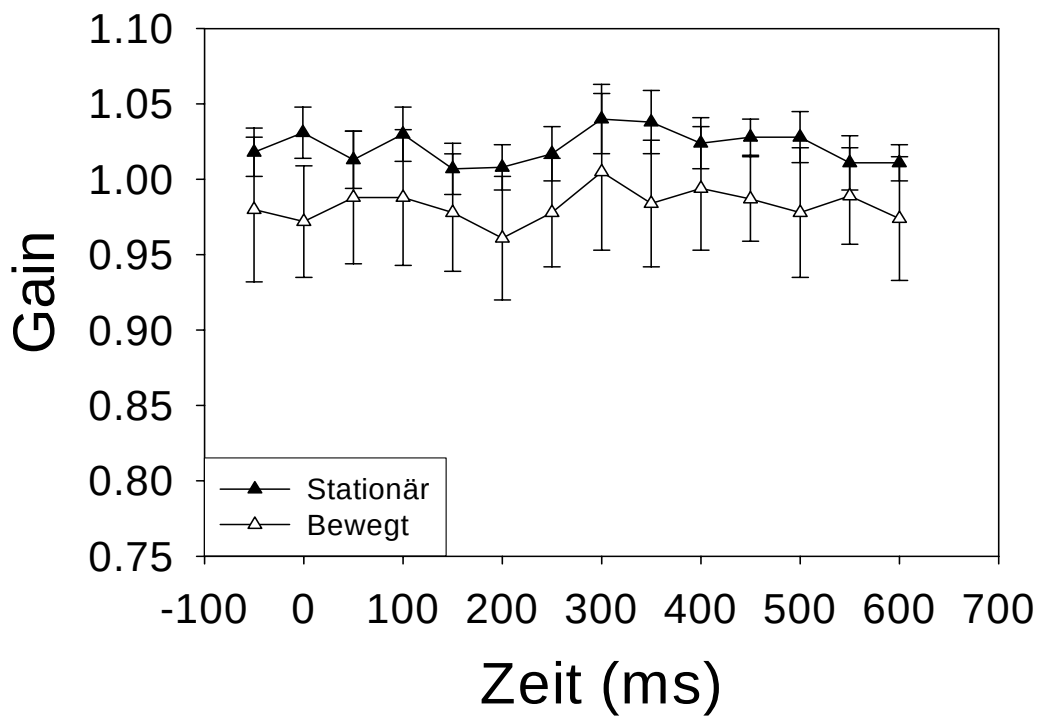


Abbildung 4.10 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 9b. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Dreiecke) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Dreiecke). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationonset des endogenen Cues.

4.6.3 Diskussion

Die Ergebnisse des Experiments 9b zeigen, dass die in Experiment 9a beobachtete Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen über den zeitlichen Verlauf eines Trials hinweg verschwindet, wenn die Versuchspersonen instruiert werden, ausdrücklich keinen AS zum vom endogenen Cue angezeigten Ort auszuführen. Dieses Resultat macht deutlich, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen in Experiment 9a auf das Ausführen eines ASs zurückgeht und nicht etwa ausschließlich damit in Zusammenhang steht, dass, anders als in der Pursuit-

Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die Stimuli der Diskriminationsaufgabe stationär in der Mitte des Monitors dargeboten wurden. Das Nicht-Ausführen eines AS hatte auf den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reize keinen Einfluss: er war über den Trial hinweg immer nahe einem Wert von 1.0.

4.7 Vergleich des Gains den Experimenten 9a und 9b

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezüglich des Smooth Pursuit-Gains aus dem Experimenten 9a und 9b nochmals zusammenfassend dargestellt. Aus diesem Grund ist der Gain der beiden Experimente in Abbildung 4.11 gemeinsam graphisch dargestellt.

Aus Experiment 9a geht hervor, dass die retinale Bewegung der Diskriminationsstimuli einen erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hat. In der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen war der Pursuit-Gain über den gesamten gemessenen Zeitraum hinweg nahe dem Wert 1.0. In der Pursuit-Bedingung mit stationär dargebotenen Reizen verschlechterte sich der Gain mit dem Fortschreiten der Zeit von 0.98 zu Beginn der Messung auf 0.85 am Ende der Messung. Die Ergebnisse der Experiments 9b zeigen deutlich, dass der Abfall des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen aus Experiment 9a verschwindet, wenn die Probanden ausdrücklich instruiert werden, keinen AS auszuführen. Die Resultate der beiden Experimente zusammen legen den Schluss nahe, dass die Verschlechterung der Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen (Experiment 9a) tatsächlich auf die Ausführung eines AS zurückzuführen ist.

Ob das Ausführen eines AS während GAFs einen Einfluss auf den Pursuit-Gain hat, hängt im Sinne einer Interaktion davon ab, ob sich die Diskriminations-Targets bewegen oder stationär präsentiert werden. Endogene ASs und retinal stabile Diskriminationsreize haben keine nachteiligen Auswirkungen auf den Gain; endogene ASs haben nur dann einen negativen Effekt auf den Gain, wenn die Diskriminationstimuli stationär dargeboten werden.

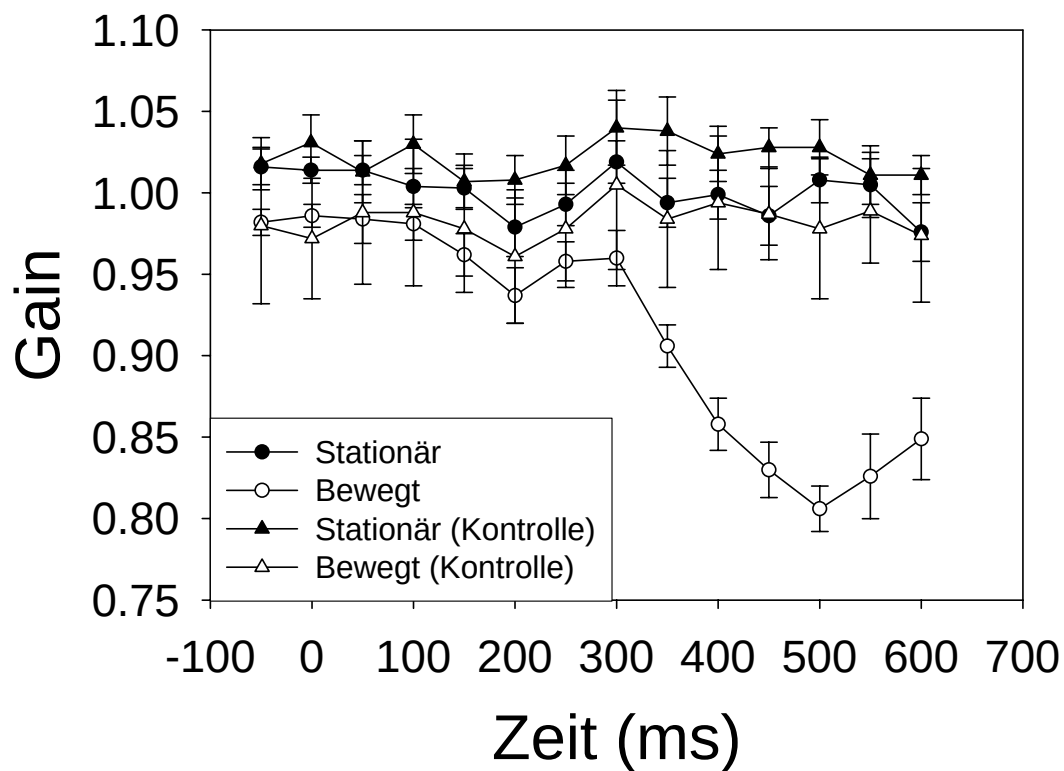


Abbildung 4.11 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 9a und Experiment 9b. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise = Experiment 9a; schwarze Dreiecke = Experiment 9b [Kontrolle]) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise = Experiment 9a; weiße Dreiecke = Experiment 9b [Kontrolle]). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationsonset des endogenen Cues.

Um wieder zu klären, zu welchem Zeitpunkt die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen statistisch nachzuweisen ist, wurde erneut eine Reihe gepaarter t-Tests gerechnet. Die Werte für den Gain der Pursuit-Bedingungen mit sich bewegenden Reize aus Experiment 9a und Experiment 9b für jedes der vierzehn 50 ms-Intervalle miteinander verglichen; für den Gain der Pursuit-Bedingungen mit stationären Reizen wurde ebenso verfahren. Die p-Werte für den Vergleich der beiden Pursuit-Bedingungen mit sich bewegenden Reizen zeigten erwartungsgemäß keine signifikanten Unterschiede (p-Werte für den Vergleich der vierzehn Intervalle: 0.939, 0.490, 0.986, 0.332,

0.861, 0.325, 0.411, 0.543, 0.222, 0.434, 0.150, 0.535, 0.876, 0.229), die Werte für den Vergleich der beiden stationären Pursuit-Bedingungen verdeutlichten, dass das Absinken des Gains in Experiment 9a zu einem Zeitpunkt etwa 350 ms nach Onset des Diskriminations-Target statistisch bedeutsam wird (p-Werte für den Vergleich der vierzehn Intervalle: 0.965, 0.716, 0.940, 0.880, 0.720, 0.597, 0.546, 0.287, 0.085, 0.015, 0.003, 0.010, 0.003, 0.025).

4.8 Vergleich des Gains der Experimente 8a, 8b, 9a und 9b

An dieser Stelle soll abschließend nun noch auf einen letzten Punkt aufmerksam gemacht werden. Wie in der Einleitung zu Experiment 9a bereits angeklungen, sollten mittels eines Vergleichs der beiden Experimenten 8a und 9a auch, eventuell vorhandene Unterschiede der zeitlichen Charakteristika von exo- und endogenem Cueing überprüft werden. In diesem Zusammenhang erscheint ein Ergebnis besonders berichtenswert, nämlich wann die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen in Abhängigkeit vom verwendeten Cue eintritt. Wurde ein exogener Cue dargeboten, zeigte sich ein statistisch bedeutsamer Abfall des Gains etwa 150 ms nach dem Onset des Diskriminations-Targets. Unter Verwendung eines endogenen Cues trat dieser Abfall erst ca. 350 ms nach dem Onset des Diskriminations-Targets und damit wesentlich später auf.

Dass sich der Abfall des Gains in beiden Cueing-Bedingung erst nach dem Onset des Diskriminations-Targets zeigt und nicht sofort nach der Präsentation des Cues, ist insofern nicht erstaunlich, da der Cue in beiden Bedingungen von den Probanden zunächst verarbeitet werden muss. Zum einen ist die kognitive Verarbeitung selbst ein Prozess, der Zeit benötigt, zum anderen spielen in diesem Zusammenhang sicher auch neuronal bedingte Verzögerungen eine Rolle. Interessant ist allerdings, dass die frühere Verschlechterung des Gains in dem Experiment mit exogenem Cue und die spätere im Experiment mit endogenem Cue in ihren zeitlichen Aspekten genau das widerspiegelt, was aus Studien von z.B. Müller und Findlay (1988) und Müller und Rabbitt (1989) zum exogenen und endogenen Cueing bekannt ist:

Endogenes Cueing „braucht länger“ als exogenes Cueing und somit zeigen sich Effekte eines endogene Cues später als Effekte eines exogenen Cues.

In diesem Kontext sei auch auf fMRT-Studien (funktionelle Magnetresonanztomographie) neueren Datums hingewiesen, die nahe legen, dass exo- und endogene ASs jeweils unterschiedliche Hirnregionen aktivieren (z.B. Corbetta und Shulman, 2002). Es erschiene plausibel, wenn sich die Aktivierung unterschiedlicher Hirnareale bei exo- und endogenem Cueing auch in unterschiedlichen zeitlichen Verläufen des jeweiligen Cueings bemerkbar machen würde.

4.9 Experiment 10: Exogene Aufmerksamkeitsshifts (Detektion)

In den bisher dargestellten Experimenten wurden exogene und endogene ASs während GAFs mittels einer perzeptuellen Diskriminationsaufgabe untersucht. In Experiment 10 sollte getestet werden, ob die Ausführung exogener ASs während GAFs auch unter Verwendung einer einfachen Detektionsaufgabe möglich ist. Dabei muss beachtet werden, dass die Rolle visueller Aufmerksamkeit bei der Entdeckung von Reizen durchaus kontrovers diskutiert wurde: Einige Forscher gehen davon aus, dass die Entdeckung von Targets auf einem „prä-attentiven“ Level stattfindet. Dies bedeutet, dass die Verteilung von Verarbeitungsressourcen die Entdeckung eines Targets in keinsten Weise beeinflusst (Shaw, 1984; Sperling und Doshier, 1986; Norman und Bobrow, 1975; Kinchla, 1992; Palmer, 1994). Diese Forscher haben formale Modelle entwickelt, die zeigen, wie Effekte von Ortswahrscheinlichkeiten zu dem Zeitpunkt, zu dem ein abrupt erscheinendes Target entdeckt wird, eher Anpassungen des Entscheidungskriteriums der Probanden zugeschrieben werden können als Veränderungen in der Verteilung von Verarbeitungsressourcen. Dieser Punkt erklärt auch, warum frühere Arbeiten zu Sakkaden und Aufmerksamkeit, in denen Detektionsaufgaben Verwendung fanden, nicht immer einen Zusammenhang von Sakkaden und Aufmerksamkeit finden konnten.

Gleichwohl sollte in Experiment 10 getestet werden, ob ASs als Antwort auf ein exogenes Cueing während GAFs möglich sind. Dazu wurden ähnlich wie in Experiment 8a in einem Dual-Task-Paradigma eine Augenbewegungsaufgabe und eine einfache Detektionsaufgabe miteinander kombiniert.

In der Detektionsaufgabe (Abbildung 4.12) zeigte ein exogener Cue mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% den Ort richtig an, an dem das Detektions-Target erscheinen würde. In 20% der Durchgänge zeigte der exogene Cue den späteren Präsentationsort des Detektions-Targets falsch an. Auf die validen und invaliden Experimentaltrials wurden in diesem Experiment allerdings noch 20% Catch-Trials aufgeschlagen, in denen zwar ein Cue, aber anschließend kein Target dargeboten wurde. Aus diesem Grund betrug das gerundete Verhältnis von validen, invaliden und Catch-Trials 70% zu 15% zu 15%. Die Aufgabe der Probanden war es, nach Erscheinen des Targets so schnell wie möglich eine zuvor bestimmte Taste zu drücken. Der Unterschied in der Detektionsleistung – operationalisiert über Unterschiede in den manuellen Reaktionszeiten der Versuchspersonen – zwischen validen und invaliden Trials wurde als Maß für die visuelle Aufmerksamkeit genommen.

Diese Detektionsaufgabe wurde, wie schon in den zuvor dargestellten Experimenten 8a und 9a, mit einer Augenbewegungsaufgabe kombiniert. Insgesamt wurden die vier verschiedenen Blickbewegungsbedingungen getestet (zwei Fixationsbedingungen und zwei Smooth Pursuit-Bedingungen), die auch schon in Experiment 8a untersucht worden sind (für eine Darstellung der Blickbewegungsaufgabe, in der die veränderten Stimuli der Detektionsaufgabe berücksichtigt wurden, siehe Abbildung 4.13).

Wenn die Probanden in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit auf einen peripheren Cue zu verlagern, dann würde man eine bessere Detektionsleistung, im Sinne von schnelleren Reaktionszeiten, in den validen im Vergleich zu den invaliden Durchgängen erwarten. Die Fixationsbedingung mit stationären Reizen diente als Baseline-Bedingung, anhand der überprüft werden sollte, ob die Präsentation des Cues überhaupt einen Effekt auf die Detektionsleistung hat. Ein Vergleich der Fixationsbedingungen mit den Smooth Pursuit-Bedingungen sollte wieder klären, ob exogene ASs während GAFs möglich sind und wenn ja, wie sich die Leistung in den verschiedenen Bedingungen im Einzelnen darstellt. Ein

Vergleich der vier Blickbewegungsbedingungen sollte erneut Klarheit darüber verschaffen, ob Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden einen Einfluss auf die Detektionsleistung haben. Ebenfalls sollte wieder überprüft werden, ob der AS über mögliche Effekte auf die Detektionsleistung hinaus eventuell auch einen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain in den beiden Pursuit-Bedingungen hat.

Die Vorhersagen, die in Experiment 10 überprüft wurden, waren demnach identisch mit denen aus den Experimenten 8a und 9a und wurden nur mittels eines anderen Aufgabentyps getestet (Detektionsaufgabe statt Diskriminationsaufgabe).

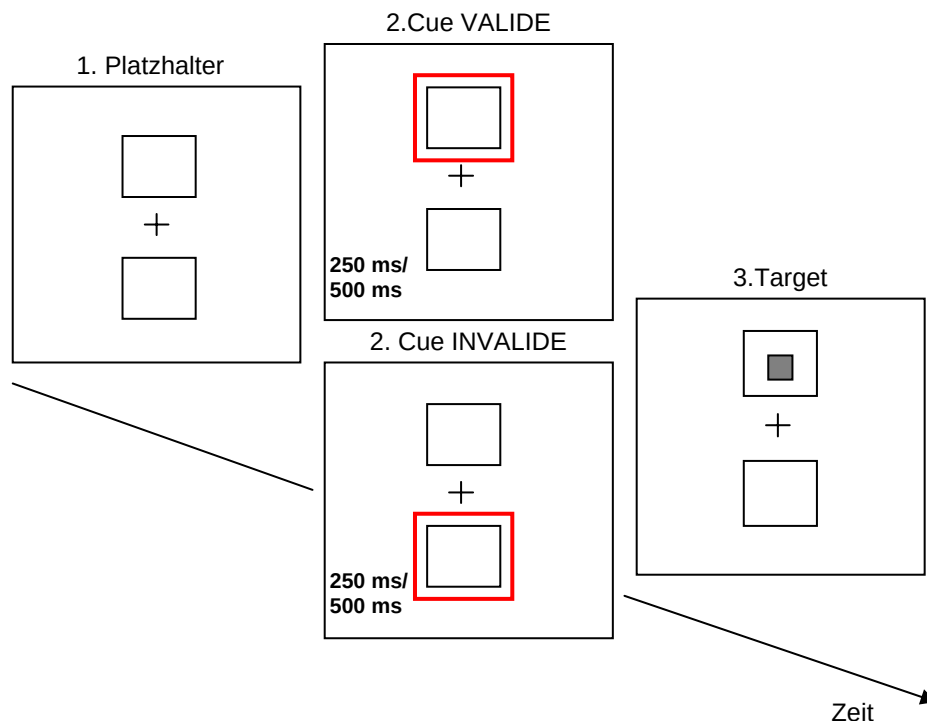


Abbildung 4.12 Schematische Darstellung der Detektionsaufgabe aus Experiment 10 in einem Experimentaldurchgang mit exogenem Cue. Zu Beginn des Trials erscheint ein zentrales Fixationskreuz. Ober- und unterhalb dieses Fixationskreuzes wird je ein Quadrat dargeboten. Anschließend wird ein exogener Cue präsentiert, der in dem Dunkelwerden eines der beiden Quadrate besteht (hier ist der Cue als rotes Quadrat, das den Platzhalter umgibt, angedeutet). Der Cue ist in 70% der Experimentaltrials valide, in 15% invalide. Nach einem SOA von 250 ms oder 500 ms wird das Target (kleines graues Quadrat) dargeboten. In den Catch-Trials (nicht dargestellt) wurde kein Target präsentiert. Die Aufgabe der Probanden war es, nach Erscheinen des Targets so schnell wie möglich eine bestimmte Taste zu drücken.

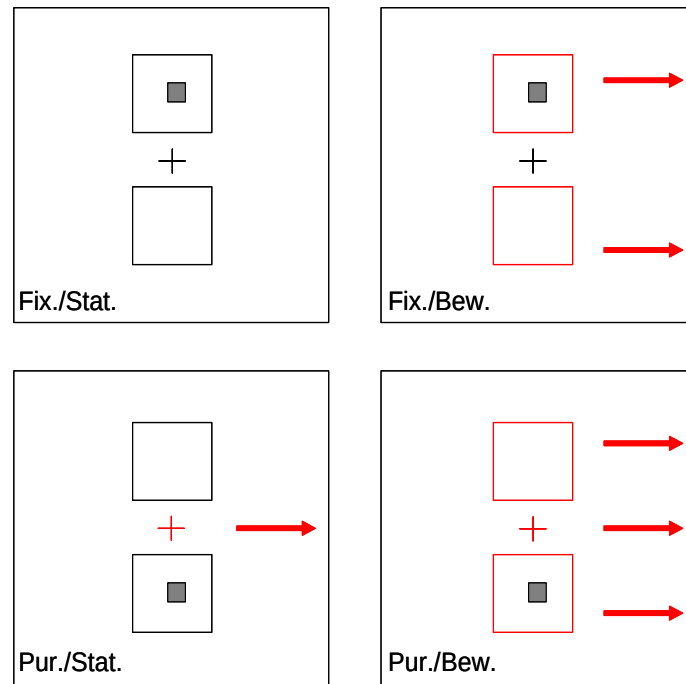


Abbildung 4.13 Schematische Darstellung der Blickbewegungsaufgabe aus den Experimenten 10 und 11. In den Fixationsbedingungen sollten die Probanden das Fixationskreuz fixieren, in den Pursuit-Bedingungen sollten sie es mit den Augen verfolgen. Weitere Erläuterungen finden sich im Text. Fix./Stat. (oben links) = Fixationsbedingung mit stationären Reizen; Pur./Bew. (unten rechts) = Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen; Fix./Bew. (oben rechts) = Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen; Pur./Stat. (unten links) = Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen. Rote Bildelemente repräsentieren sich bewegende Reize, schwarze Bildelemente repräsentieren stationär dargebotene Reize (das Detektions-Target ist hingegen immer grau dargestellt, egal ob es sich bewegt oder nicht).

4.9.1 Methode

Probanden

Die allgemeinen Charakteristika der Probanden aus Experiment 10 waren die gleichen wie die der Versuchsteilnehmer aus Experiment 8a.

Material und Durchführung

Die Stimuli wurden auf demselben Monitor dargeboten und die Augenbewegungen wurden mit Hilfe desselben Blickbewegungsmessgeräts aufgezeichnet wie in Experiment 8a.

Alle Stimuli wurden auf einem gleichförmigen grauen Hintergrund mit einer Helligkeit von 32 cd/m^2 dargeboten. Zu Beginn eines jeden Trials erschien ein $0.4 \times 0.4^\circ$ großes schwarzes Fixationskreuz. Wenn die Versuchsperson bereit war, einen Durchgang zu beginnen, drückte sie eine zuvor bestimmte Taste. Nach einer erfolgreichen Drift-Korrektur durch das Blickbewegungsmessgerät wurde das Fixationskreuz rot. Die Gesamtdauer eines Trials betrug wieder 2 s.

In der Fixationsbedingung mit stationären Reizen wurde das Fixationskreuz stets in der Bildschirmmitte präsentiert. Die Probanden wurden instruiert, die Fixation auf dem Fixationskreuz aufrechtzuerhalten. Sobald das Fixationskreuz rot wurde, wurde jeweils ober- und unterhalb des Kreuzes ein $1.5 \times 1.5^\circ$ großes Quadrat eingeblendet. Die Entfernung vom Fixationskreuz zum jeweiligen Mittelpunkt der beiden Quadrate betrug 4° . Die Helligkeit der Quadrate betrug 25 cd/m^2 . Nach einer gewissen Zeit (siehe unten) veränderte sich dann die Helligkeit eines der beiden Quadrate. Die Helligkeit wurde für 50 ms auf 0 cd/m^2 gesetzt; nach Ablauf der 50 ms nahm das Quadrat wieder seine Ausgangshelligkeit an. Das Dunkelwerden eines der beiden Quadrate war der exogene Cue, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 70% den späteren Präsentationsort des Detektions-Targets anzeigte. 250 ms oder 500 ms nach dem Onset des Cues wurde in der Mitte eines Quadrats ein Detektions-Target dargeboten (es wurden demnach zwei verschiedene SOAs verwendet: ein SOA von 250 ms und ein SOA von 500 ms). Das zeitliche Intervall zwischen Start des Trials und Präsentation des Cues (siehe oben) wurde derart variiert, dass die zeitliche Mitte zwischen Cue und Target zwischen $\pm 300 \text{ ms}$ um den Mittelpunkt der Trajektorie von 2 s Gesamtdauer lag. Als Detektions-Target diente ein $0.5 \times 0.5^\circ$ großes graues (25 cd/m^2) Quadrat. Dieses Detektions-Target wurde nur in den validen und invaliden Durchgängen präsentiert, in den Catch-Trials wurde nach der Darbietung des Cues kein Target gezeigt. Nach seinem Erscheinen wurde das Detektions-Target bis zum Ende des Trials dargeboten.

Die Versuchspersonen wurden instruiert, auf das Erscheinen des Cues hin ihre Aufmerksamkeit auf den jeweiligen Präsentationsort des Cues auszurichten, ohne dabei jedoch die Augen zu bewegen. Auf das Erscheinen des Detektions-Targets hin sollten die Probanden so schnell wie möglich eine zuvor bestimmte Taste drücken; auf keinen Fall sollten sie mit einem Tastendruck reagieren, wenn kein Target dargeboten wurde (Catch-Trial).

In der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen wurde das Fixationskreuz, das zu Beginn eines jeden Trials präsentiert wurde, nicht in der Mitte, sondern zufällig in einer exzentrischen Position 11° links oder rechts vom Bildschirmmittelpunkt dargeboten. In dieser exzentrischen Position sollte das Kreuz von den Probanden zunächst fixiert werden. Nachdem die Versuchsteilnehmer den Durchgang gestartet hatten, wurde das Fixationskreuz rot, und in dieser exzentrischen Position wurden nun ober- und unterhalb des Kreuzes die oben beschriebenen Quadrate eingeblendet. Anschließend begannen sich das Fixationskreuz und die Quadrate zusammen mit einer konstanten Geschwindigkeit von 11 %s auf die Mitte des Bildschirms hin zu bewegen. Die Probanden wurden instruiert, dem sich bewegenden Fixationskreuz mit den Augen zu folgen. Während sich die Reize über den Monitor bewegten, wurden der Cue und das Target unter Verwendung der gleichen zeitlichen Parameter wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen präsentiert. Nach dem Erscheinen des Detektions-Targets bewegten sie sich bis zum Ende des Trials weiter, jetzt in Richtung des anderen Bildschirmrands. Alle anderen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

In der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen verblieb das Fixationskreuz während der Dauer des gesamten Trials – wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen – in der Mitte des Bildschirms. Die Probanden sollten die Fixation auf dem Kreuz aufrechterhalten. Die Stimuli der Detektionsaufgabe erschienen allerdings nicht in der Mitte des Monitors, sondern zufällig in einer exzentrischen Position 11° links oder rechts vom Bildschirmmittelpunkt. Während das Fixationskreuz in der Mitte des Monitors stationär dargeboten wurde, fingen die Stimuli der Detektionsaufgabe an, sich auf genau der gleichen Trajektorie über den Bildschirm zu bewegen wie die Stimuli der Pursuit-Bedingung mit sich

bewegenden Reizen. Alle anderen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

In der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, erschien das Fixationkreuz zufällig in einer exzentrischen Position 11° links oder rechts des Bildschirmmittelpunkts und begann, sich mit konstanter Geschwindigkeit auf die Mitte des Monitors hin zu bewegen. Die Trajektorie des Pursuit-Targets in dieser Bedingung entsprach exakt der Trajektorie in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen. Die Probanden sollten dem Pursuit-Target mit den Augen folgen. Die Stimuli der Detektionsaufgabe erschienen in der Mitte des Bildschirms an den Positionen, an denen sie auch in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen dargeboten worden waren und verblieben dort während der gesamten Dauer des Trials. Alle anderen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

Design

Die Daten der Fixationsbedingung mit stationären Reizen und die der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen einerseits und die Daten der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen und die der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen andererseits wurden an zwei unterschiedlichen Tagen erhoben. Die Reihenfolge dieser beiden Experimentalsitzungen wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. Innerhalb einer Experimentalsitzung wurden die verschiedenen Blickbewegungsbedingungen (je eine Fixationsbedingung und eine Pursuit-Bedingung) in Blöcken dargeboten. Die Fixationsbedingung und die Pursuit-Bedingung wurden in kleinen Blöcken von je 80 Trials von den Probanden durchlaufen. In jedem Block wurden valide und invalide Durchgänge und Catch-Trials zufällig durchmischt. Vor jedem Block wurden die Probanden informiert, welche Bedingung sie als nächste zu bearbeiten hätten. Jede der zwei Blickbewegungsbedingungen wurde einmal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät rekaliert wurde (d.h. nach 160 Durchgängen). In einer Experimentalsitzung wurden von den Probanden drei dieser Einzelblöcke à 160 Trials bearbeitet, was insgesamt 480 Durchgänge ergab. In den zwei Experimentalsitzungen zusammen wurden demnach 960 Trials erhoben.

4.9.2 Ergebnisse

Die manuellen Reaktionszeiten wurden inferenzstatistisch ausgewertet. Des Weiteren wurde der Smooth Pursuit-Gain berechnet und diese Werte ebenfalls einer inferenzstatistischen Analyse unterzogen.

Reaktionszeiten

In Bezug auf die Auswertung der Reaktionszeiten wurden alle diejenigen Durchgänge von der Analyse ausgeschlossen, in denen der Beobachter blinzelte oder in denen er die Fixation nicht aufrecht erhielt (Fixationsbedingungen) bzw. dem Fixationskreuz offensichtlich nicht mit den Augen folgte (Pursuit-Bedingungen) (also z.B. auch, wenn der Proband eine Sakkade zu den Reizen der Detektionsaufgabe ausführte). Außerdem mussten die Probanden innerhalb eines bestimmten zeitlichen Intervalls antworten: Die manuelle Reaktion durfte nicht früher als 150 ms und nicht später als 500 ms nach dem Onset des Detektions-Targets erfolgen. Insgesamt wurden in den Experimenten 10 und 11 weniger als 10% der erhobenen Durchgänge von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Reaktionszeiten für das Experiment 10 sind in Abbildung 4.14 graphisch dargestellt.

Die vierfaktorielle (stationäre vs. bewegte Detektionsreize X valide vs. invalide Trials X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung X langes vs. kurzes SOA), messwiederholte ANOVA über die manuellen Reaktionszeiten zeigte, dass die Probanden in den validen Trials (310 ms) statistisch signifikant schneller reagierten als in den invaliden Trials (287 ms), $F(1,7) = 21.80$, $MSE = 800.30$, $p < 0.003$. Der Haupteffekt des SOA verdeutlichte, dass die Probanden in den Durchgängen mit langem SOA (292 ms) schneller waren als in den Durchgängen mit kurzem SOA (304 ms), $F(1,7) = 16.00$, $MSE = 264.32$, $p < 0.006$. Der signifikante Haupteffekt der Blickbewegungsbedingung schließlich zeigte, dass die Versuchspersonen in den Fixationsbedingungen schneller reagierten (293 ms) als in den Pursuit-Bedingungen (303 ms), $F(1,7) = 8.03$, $MSE = 434.88$, $p < 0.026$. Alle anderen Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant ($ps > 0.052$). Gepaarte t-Tests für jede der vier Blickbewegungsbedingungen

(und die zwei SOAs) bestätigten den statistisch signifikant Unterschied zwischen validen und invaliden Trials ($p_s < 0.05$).

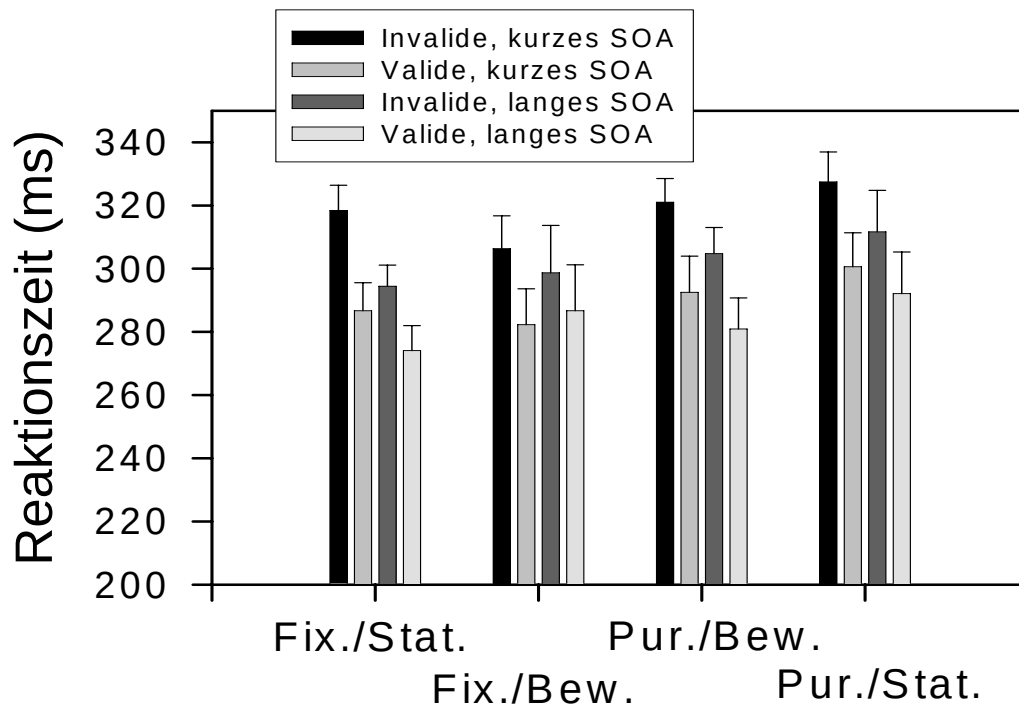


Abbildung 4.14 Die manuellen Reaktionszeiten aus Experiment 10. Dargestellt sind die mittleren manuellen Reaktionszeiten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für valide und invalide Durchgänge sowohl für das kurze als auch das lange SOA als Funktion der vier Blickbewegungsbedingungen (Fixationsbedingung mit stationären Detektionsreizen = Fix./Stat., Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen = Fix./Bew., Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen = Pur./Bew., Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen = Pur./Stat.). Fix. = Fixation; Pur. = Pursuit; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Augenbewegungen

In Bezug auf die Analyse der Augenbewegungen führten dieselben Kriterien wie bei der Analyse der Reaktionszeiten zum Ausschluss eines Durchgangs von der weiteren Analyse. Zusätzlich wurden die Catch-Trials ausgeschlossen, in denen ein Proband fälschlicherweise mit einem Tastendruck reagiert hatte. Die Anzahl zurückgewiesener Trials betrug in den beiden Experimenten 10 und 11 weniger als 4%. Es wurde die mittlere Pursuit-

Geschwindigkeit berechnet, nachdem alle Sakkaden aus der Blickspur entfernt worden waren. Für die Detektion der Sakkaden wurde der Output des EyeLink II-Augenbewegungs-Parsers verwendet.

Der Gain wurde auch in diesem Experiment wieder über die vierzehn Intervalle von je 50 ms Länge berechnet, die schon in Experiment 8a beschrieben worden sind. Anders als in den bisher dargestellten Experimenten, wurde in Experiment 10 der Gain in den Experimentaldurchgängen (valide und invalide Trials) mit dem aus den Catch-Trials verglichen. Der Gain in den Catch-Trials diente als Baseline für die Evaluierung des Gains in den Experimentaldurchgängen.

Da die Auswertung der Reaktionszeiten ergab, dass die Länge des SOA mit keinem anderen Faktor interagierte, wurden in Bezug auf den Gain die Daten für die beiden SOAs gemeinsam analysiert. Der Pursuit-Gain für das Experiment 10 ist in Abbildung 4.15 graphisch dargestellt.

Die dreifaktorielle (Experimental- vs. Catch-Trials X stationäre vs. bewegte Detektionsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass die Probanden einen höheren Gain hatten, wenn sich die Stimuli der Detektionsaufgabe mit gleicher Geschwindigkeit wie das Pursuit-Target über den Bildschirm bewegten (0.99), im Vergleich zu der Pursuit-Bedingung in der die Detektionsreize stationär dargeboten wurden (0.94), $F(1,7) = 9.55$, $MSE = 31.15E-03$, $p < 0.02$. Der Haupteffekt des Faktors Zeit zeigte, dass der Gain über die vierzehn 50 ms-Intervalle hinweg abnahm, $F(13,91) = 14.14$, $MSE = 0.75E-03$, $p < 0.001$. Im ersten Intervall lag der Gain bei 0.99, im letzten Intervall betrug er nur noch 0.94. Ob es sich um einen Experimentaldurchgang oder einen Catch-Trial handelte, war für den Gain nicht von Bedeutung ($p > 0.9$). Die signifikante Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Detektionsreize X Zeit), $F(13,91) = 7.78$, $MSE = 0.61E-03$, $p < 0.001$, verdeutlicht, dass der Haupteffekt des Faktors Zeit im Wesentlichen auf eine Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Detektionsstimuli zurückzuführen ist (erstes Intervall: 0.98; letztes Intervall: 0.90), während die Werte für den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen über die Zeit

hinweg etwa auf demselben hohen Niveau blieben (erstes Intervall: 1.00; letztes Intervall: 0.99). Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant.

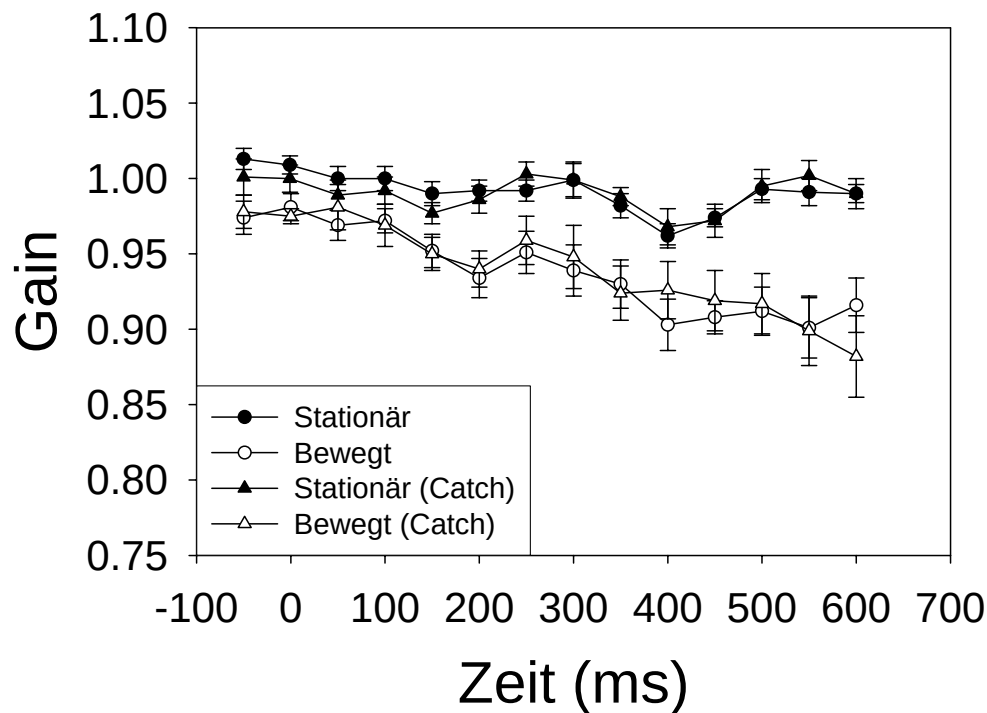


Abbildung 4.15 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 10. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise = Experimentaldurchgänge; schwarze Dreiecke = Catch-Trials) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise = Experimentaldurchgänge; weiße Dreiecke = Catch-Trials). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationsonset des exogenen Cues.

In einem letzten Untersuchungsschritt ging es darum festzustellen, zu welchem Zeitpunkt die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen statistisch nachzuweisen ist. Es wurden die Werte für den Experimental-Gain der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reize mit den Werten für den Experimental-Gain der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen für jedes der vierzehn 50 ms-Intervalle verglichen

(t-Tests). Die p-Werte für den Vergleich der beiden Pursuit-Bedingungen verdeutlichen, dass das Absinken des Gains in der Bedingung mit stationären Reizen zu einem Zeitpunkt etwa 200 ms nach Onset des *Cues* (und nicht des *Targets* wie in den vorangegangenen Experimenten; da über zwei SOAs gemittelt wurde, lässt sich eine Verschlechterung des Gains mit dem Onset des *Targets* als Referenzpunkt nicht angeben) statistisch bedeutsame Ausmaße annimmt (p-Werte für den Vergleich der vierzehn Intervalle: 0.380, 0.057, 0.068, 0.077, 0.061, 0.009, 0.042, 0.025, 0.041, 0.039, 0.003, 0.001, 0.002, 0.002).

4.9.3 Diskussion

Das Experiment 10 lieferte vier Hauptbefunde, die die Ergebnisse der vorherigen Experimente bestätigen:

Erstens zeigten die Ergebnisse deutlich, dass die Reaktionszeiten der Probanden in den validen Durchgängen insgesamt kürzer waren als in den invaliden.

Dieser Cueing-Effekt konnte für alle vier Blickbewegungsbedingungen nachgewiesen werden. Dabei war der gefundene Cueing-Effekt in diesem Experiment von der Blickbewegungsbedingung abhängig: Mit stationärem Auge reagierten die Probanden schneller als während der Ausführung einer GAF. Die Resultate weisen dennoch darauf hin, dass Versuchspersonen in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit vom Target einer GAF zu lösen und einem exogenen Cue zuzuwenden. Aufmerksamkeitsverlagerungen als Antwort auf die Präsentation eines exogenen Cues sind während GAFs möglich, und diese ASs lassen sich nicht nur – wie zuvor gezeigt – für perzeptuelle Diskriminationsaufgaben, sondern auch für Detektionsaufgaben finden.

Drittens ist festzuhalten, dass Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden wieder keinen Einfluss auf die Ausführung von ASs während GAFs zu haben scheinen. Die Reaktionszeiten der Probanden waren gleich schnell, unabhängig davon, ob Veränderungen im retinalen oder räumlichen Referenzsystem stattfanden oder nicht.

Viertens ist festzuhalten, dass die Tatsache, ob sich die Stimuli der Detektionsaufgabe bewegten oder nicht, einen erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hatte: Bewegten sich die Detektionsreize mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Target der GAF, war der Gain über den gesamten Zeitraum der Messung stabil einem Wert nahe 1.0. Wenn hingegen die Detektionsreize stationär in der Mitte des Bildschirms dargeboten wurden, zeigte sich ein deutlicher Leistungsabfall in den Werten des Gains über die Zeit. An diesem Punkt kann festgehalten werden, dass exogene ASs und retinal stabile Detektionsreize scheinbar keinen nachteiligen Einfluss auf den Pursuit-Gain haben, exogene ASs und retinal bewegte Detektionsstimuli hingegen zu einer Verschlechterung des Gains über die Zeit führen. Und obwohl dieser Punkt im aktuellen Experiment nicht gesondert getestet worden ist, kann man davon ausgehen, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen wieder auf den AS selbst zurückgeht und nicht alleine auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass die Detektionsreize stationär dargeboten wurden (siehe oben). Was dieses Experiment allerdings zeigt, ist, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen nicht von der manuellen Reaktion auf den Detektionsstimulus abgängig ist: Wäre dies der Fall gewesen, dann hätte sich ein Unterschied zwischen den Experimentaldurchgängen und den Catch-Trials finden lassen müssen.

4.10 Experiment 11: Endogene Aufmerksamkeitsshifts (Detektion)

In Anlehnung an den Vergleich der Experimente 8a und 9a und in Zusammenhang mit Experiment 10 sollten in Experiment 11 zwei Fragen geklärt werden: Erstens, ob auch endogene ASs während GAFs möglich sind (unter Verwendung einer einfachen Detektionsaufgabe). Zweitens, ob sich im Vergleich mit Experiment 10 eventuell vorhandene Unterschiede der zeitlichen Charakteristika von exo- und endogenem Cueing finden lassen.

Aus diesem Grund wurde in Experiment 11 das Experiment 10 wiederholt (eine Augenbewegungsaufgabe [Abbildung 4.13] und eine Detektionsaufgabe wurden miteinander kombiniert). In der Detektionsaufgabe (Abbildung 4.16) wurde in Experiment 11 jedoch ein

endogener Cue an Stelle eines exogenen Hinweisreizes verwendet. Abgesehen von dieser Manipulation waren die Experimente 10 und 11 vollkommen identisch, und auch die zu testenden Annahmen bzw. Vorhersagen waren in keinem Punkt verschieden. Deshalb wird darauf verzichtet, diese Aspekte nochmals darzustellen.

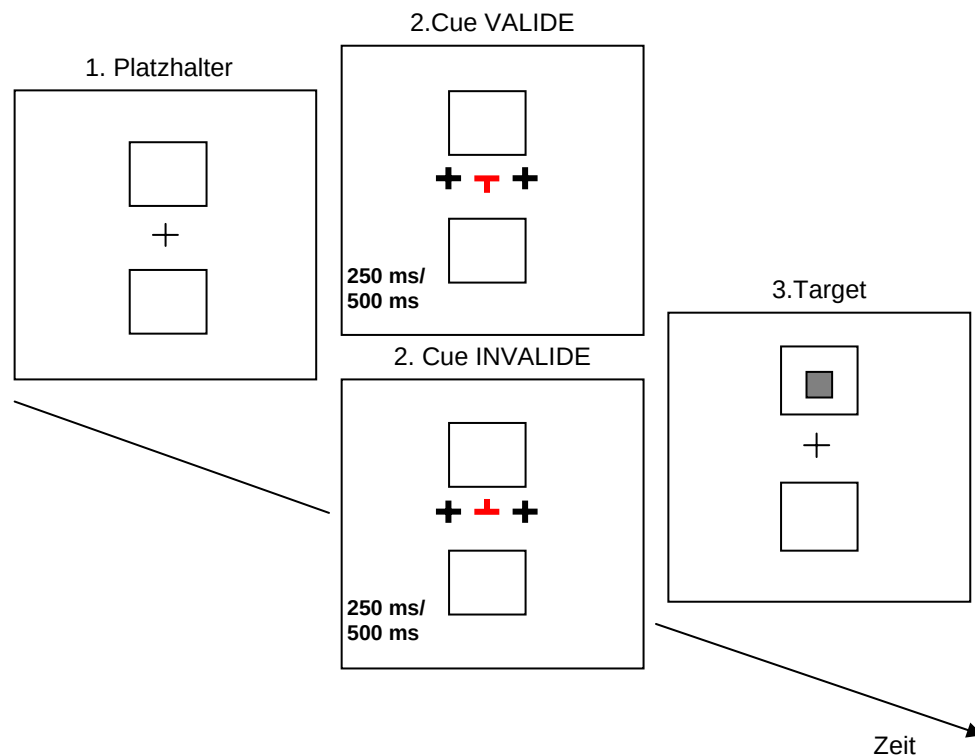


Abbildung 4.16 Schematische Darstellung der Detektionsaufgabe aus Experiment 11 in einem Experimentaldurchgang mit endogenem Cue. Zu Beginn des Trials erscheint ein zentrales Fixationskreuz. Ober- und unterhalb dieses Fixationskreuzes wird je ein Quadrat dargeboten. Anschließend wird ein endogener Cue präsentiert, der in dem Verschwinden des oberen oder unteren Arms des Fixationskreuzes besteht. Der Cue ist in 70 % der Trials valide, in 15 % invalide. Nach einem SOA von 250 ms oder 500 ms wird ein Target (kleines graues Quadrat) dargeboten. In den Catch-Trials (nicht dargestellt) wurde kein Target präsentiert. Die Aufgabe der Probanden war es, nach Erscheinen des Targets so schnell wie möglich eine bestimmte Taste zu drücken.

4.10.1 Methode

Probanden

Die allgemeinen Charakteristika der Probanden aus Experiment 11 waren die gleichen wie die der Versuchsteilnehmer aus Experiment 8a.

Material, Durchführung und Design

Material, Durchführung und Design waren exakt wie in Experiment 10 mit folgenden Modifikationen: Alle vier Blickbewegungsbedingungen wurden in Kombination mit der Detektionsaufgabe getestet. Während in Experiment 10 ein exogener Cue dargeboten wurde, wurde im aktuellen Experiment ein endogener Cue präsentiert: Anders als in Experiment 10 veränderte keines der Quadrate seine Helligkeit. Als endogener Cue fungierte in diesem Experiment das Verschwinden des oberen bzw. unteren „Arms“ des Fixationskreuzes (Abbildung 4.16). Verschwand der obere Arm des Fixationskreuzes für 50 ms (nach Ablauf der 50 ms erschien der Arm wieder und komplettierte somit das Fixationskreuz), sollten die Probanden ihre Aufmerksamkeit auf die Stimuli oberhalb des Fixationskreuzes ausrichten, verschwand der untere Arm, sollten die Versuchsteilnehmer ihre Aufmerksamkeit auf die Stimuli unterhalb des Fixationskreuzes lenken.

4.10.2 Ergebnisse

Die Rohdaten aus Experiment 11 wurden wie in Experiment 10 analysiert.

Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten für das Experiment 11 sind in Abbildung 4.17 graphisch dargestellt.

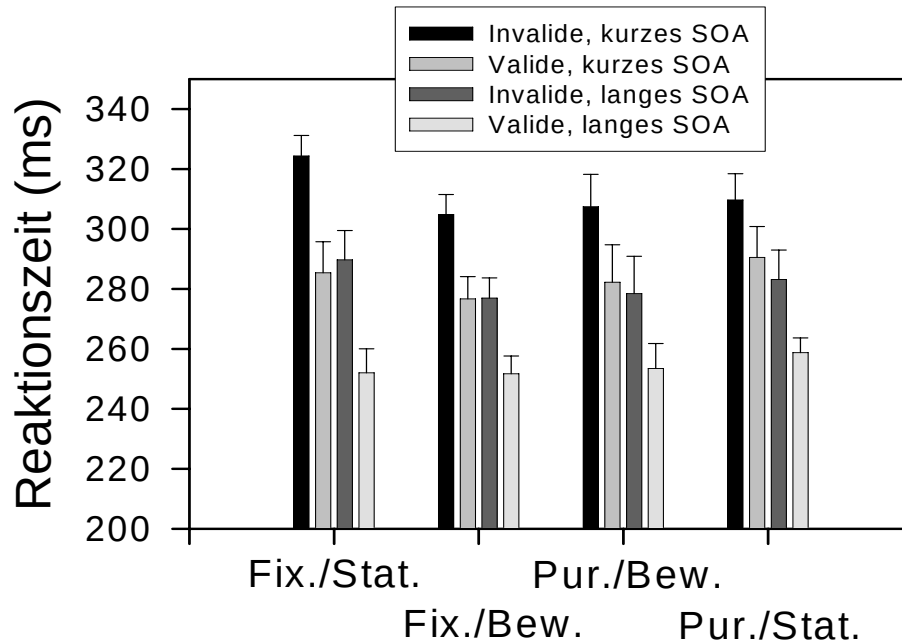


Abbildung 4.17 Die manuellen Reaktionszeiten aus Experiment 11. Dargestellt sind die mittleren manuellen Reaktionszeiten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für valide und invalide Durchgänge und zwar sowohl für das kurze als auch das lange SOA als Funktion der vier Blickbewegungsbedingungen (Fixationsbedingung mit stationären Detektionsreizen = Fix./Stat., Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen = Fix./Bew., Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen = Pur./Bew., Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen = Pur./Stat.). Fix. = Fixation; Pur. = Pursuit; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Die vierfaktorielle (stationäre vs. bewegte Detektionsreize X valide vs. invalide Trials X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung X langes vs. kurzes SOA), messwiederholte ANOVA über die manuellen Reaktionszeiten zeigte, dass die Probanden in den validen Trials (296 ms) statistisch signifikant schneller reagierten als in den invaliden Trials (281 ms), $F(1,5) = 41.95$, $MSE = 447,93$, $p < 0.002$. Der Haupteffekt des SOA verdeutlichte, dass die Probanden in den Durchgängen mit langem SOA (268 ms) schneller waren als in den Durchgängen mit kurzem SOA (297 ms), $F(1,5) = 212.80$, $MSE = 98.86$, $p < 0.001$. Die signifikante Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Detektionsreize X Blickbewegungsbedingung), $F(1,5) = 22.94$, $MSE = 62.22$, $p < 0.006$, zeigt, dass die Probanden bei stationären Detektions-Targets

in den Pursuit-Bedingungen schneller reagieren (280 ms) als in den Fixationsbedingungen (287 ms), und dass der Effekt bei sich bewegenden Stimuli genau entgegengesetzt ist (Fixation: 277 ms; Pursuit: 285 ms). Die signifikante Zweifach-Interaktion (valide vs. invalide Trials X Blickbewegungsbedingung), $F(1,5) = 6.91$, $MSE = 71.86$, $p = 0.047$, verdeutlicht schließlich, dass die Probanden in den invaliden Trials sowohl in den Fixationsbedingungen (298 ms) als auch in den Pursuit-Bedingungen (294 ms) etwa gleich schnell waren, in den validen Durchgängen während Fixation (260 ms) jedoch eindeutig schnellere Reaktionszeiten erzielt wurden (Pursuit: 271 ms). Alle anderen Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant ($ps > 0.052$). Gepaarte t-Tests für jede der vier Blickbewegungsbedingungen (und die zwei SOAs) bestätigten den statistisch signifikanten Unterschied zwischen validen und invaliden Trials ($ps < 0.05$).

Augenbewegungen

Der Pursuit-Gain für das Experiment 11 ist in Abbildung 4.18 dargestellt.

Die dreifaktorielle (Experimental- vs. Catch-Trials X stationäre vs. bewegte Detektionsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass der Gain über die vierzehn 50 ms-Intervalle hinweg abnahm, $F(13,65) = 13.48$, $MSE = 0.86E-03$, $p < 0.001$. Im ersten Intervall lag der Gain bei 1.00, im letzten Intervall betrug er nur noch 0.92. Ob es sich um einen Experimentaldurchgang oder einen Catch-Trial handelte, war für den Gain nicht von Bedeutung ($p > 0.7$). Ein Haupteffekt der Bewegungsbedingung der Detektionsreize war nicht signifikant ($p = 0.64$). Die signifikante Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Detektionsreize X Zeit), $F(13,65) = 4.35$, $MSE = 0.40E-03$, $p < 0.001$, verdeutlicht, dass der Haupteffekt des Faktors Zeit im Wesentlichen auf eine Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Detektionsstimuli zurückzuführen ist (erstes Intervall: 0.98; letztes Intervall: 0.90), während sich die Werte für den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen über die Zeit hinweg weniger deutlich verschlechtern (erstes Intervall: 1.00; letztes Intervall: 0.96). Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant.

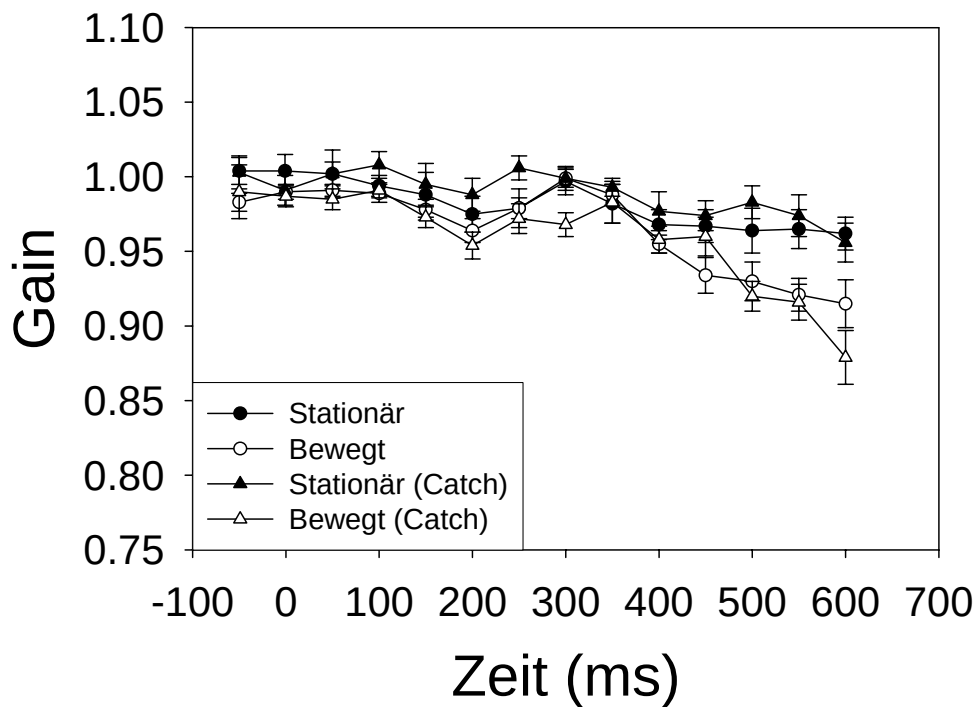


Abbildung 4.18 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 11. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise = Experimentaldurchgänge; schwarze Dreiecke = Catch-Trials) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise = Experimentaldurchgänge; weiße Dreiecke = Catch-Trials). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationonset des endogenen Cues.

Letztlich sollte wieder festgestellt werden, zu welchem Zeitpunkt die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen statistisch nachzuweisen ist. Es wurden die Werte für den Experimental-Gain der Pursuit-Bedingungen mit sich bewegenden Reize mit den Werten für den Experimental-Gain der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen für jedes der vierzehn 50 ms-Intervalle verglichen (t-Tests). Die p-Werte für den Vergleich der beiden Pursuit-Bedingungen verdeutlichen, dass das Absinken des Gains in der Bedingung mit stationären Reizen erst am Ende des Trials statistisch bedeutsame Ausmaße annimmt (p-Werte für den Vergleich der vierzehn Intervalle: 0.169, 0.381, 0.412, 0.619, 0.592, 0.495, 0.982, 0.855, 0.712, 0.469, 0.096, 0.132, 0.005, 0.051).

4.10.3 Diskussion

Das Experiment 11 lieferte erneut vier Hauptbefunde:

Erstens zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die Reaktionszeiten der Probanden in den validen Durchgängen insgesamt kürzer waren als in den invaliden.

Dieser Cueing-Effekt konnte für alle vier Blickbewegungsbedingungen nachgewiesen werden. Auch die Ergebnisse von Experiment 11 weisen daher darauf hin, dass endogene ASs während der Ausführung einer GAF möglich sind.

Drittens zeigt das Experiment, dass Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden alleine keinen Einfluss auf die Ausführung von ASs während GAFs zu haben scheinen (lediglich eine Interaktion mit der Blickbewegungsbedingung konnte nachgewiesen werden).

Viertens ist festzuhalten, dass die Tatsache, dass sich die Stimuli der Detektionsaufgabe bewegten oder nicht, einen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hatte, der sich in diesem Experiment allerdings nicht so deutlich zeigt, wie in den früheren, sondern sich hauptsächlich durch eine hoch signifikante Interaktion bemerkbar macht: Bewegten sich die Detektionsreize mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Target der GAF, war der Gain über den gesamten Zeitraum der Messung stabil nahe einem Wert von 1.0. Wenn hingegen die Detektionsreize stationär in der Mitte des Bildschirms dargeboten wurden, zeigte sich ein Leistungsabfall in den Werten des Gains über die Zeit.

Wie schon im Vergleich der Experimente 8a und 9a zeigt sich auch bei der gemeinsamen Betrachtung der Experimente 10 und 11, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen unter Verwendung eines exogenen Cues früher auftritt (etwa 200 ms nach dem Onset des Cues) als unter Verwendung eines endogenen Cues (erst gegen Ende des Trials). Obwohl die Resultate der Experimente 10 und 11 in diesem Punkt nicht so deutlich sind, wie die der Experimente 8a und 9a, lässt sich auch hier finden, dass exogenes Cueing einem anderen zeitlichen Ablauf folgt als endogenes Cueing.

4.11 Experiment 12: Exogene Aufmerksamkeitsshifts (manuelle „speeded discrimination“)

In den bisher geschilderten Experimenten wurden exogene und endogene ASs während GAFs für eine perzeptuelle Diskriminationsaufgabe (Experimente 8a und 9a) und für eine einfache motorische Detektionsaufgabe (Experimente 10 und 11) untersucht. Im vorletzten Experiment, das zu dieser Thematik durchgeführt wurde, wurden erneut exogene ASs während GAFs untersucht, diesmal jedoch für eine Diskriminationsaufgabe, die, anders als die bisherigen Diskriminationsaufgaben, unter Zeitdruck auszuführen war. Im Englischen wird ein solcher Aufgabentyp auch als „speeded discrimination“ bezeichnet.

Wieder wurden eine Diskriminationsaufgabe (Abbildung 4.19) und eine Blickbewegungsaufgabe (Abbildung 4.20) miteinander kombiniert. Wie dabei im Einzelnen vorgegangen wurde, wird noch erläutert werden, grundsätzlich handelt es sich jedoch bei dem in diesem Teil dargestellten Experiment um eine Variante des Experiments 10, dessen Stimuli lediglich um 90° gedreht wurden: Die 90°-Drehung der Reize hatte zur Folge, dass in den Pursuit-Bedingungen eine vertikale Augenbewegung durchzuführen war (statt einer horizontalen), dass die Detektionsstimuli jeweils links und rechts vom Target der Blickbewegung erschienen (statt ober- und unterhalb) und dass wiederum dieses Erscheinen der Targets links und rechts vom Blickbewegungsreiz ein Diskriminationsurteil ermöglichte dergestalt, dass so schnell wie möglich eine Taste mit der linken Hand gedrückt werden sollte, wenn das Diskriminations-Target links erscheint und eine mit der rechten Hand, wenn es rechts vom Target der Augenbewegung präsentiert wird.

Wie in den Experimenten 10 und 11 betrug auch in Experiment 12 das Verhältnis von validen, invaliden und Catch-Trials etwa 70% zu 15% zu 15%. Der Unterschied in der Diskriminationsleistung – operationalisiert über Unterschiede in den manuellen Reaktionszeiten der Versuchspersonen – zwischen validen und invaliden Trials wurde als Maß für die visuelle Aufmerksamkeit genommen.

Die Annahmen bzw. Vorhersagen, die in Experiment 12 überprüft wurden, waren wieder identisch mit denen aus den Experimenten 8a, sie wurden nur mittels eines anderen Aufgabentyps getestet (speeded discrimination).

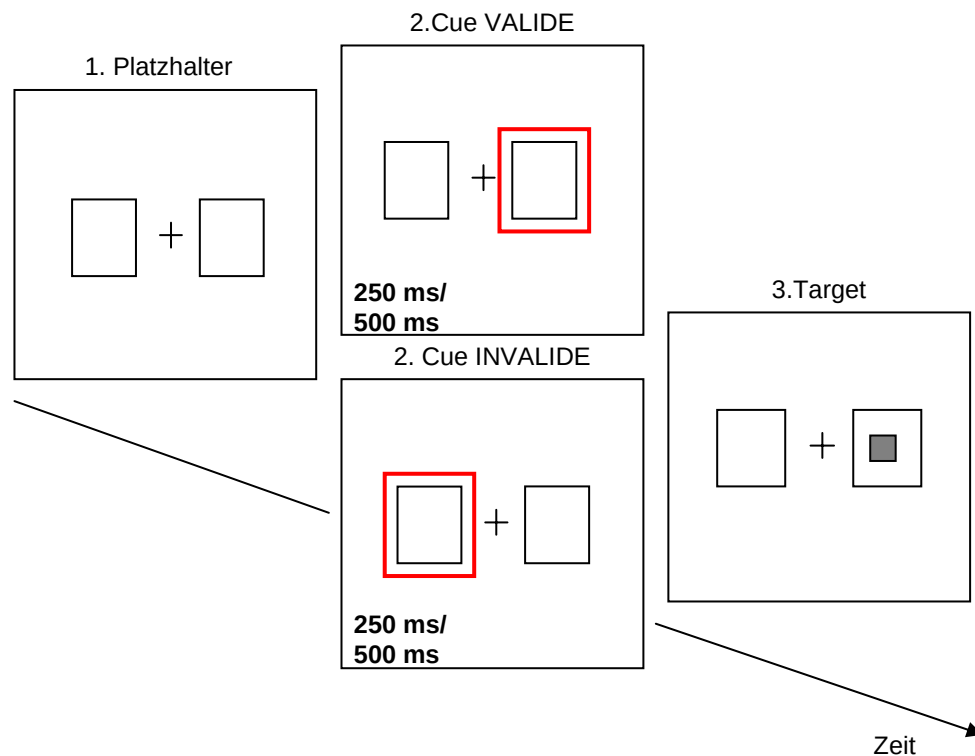


Abbildung 4.19 Schematische Darstellung der Diskriminationsaufgabe aus Experiment 12 und 13 in einem Experimentaldurchgang mit exogenem Cue. Zu Beginn des Trials erscheint ein zentrales Fixationskreuz. Links und rechts dieses Fixationskreuzes wird je ein Quadrat dargeboten. Anschließend wird ein exogener Cue präsentiert, der in dem Dunkelwerden eines der beiden Quadrate besteht (hier ist der Cue als rotes Quadrat, das den Platzhalter umgibt, angedeutet). Der Cue ist in 70% der Trials valide, in 15% invalide. Nach einem SOA von 250 ms oder 500 ms wird das Target (kleines graues Quadrat) dargeboten. In den Catch-Trials (nicht dargestellt) wurde kein Target präsentiert. In *Experiment 12* war es die Aufgabe der Probanden nach Erscheinen des Targets so schnell wie möglich mit der linken Hand eine Taste zu drücken, wenn das Target links vom Fixationskreuz dargeboten wurde. Wurde das Target rechts vom Fixationskreuz präsentiert, sollte mit der rechten Hand eine Taste gedrückt werden. In *Experiment 13* sollten die Probanden nach Erscheinen des Targets so schnell wie möglich eine Sakkade zum jeweiligen Präsentationsort ausführen.

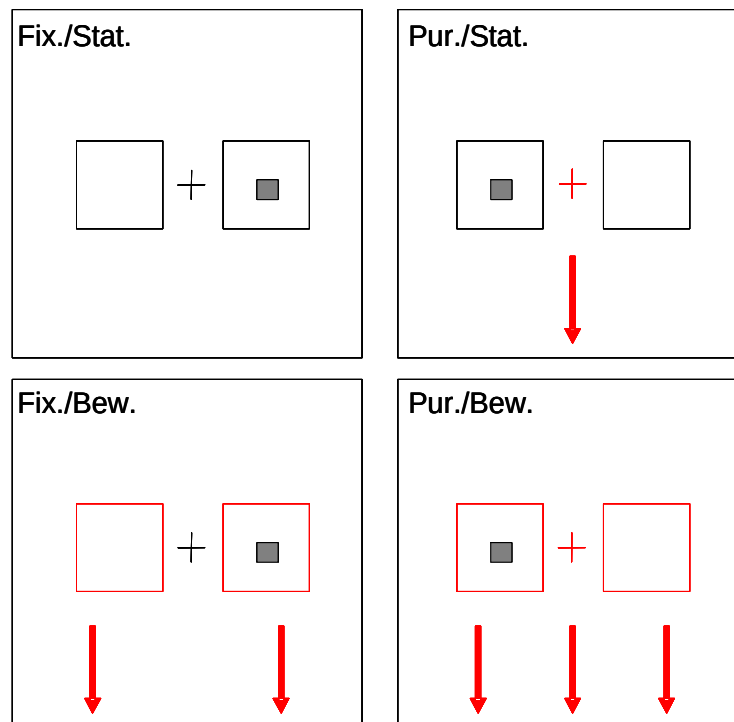


Abbildung 4.20 Schematische Darstellung der Blickbewegungsaufgabe aus den Experimenten 12 und 13. Weitere Erläuterungen finden sich im Text. Fix./Stat. (oben links) = Fixationsbedingung mit stationären Reizen; Pur./Bew. (unten rechts) = Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen; Fix./Bew. (oben rechts) = Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen; Pur./Stat. (unten links) = Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen. Rote Bildelemente repräsentieren sich bewegende Reize, schwarze Bildelemente repräsentieren stationär dargebotene Reize (das Diskriminations-Target ist hingegen immer grau dargestellt, egal ob es sich bewegt oder nicht).

4.11.1 Methode

Probanden

Die allgemeinen Charakteristika der Probanden aus Experiment 12 waren die gleichen wie die der Versuchsteilnehmer aus Experiment 8a.

Material und Durchführung

Material und Durchführung in Experiment 12 waren wie in Experiment 10 mit folgenden Modifikationen: In der Fixationsbedingung mit stationären Reizen wurde das Fixationskreuz

stets in der Bildschirmmitte präsentiert. Nach dem Start eines Trials wurde jeweils links und rechts des Kreuzes ein $1.5 \times 1.5^\circ$ großes Quadrat eingeblendet. Die Entfernung von Fixationskreuz zum jeweiligen Mittelpunkt der beiden Quadrate betrug 4° . Anschließend wurde ein exogener Cue präsentiert, der wie in Experiment 8a in dem Dunkelwerden eines der beiden Quadrate bestand. 250 ms oder 500 ms nach dem Onset des Cues wurde in der Mitte eines Quadrats ein Diskriminations-Target dargeboten. Als Diskriminations-Target diente das gleiche graue Quadrat, das in den Experimenten 10 und 11 schon als Detektions-Target Verwendung fand. Die Aufgabe der Probanden war es, nach Erscheinen des Diskriminations-Targets links vom Blickbewegungs-Target so schnell wie möglich eine Taste mit der linken Hand zu drücken, und wenn das Target rechts vom Blickbewegungsreiz präsentiert wurde, mit der rechten Hand zu reagieren; auf gar keinen Fall sollten sie mit einem Tastendruck reagieren, wenn kein Target dargeboten wurde (Catch-Trial). Alle anderen Parameter, wie z.B. die Helligkeit der verwendeten Stimuli und die zeitliche Organisation eines Durchgangs, waren wie in Experiment 10.

In der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen wurde das Fixationskreuz zufällig in einer exzentrischen Position 4° ober- oder unterhalb vom Bildschirmmittelpunkt dargeboten. Nach dem Starten des Durchgangs wurden in dieser exzentrischen Position links und rechts des Kreuzes die oben beschriebenen Quadrate eingeblendet. Anschließend begannen sich das Fixationskreuz und die Quadrate zusammen mit einer konstanten Geschwindigkeit von $4^\circ/\text{s}$ vertikal auf die Mitte des Bildschirms hin zu bewegen. Die Probanden wurden instruiert, dem sich bewegenden Fixationskreuz mit den Augen zu folgen. Während sich Fixationskreuz und Quadrate über den Monitor bewegten, wurden der Cue und das Target unter Verwendung der gleichen zeitlichen Parameter wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen präsentiert. Nach dem Erscheinen des Diskriminations-Targets wurden die Diskriminationsstimuli bis zum Ende des Trials dargeboten. Alle anderen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

In der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen verblieb das Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Die Stimuli der Diskriminationsaufgabe erschienen zufällig in

einer exzentrischen Position 4° ober- oder unterhalb vom Bildschirmmittelpunkt. Während das Fixationskreuz in der Mitte des Monitors stationär dargeboten wurde, fingen die Stimuli der Diskriminationsaufgabe an, sich auf der gleichen vertikalen Trajektorie über den Bildschirm zu bewegen wie die Stimuli der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen. Alle anderen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

In der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen erschien das Fixationskreuz zufällig in einer exzentrischen Position 4° ober- oder unterhalb des Bildschirmmittelpunktes und begann sich mit konstanter Geschwindigkeit vertikal auf die Mitte des Monitors hin zu bewegen. Die Trajektorie des Pursuit-Targets in dieser Bedingung entsprach exakt der Trajektorie in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen. Die Stimuli der Diskriminationsaufgabe erschienen in der Mitte des Bildschirms an den Positionen, an denen sie auch in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen dargeboten worden waren (also jeweils links und rechts des Mittelpunkts). Alle anderen Parameter waren wie in der Fixationsbedingung mit stationären Reizen.

Design

Die Fixationsbedingung und die Pursuit-Bedingung wurden in kleinen Blöcken von je 40 Trials von den Probanden durchlaufen. Jede der zwei Blickbewegungsbedingungen wurde zweimal durchlaufen, bevor das Blickbewegungsmessgerät recalibriert wurde (d.h. nach 160 Durchgängen). Die Abfolge der Experimentalblöcke wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. In einer Experimentalsitzung wurden von den Probanden drei der Einzelblöcke à 160 Trials bearbeitet, was insgesamt 480 Durchgänge ergab. In den zwei Experimentalsitzungen zusammen wurden demnach 960 Trials erhoben.

4.11.2 Ergebnisse

Die Rohdaten aus Experiment 12 wurden wie in Experiment 10 analysiert. Von der statistischen Analyse der Reaktionszeiten mussten ca. 11% der erhobenen Durchgänge ausgeschlossen werden; in die Analyse des Gains fanden ca. 5% der Trials keinen Eingang.

Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten für das Experiment 12 sind in Abbildung 4.21 graphisch dargestellt.

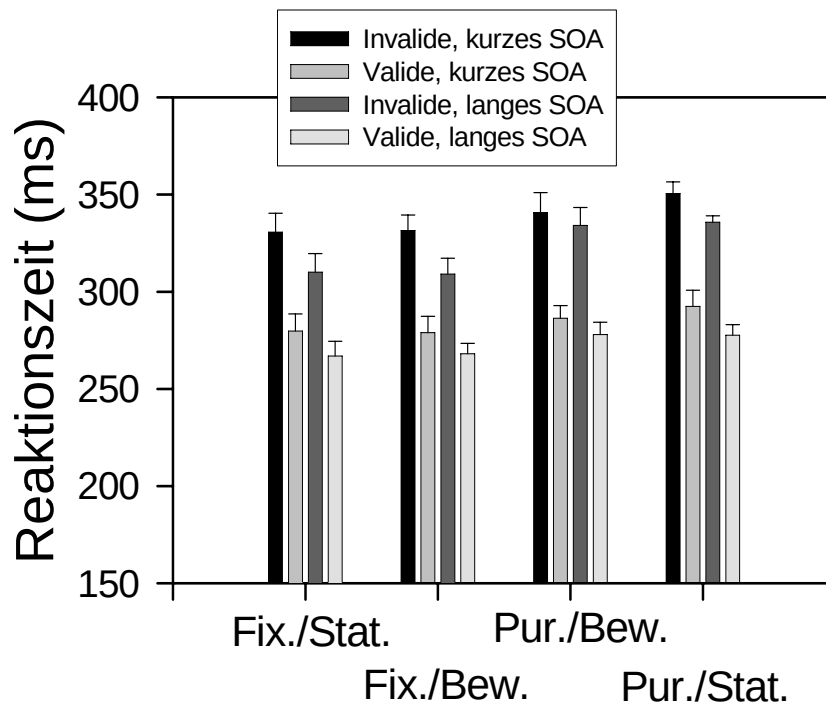


Abbildung 4.21 Die manuellen Reaktionszeiten aus Experiment 12. Dargestellt sind die mittleren manuellen Reaktionszeiten und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für valide und invalide Durchgänge und zwar sowohl für das kurze als auch das lange SOA als Funktion der vier Blickbewegungsbedingungen (Fixationsbedingung mit stationären Diskriminationsreizen = Fix./Stat., Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen = Fix./Bew., Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen = Pur./Bew., Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen = Pur./Stat.). Fix. = Fixation; Pur. = Pursuit; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Achtung: Anders als in den bisherigen Darstellungen der Reaktionszeiten erstreckt sich die Skalierung der y-Achse hier von 150 bis 400ms!

Die vierfaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X valide vs. invalide Trials X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung X langes vs. kurzes SOA), messwiederholte ANOVA über die manuellen Reaktionszeiten zeigte, dass die Probanden in den validen Trials (278 ms) statistisch signifikant schneller reagierten als in den invaliden Trials (330 ms),

$F(1,6) = 1383.72$, $MSE = 54.29$, $p < 0.001$. Der Haupteffekt des SOA verdeutlichte, dass die Probanden in den Durchgängen mit langem SOA (297 ms) schneller waren als in den Durchgängen mit kurzem SOA (311 ms), $F(1,6) = 21.72$, $MSE = 249.37$, $p < 0.004$. Der signifikante Haupteffekt der Blickbewegungsbedingung zeigte, dass die Versuchspersonen in den Fixationsbedingungen schneller reagierten (296 ms) als in den Pursuit-Bedingung (311 ms), $F(1,6) = 20.88$, $MSE = 304.54$, $p < 0.005$. Die signifikante Zweifach-Interaktion (validen vs. invaliden Trials X Blickbewegungsbedingung), $F(1,6) = 6.32$, $MSE = 105.80$, $p = 0.046$, verdeutlicht schließlich, dass die Probanden in den validen Trials sowohl in den Fixationsbedingungen (273 ms) als auch in den Pursuit-Bedingungen (284 ms) etwa gleich schnell waren (jedenfalls ist der Unterschied nicht so deutlich wie in den invaliden Trials), in den invaliden Durchgängen während Fixation (320 ms) jedoch eindeutig schneller Reaktionszeiten erzielt wurden (Pursuit: 340 ms). Alle anderen Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant ($ps > 0.1$). Gepaarte t-Tests für jede der vier Blickbewegungsbedingung (und die zwei SOAs) bestätigten den statistisch signifikanten Unterschied zwischen validen und invaliden Trials ($ps < 0.002$).

Augenbewegungen

Der Pursuit-Gain für das Experiment 12 ist in Abbildung 4.22 graphisch dargestellt.

Die dreifaktorielle (Experimental- vs. Catch-Trials X stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X Zeit [vierzehn 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass der Gain über die vierzehn 50 ms-Intervalle hinweg abnahm, $F(13,78) = 2.91$, $MSE = 7.62E-03$, $p < 0.003$. Im ersten Intervall lag der Gain bei 0.94, im letzten Intervall betrug er nur noch 0.91. Ob es sich um einen Experimentaldurchgang oder einen Catch-Trial handelte, war für den Gain nicht von Bedeutung ($p > 0.9$). Der Haupteffekt der Bewegungsbedingung der Diskriminationsreize war knapp nicht signifikant ($p = 0.058$), obwohl der Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen rein deskriptiv höher ist (0.96) als in der Bedingung mit stationären Reizen (0.86). Außerdem war die Zweifach-Interaktion aus (Experimental- vs. Catch-Trials X Zeit), $F(13,78) = 1.85$, $MSE = 4,05E-03$, p

= 0.049, knapp signifikant, die korrigierten p-Werte (z.B. Greenhouse-Geisser) waren es jedoch nicht. Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant.

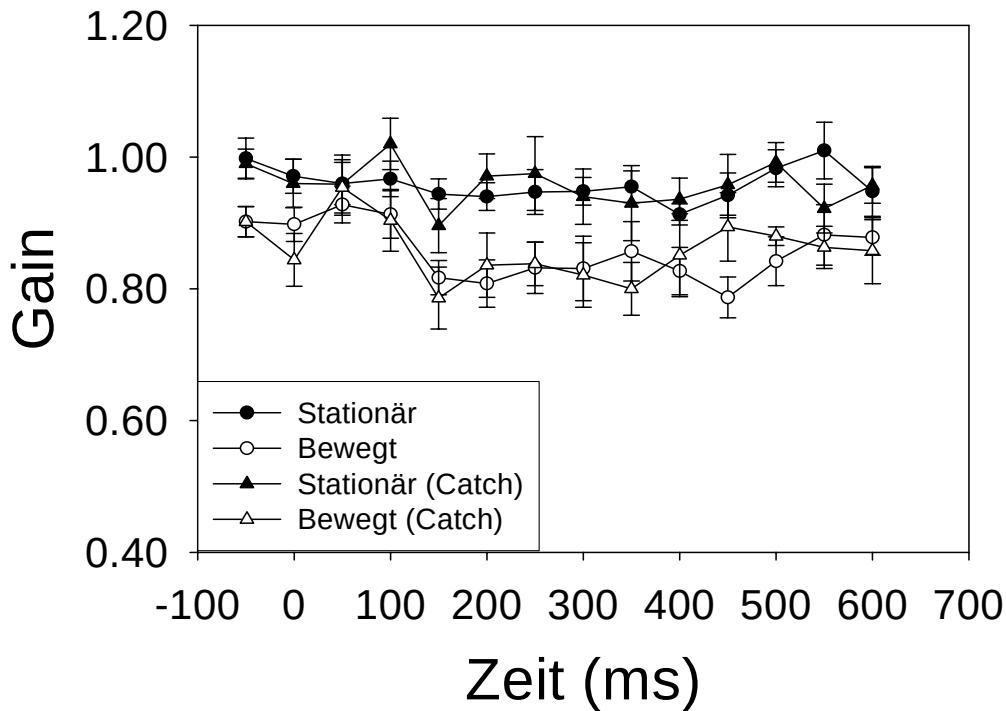


Abbildung 4.22 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 12. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise = Experimentaldurchgänge; schwarze Dreiecke = Catch-Trials) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise = Experimentaldurchgänge; weiße Dreiecke = Catch-Trials). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationonset des exogenen Cues.

Achtung: Anders als in den bisherigen Darstellungen des Gains erstreckt sich die Skalierung der y-Achse hier von 0.40 bis 1.20!

4.11.3 Diskussion

Das Experiment 12 lieferte folgende Hauptbefunde:

Erstens zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die Reaktionszeiten der Probanden in den validen Durchgängen insgesamt schneller waren als in den invaliden.

Dieser Cueing-Effekt wurde für alle vier Blickbewegungsbedingungen nachgewiesen. Dabei war der gefundene Effekt in diesem Experiment von der Blickbewegungsbedingung abhängig: Mit stationärem Auge reagierten die Probanden schneller als während der Ausführung einer GAF. Versuchspersonen sind dennoch in der Lage, ihre Aufmerksamkeit vom Target einer GAF zu lösen und einem peripheren Reiz, hier einem exogenen Cue, zuzuwenden.

Drittens ist festzuhalten, dass Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem keinen Einfluss auf die Ausführung von ASs während GAFs zu haben scheinen. Die Reaktionen der Probanden war stets gleich schnell, ungeachtet dessen, ob sowohl das retinale als auch das räumliche Referenzsystem stabil gehalten wurden (Fixationsbedingung mit stationären Diskriminationsstimuli), in beiden Systemen Veränderungen auftraten (Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen) oder ob nur in einem der beiden Bezugssysteme stabile Bedingungen aufrechterhalten wurden (in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen und Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen).

Experiment 12 ist zu diesem Zeitpunkt das einzige Experiment, in dem statistisch keine eindeutige Abhängigkeit des Gains von der Bewegungsbedingung der Diskrimination-Targets gefunden wurde, obwohl sie rein deskriptiv vorhanden scheint.

4.12 Experiment 13: Exogene Aufmerksamkeitsshifts (visuelle „speeded discrimination“)

In Experiment 12 wurden exogene ASs während GAF untersucht und zwar unter Verwendung einer Aufgabe vom Typ manuelle „speeded discrimination“. Im letzten Experiment, in Experiment 13, wurden exogene ASs während GAFs untersucht, diesmal für eine Aufgabe vom Typ visuelle „speeded discrimination“. Dazu wurde das Stimulus-Material aus

Experiment 12 verwendet, allerdings wurden sowohl die Blickbewegungsaufgabe (Abbildung 4.20) als auch die Antwortmodalitäten bezüglich der Diskriminationsaufgabe (Abbildung 4.19) abgeändert:

Die Aufgabe der Probanden war es in diesem Experiment, so schnell wie möglich nach Erscheinen des Diskriminations-Targets eine Sakkade zum jeweiligen Präsentationsort des Targets auszuführen. Erschien das Diskriminations-Target links vom Blickbewegungs-Target, sollte eine Sakkade nach links gemacht werden, erschien der Diskriminationsstimulus rechts vom Fixationskreuz, sollte eine Sakkade nach rechts ausgeführt werden. Der Unterschied in der Diskriminationsleistung – operationalisiert über Unterschiede in den visuellen Reaktionszeiten (Sakkadenlatenzen) der Versuchspersonen – zwischen validen und invaliden Trials wurde als Maß für die visuelle Aufmerksamkeit genommen.

Die Tatsache, dass für die Beantwortung der Diskriminationsaufgabe das Ausführen einer Sakkade nötig wurde, führte zu folgenden Modifikationen bezüglich der Blickbewegungsaufgabe: In der Fixationsbedingung mit stationären Reizen wurden alle Reize stationär dargeboten. Die Versuchspersonen sollten so lange die Fixation aufrechterhalten, bis das Diskriminations-Target erschien. Sobald das Target erschienen war, sollten sie eine Sakkade zu seinem Präsentationsort ausführen und es dort bis zum Ende der Trials fixieren.

In der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen bewegten sich alle Reize. Die Probanden sollten bis zum Erscheinen des Targets das Fixationskreuz mit den Augen verfolgen. Erschien das Diskriminations-Target, sollten sie eine Sakkade zu seinem Präsentationsort ausführen und das sich bewegende Target bis zum Ende des Trials mit den Augen verfolgen.

In der Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen sollten die Versuchsteilnehmer so lange die Fixation auf dem stationären Fixationskreuz aufrechterhalten, bis das Diskriminations-Target erschien. Sobald das sich bewegende Target erschienen war, sollten sie eine Sakkade zu seinem Präsentationsort ausführen und es bis zum Ende der Trials mit den Augen weiter verfolgen.

In der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen sollten die Probanden das sich bewegende Fixationskreuz so lange mit den Augen verfolgen, bis das Diskriminations-Target

dargeboten wurde. Nach Erscheinen des stationären Diskriminations-Targets sollten sie eine Sakkade zum Ort seiner Präsentation ausführen und es dort bis zum Ende des Trials fixieren.

In den Catch-Trials entfielen die Sakkaden, weil kein Target präsentiert wurde. In diesem Fall sollten die Probanden in den Fixationsbedingungen das Fixationskreuz fixieren und in den Pursuit-Bedingungen dem sich bewegenden Pursuit-Target mit den Augen folgen.

Wenn die Probanden in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit auf einen peripheren Cue zu verlagern, dann würde man eine bessere Diskriminationsleistung im Sinne von schnelleren visuellen Reaktionszeiten (kürzeren Sakkadenlatenzen) in den validen im Vergleich zu den invaliden Durchgängen erwarten. Diese wie auch alle anderen Annahmen, die in Experiment 13 überprüft wurden, waren erneut identisch mit den Annahmen, die bereits in Experiment 8a geschildert wurden.

4.12.1 Methode

Probanden

An Experiment 13 nahmen dieselben Probanden teil wie an Experiment 12.

Material, Durchführung und Design

Material, Durchführung und Design waren wie in Experiment 12, abgesehen von der oben bereits geschilderten Modifikation der Blickbewegungsaufgabe und der Tatsache, dass eine okulomotorische Reaktion anstelle einer manuellen gefordert war.

4.12.2 Ergebnisse

Die Rohdaten aus Experiment 13 wurden wie in Experiment 10 analysiert (abgesehen von den unten dargestellten Aspekten bezüglich des Gains). Von der statistischen Analyse der Reaktionszeiten mussten ca. 11% der erhobenen Durchgänge ausgeschlossen werden; in die Analyse des Gains fanden ca. 5% der Trials keinen Eingang.

Reaktionszeiten

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass für die Bestimmung der visuellen Reaktionszeiten (Sakkadenlatenzen) der EyeLink II-Augenbewegungs-Parsers verwendet wurde: Die Messung der sakkadischen Reaktionszeiten wurde mit der Präsentation des Diskriminations-Targets gestartet und wurde beendet, sobald mittels des Parsers eine Sakkade detektiert wurde, die größer als 3° war. Die Reaktionszeiten für das Experiment 13 sind in Abbildung 4.23 graphisch dargestellt.

Die vierfaktorielle (stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X valide vs. invalide Trials X Fixations- vs. Pursuit-Bedingung X langes vs. kurzes SOA), messwiederholte ANOVA über die visuellen Reaktionszeiten zeigte, dass die Probanden in den validen Trials (216 ms) statistisch signifikant schneller reagierten als in den invaliden Trials (231 ms), $F(1,6) = 14.26$, $MSE = 410.10$, $p < 0.01$. Der Haupteffekt des SOA verdeutlichte, dass die Probanden in den Durchgängen mit langem SOA (220 ms) schneller waren als in den Durchgängen mit kurzem SOA (227 ms), $F(1,6) = 14.30$, $MSE = 90.05$, $p < 0.01$. Die signifikante Zweifach-Interaktion (validen vs. invaliden Trials X SOA), $F(1,6) = 13.94$, $MSE = 63.13$, $p > 0.02$, verdeutlicht schließlich, dass die Probanden in den validen Trials sowohl mit kurzem SOA (217 ms) als auch mit langem SOA (216 ms) etwa gleich schnell waren, in den invaliden Durchgängen mit langem SOA (224 ms) jedoch schnellere Reaktionszeiten erzielt wurden als mit kurzem SOA (237 ms). Alle anderen Haupteffekte und Interaktionen waren nicht signifikant ($ps > 0.1$). Gepaarte t-Tests für jede der vier Blickbewegungsbedingung (und die zwei SOAs) bestätigten den statistisch signifikanten Unterschied zwischen validen und invaliden Trials für die meisten Bedingungen ($ps < 0.05$), allerdings nicht für alle: In beiden Fixationsbedingungen und in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegendem Reizen unterschieden sich die visuellen Reaktionszeiten für die validen und invaliden Trials bei langem SOA nicht voneinander ($ps > 0.2$).

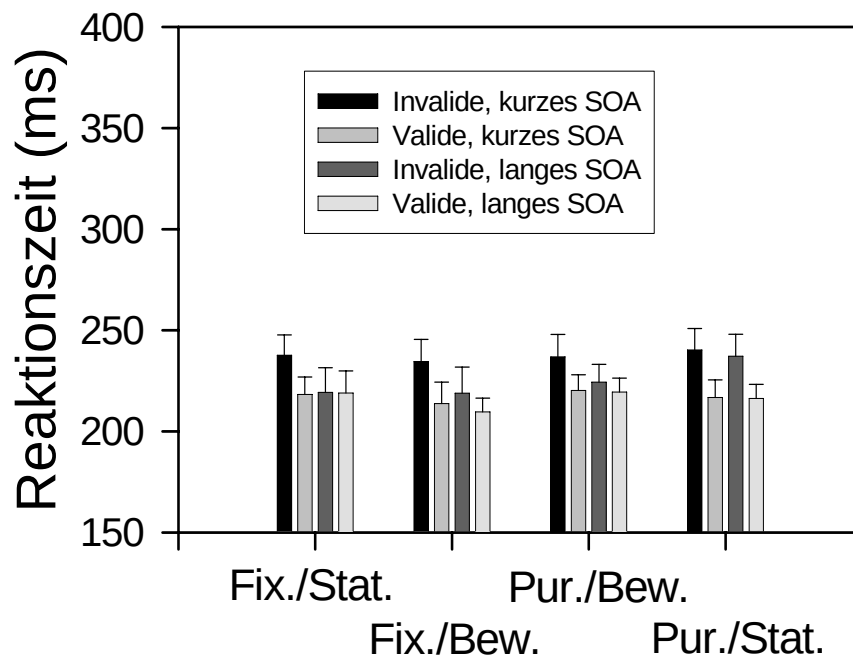


Abbildung 4.23 Die visuellen Reaktionszeiten aus Experiment 13. Dargestellt sind die mittleren Sakkadenlatenzen und ihre Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für valide und invalide Durchgänge, sowohl für das kurze als auch das lange SOA als Funktion der vier Blickbewegungsbedingungen (Fixationsbedingung mit stationären Diskriminationsreizen = Fix./Stat., Fixationsbedingung mit sich bewegenden Reizen = Fix./Bew., Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen = Pur./Bew., Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen = Pur./Stat.). Fix. = Fixation; Pur. = Pursuit; Stat. = stationär; Bew. = bewegt.

Augenbewegungen

Der Gain wurde in diesem Experiment über insgesamt neun Intervalle von je 50 ms Länge berechnet. Das erste 50 ms-Intervall erstreckte sich von 50 ms vor der Präsentation des Cues bis zum Onset des Cues. Im zweiten Intervall wurde über den Zeitraum von Cue-Onset bis Cue-Offset gemittelt usw. Der Gain wurde nicht über die bisher gebräuchlichen vierzehn 50 ms-Intervalle berechnet, sondern über neun, weil nur für diese neun Intervalle sowohl für das kurze als auch das lange SOA plausible Messwerte vorlagen: In den Durchgängen mit einem kurzen SOA hatten die Probanden schon die Antwort-Sakkade ausgeführt und fixierten bereits

das Diskriminations-Target während der letzten fünf 50 ms-Intervalle, so dass diese Werte für einen Analyse nicht verwertbar waren.

Obwohl in die statistische Analyse des Gains nur neun Intervalle eingegangen sind (und obwohl das SOA kein Faktor der Varianzanalyse war, d.h. es wurden beide SOAs in der Analyse zusammengefasst), wurde der Gain graphisch für alle vierzehn Intervalle und für die beiden SOAs getrennt voneinander dargestellt.

Der Pursuit-Gain für das lange SOA ist in Abbildung 4.24 dargestellt, der Pursuit-Gain für das kurze SOA ist in Abbildung 4.25 dargestellt.

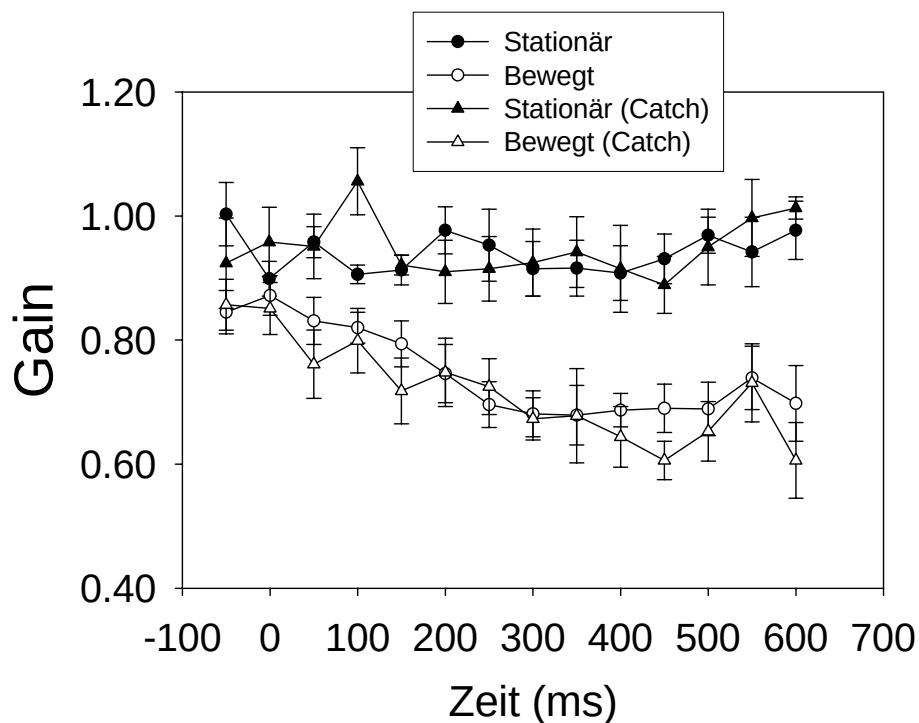


Abbildung 4.24 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 13 für das lange SOA. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen, die zu einem auf der Retina stabilen oder *stationären Abbild* führt (schwarze Kreise = Experimentaldurchgänge; schwarze Dreiecke = Catch-Trials) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen, die zu einem sich auf der Retina *bewegenden Abbild* führt (weiße Kreise = Experimentaldurchgänge; weiße Dreiecke = Catch-Trials). Siehe auch Abbildung 4.25.

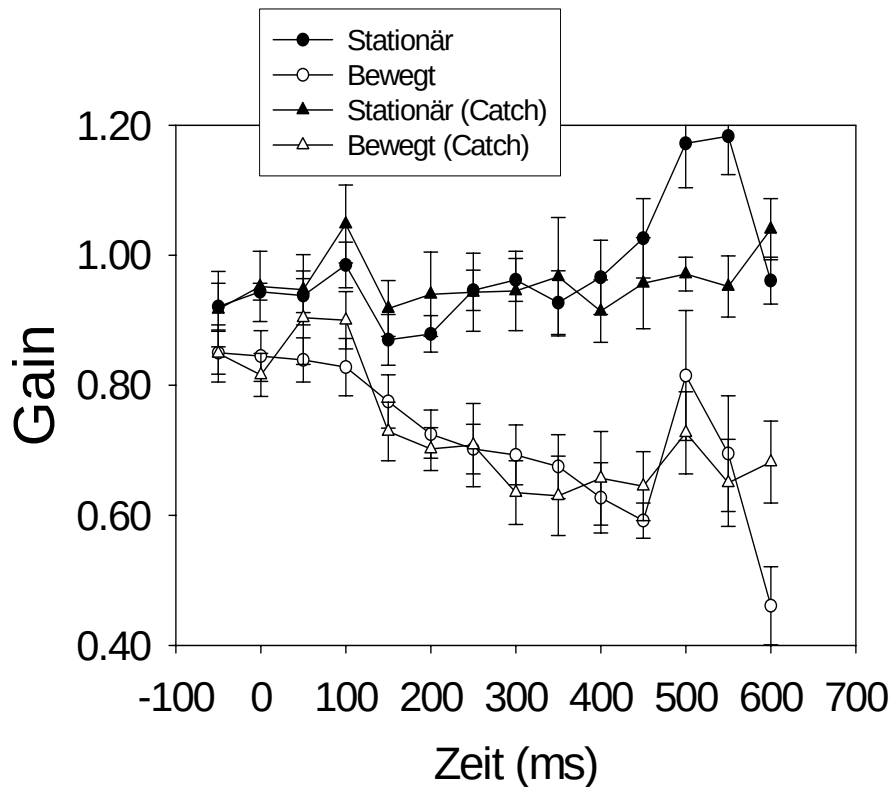


Abbildung 4.25 Smooth Pursuit-Gain aus Experiment 13 für das kurze SOA. Dargestellt sind der mittlere Gain und seine Standardschätzfehler (zwischen den Versuchspersonen) für die Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen (schwarze Kreise = Experimentaldurchgänge; schwarze Dreiecke = Catch-Trials) und die Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen (weiße Kreise = Experimentaldurchgänge; weiße Dreiecke = Catch-Trials). Der Gain ist als Funktion der Zeit abgetragen. Der Nullpunkt auf der Zeitachse entspricht dabei dem Präsentationsonset des exogenen Cues.

Anmerkung. Aus Gründen der Skalierung sind am Ende der Graphik nicht alle Fehlerbalken vollständig abgebildet. Die ungewöhnlichen Werte für den Gain ab etwa 450 ms stehen damit in Zusammenhang, dass die Versuchspersonen zu diesem Zeitpunkt schon die Sakkade zum Diskriminations-Target ausgeführt hatten und dieses fixierten. Insofern handelt es sich bei den dargestellten Werten nicht um den Pursuit-Gain im herkömmlichen Sinne, sondern eher um Augenbewegungen aufgrund des post-sakkadischen Drifts.

Die dreifaktorielle (Experimental- vs. Catch-Trials X stationäre vs. bewegte Diskriminationsreize X Zeit [neun 50 ms-Intervalle]), messwiederholte ANOVA über den Pursuit-Gain zeigte, dass der Gain über die neun 50 ms-Intervalle hinweg abnahm, $F(8,48) = 10.46$, $MSE = 5.35E-03$, $p < 0.001$. Im ersten Intervall lag der Gain bei 0.90, im letzten Intervall betrug er nur noch 0.80. Ob es sich um einen Experimentaldurchgang oder einen

Catch-Trial handelte, war für den Gain nicht von Bedeutung ($p > 0.8$). Der Haupteffekt der Bewegungsbedingung der Diskriminationsreize verdeutlichte, dass der Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reize höher (0.94) war als in der Bedingung mit stationären Reizen (0.78), $F(1,6) = 24.42$, $MSE = 78.76E-03$, $p < 0.004$. Die signifikante Zweifach-Interaktion (Bewegungsbedingung der Diskriminationsreize X Zeit), $F(8,48) = 5.61$, $MSE = 6.23E-03$, $p < 0.001$, verdeutlicht, dass der Haupteffekt des Faktors Zeit im Wesentlichen auf eine Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Diskriminationsstimuli zurückzuführen ist (erstes Intervall: 0.85; letztes Intervall: 0.66), während sich die Werte für den Gain in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen über die Zeit hinweg kaum verschlechtern (erstes Intervall: 0.94; letztes Intervall: 0.94). Alle anderen Ergebnisse waren nicht signifikant.

4.12.3 Diskussion

Das Experiment 13 lieferte folgende Hauptbefunde:

Erstens zeigen die Ergebnisse, dass die Reaktionszeiten der Probanden in den validen Durchgängen insgesamt schneller waren als in den invaliden.

Zweitens wurde dieser Cueing-Effekt zwar für alle vier Blickbewegungsbedingungen (Fixation und stationäre Reize, Pursuit und sich bewegende Reize, Fixation und sich bewegende Reize und Pursuit und stationäre Reize) nachgewiesen, er konnte jedoch nicht immer für das getestete lange SOA gefunden werden. Dieser Punkt hängt unter Umständen damit zusammen, dass die visuellen Reaktionszeiten der Probanden in diesem Experiment extrem kurz waren. Ein Vergleich der Reaktionszeiten aus den Experimenten 12 und 13 zeigt daher auch, dass die visuellen Reaktionen statistisch signifikant schneller waren als die manuellen ($p < 0.001$). Es wäre möglich, dass unter Verwendung von Sakkadenlatenzen als Antwortmodalität das räumliche Cueing an seine zeitlichen Grenzen stößt. Dennoch weisen die Resultate darauf hin, dass Versuchspersonen in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit vom Target einer GAF zu lösen und einem peripheren Reiz, hier einem exogenen Cue, zuzuwenden.

Drittens ist festzuhalten, dass auch Veränderungen im räumlichen oder retinalen Bezugssystem der Probanden keinen Einfluss auf die Ausführung von ASs während GAFs zu haben scheinen.

Viertens ist festzustellen, dass die Tatsache, ob sich die Stimuli der Diskriminationsaufgabe bewegten oder nicht, – anders als in Bezug auf die Reaktionszeiten – einen ganz erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain hatte: Bewegten sich die Diskriminationsreize mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Target der GAF, war der Gain über den gesamten Zeitraum der Messung stabil einem Wert nahe 0.90. Wenn hingegen die Diskriminationsreize stationär in der Mitte des Bildschirms dargeboten wurden, zeigte sich ein deutlicher Leistungsabfall in den Werten des Gains über die Zeit. An diesem Punkt kann man zusammenfassend festhalten, dass exogene ASs und retinal stabile Diskriminationsreize anscheinend keinen nachteiligen Einfluss auf den Pursuit-Gain haben; exogene ASs und retinal bewegte Diskriminationsstimuli hingegen führen zu einer Verschlechterung des Gains über die Zeit.

Auch die in diesem Experiment gefundenen Ergebnisse stehen also in Einklang mit den in den zuvor berichteten Ergebnissen der anderen Experimente.

4.13 Allgemeine Diskussion

Studien zur Interaktion von visueller Aufmerksamkeit und sakkadischen Augenbewegungen haben eine obligatorische und selektive Kopplung von Aufmerksamkeitsfokus und Sakkadenziel an einen gemeinsamen Zielreiz nahe gelegt (z.B. Deubel und Schneider, 1996). Ähnlich haben auch Khurana und Kowler (1987) argumentiert, dass visuelle Aufmerksamkeit während der Ausführung einer glatten Augenfolgebewegung an das Target der Augenfolgebewegung gebunden ist.

In den in diesem Teil der Arbeit beschriebenen Experimenten wurde der Frage nachgegangen, ob trotz der gefundenen Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Target einer Augenbewegung dennoch räumlich eng umgrenzte Aufmerksamkeitsverlagerungen als Antwort auf die Präsentation eines exogenen oder

endogenen Cues (Posner, 1980) während Smooth Pursuit möglich sind. Im Detail sollten folgende Fragen beantwortet werden: Sind Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen möglich? Sind Aufmerksamkeitsverlagerungen während Pursuit vom verwendeten Cue abhängig (exogen oder endogen)? Finden Aufmerksamkeitsverlagerungen vielleicht nur in einem bestimmten Referenzsystem statt, d.h. hat die Veränderung oder Stabilität retinaler oder räumlicher Bezugssysteme während Pursuit einen Einfluss auf die Aufmerksamkeitsverlagerung? Sind Aufmerksamkeitsverlagerungen vom verwendeten Aufgabentyp (motorisch oder perzeptuell) abhängig? Welche Auswirkungen haben Aufmerksamkeitsverlagerungen auf die glatte Augenfolgebewegung selbst, d.h. den Pursuit-Gain?

Um diesen Fragen nachgehen zu können, wurde eine Serie von Experimenten durchgeführt: In Experiment 8a wurde unter Verwendung einer perzeptuellen Diskriminationsaufgabe, die mit einer Augenfolgebewegungsaufgabe kombiniert wurde, untersucht, ob exogene Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen möglich sind. In Experiment 9a wurde mit Hilfe des gleichen Aufgabentyps getestet, ob Versuchspersonen in der Lage sind, auch endogene Aufmerksamkeitsverlagerungen während Pursuit durchzuführen. In den Kontrollexperimenten 8b und 9b wurde überprüft, ob die in den Experimenten 8a und 9a gefundenen Resultate bezüglich des Pursuit-Gains tatsächlich auf eine Aufmerksamkeitsverlagerung zurückzuführen sind oder aber, ob eventuell andere Faktoren für die Ergebnisse ursächlich waren. In den Experimenten 10 und 11 wurden exogene (Experiment 10) und endogene (Experiment 11) Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen für eine einfache Detektionsaufgabe untersucht. In Experiment 12 wurden exogene Aufmerksamkeitsverlagerungen während Pursuit getestet unter Verwendung einer manuellen Diskriminationsaufgabe, in der die Probanden unter Zeitdruck auf das Erscheinen eines peripheren Reizes mit einem Tastendruck reagieren sollten. In Experiment 13 wurden schließlich exogene Aufmerksamkeitsverlagerungen für eine visuelle Diskriminationsaufgabe untersucht, in der die Versuchsteilnehmer so schnell wie möglich eine Sakkade zum Präsentationsort eines peripheren Reizes ausführen sollten.

Obwohl Teilergebnisse einzelner Experimente unter Umständen leicht abweichend waren (siehe z.B. Experimentt 13, in dem der Cueing-Effekt nicht in allen Bedingungen für das lange SOA nachgewiesen werden konnte), lässt sich bezüglich der vorliegenden Resultate zusammenfassend festhalten, dass sowohl exogene als auch endogene Aufmerksamkeitsverlagerungen während glatter Augenfolgebewegungen möglich sind: Bezüglich aller verwendeten Aufgabentypen (Diskrimination oder Detektion; exogene oder endogene Cues) waren die Probanden in den validen Durchgängen besser als in den invaliden, in dem Sinne, dass schnellere Reaktionszeiten gemessen wurden oder ein höherer Prozentsatz korrekter Antworten erreicht wurde. Dieser Cueing-Effekt konnte für nahezu alle getesteten Blickbewegungsbedingungen (Fixation mit stationären Reizen, Fixation mit sich bewegenden Reizen, Pursuit mit stationären Reizen, Pursuit mit sich bewegenden Reizen) nachgewiesen werden. Ob sich die Diskriminations- bzw. Detektions-Targets dabei auf der Retina der Versuchspersonen bewegten oder nicht, hatte keinen Einfluss auf den Effekt. Demnach sind Aufmerksamkeitsverlagerungen nicht nur in einem bestimmten Referenzsystem (räumlich oder retinal) möglich, sondern davon unabhängig. Eine Bewegung der Diskriminations- bzw. Detektions-Targets auf der Retina der Probanden hatte jedoch einen ganz erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain (zumindest in der Mehrzahl der Experimente): Der Gain in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen verschlechterte sich im zeitlichen Verlauf eines Trials deutlich, während er in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen stabil auf hohem Niveau blieb. Dabei konnte eindeutig geklärt werden, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen tatsächlich auf die auszuführende Aufmerksamkeitsverlagerung zurückzuführen ist und nicht andere Faktoren für dieses Resultat ursächlich sind. Aufmerksamkeitsverlagerungen und retinal stabile Diskriminations- bzw. Detektions-Targets haben demnach scheinbar keinen nachteiligen Einfluss auf den Pursuit-Gain, Aufmerksamkeitsverlagerungen und sich auf der Retina bewegende Diskriminations- bzw. Detektions-Targets führen hingegen zu einer Verschlechterung des Gains über die Zeit. Ein interessanter Befund in diesem Zusammenhang ist, dass diese Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen unter Verwendung eines exogenen Cues zeitlich früher auftrat als unter Verwendung eines

endogenen Cues. Dieser Punkt wiederum entspricht den Ergebnissen früherer Untersuchungen, die besagen, dass ein endogenes Cueing „langsamer abläuft“ als ein exogenes Cueing (z.B. Müller und Rabbitt, 1989): Zeitlich gesehen entfaltet ein endogener Cue seine die Verarbeitung eines Reizes fördernde maximale Wirkung später als ein exogener Cue. Dieser Punkt wiederum scheint damit in Verbindung zu stehen, dass ein endogener Cue zunächst einer Interpretation durch den Beobachter bedarf. In diesem Zusammenhang zeigen z.B. die Ergebnisse von Corbetta und Shulman (2002), dass exo- und endogene Aufmerksamkeitsverlagerungen unterschiedliche Hirnregionen aktivieren.

Dass die vorliegenden Resultate für die Möglichkeit sprechen, dass Probanden ihre Aufmerksamkeit vom Target einer glatten Augenfolgebewegung lösen können, während z.B. die Befunde von Khurana und Kowler (1987) dagegen sprechen, hängt wahrscheinlich mit den unterschiedlichen verwendeten Aufgaben zusammen: Während die Probanden in den Experimenten von Khurana und Kowler weite Teile der Peripherie während der Durchführung einer glatten Augenfolgebewegung überwachen mussten, sollten die Versuchspersonen in den oben dargestellten Experimenten ihre Aufmerksamkeit nur auf einen kleinen und klar definierten Bereich des visuellen Feldes verlagern. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Größe des zu beobachtenden Areals eine entscheidende Rolle spielt, wenn Probanden ihre Aufmerksamkeit einem anderen Reiz als dem Target einer glatten Augenfolgebewegung zuwenden sollen.

Insgesamt sprechen die Resultate dafür, dass die Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Target einer glatten Augenfolgebewegung nicht so strikt ist, wie bisher postuliert.

5 Zusammenfassung und Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden visuelles Kurzzeitgedächtnis und Aufmerksamkeit während glatter Augenfolgebewegungen untersucht.

Im ersten von insgesamt drei Experimentanteilen wurde das visuelle Kurzzeitgedächtnis (VKZG) für die Position und für die Farbe von Objekten während kontinuierlicher Augen- und Objektbewegung untersucht. Unter dem Begriff „kontinuierlichen Augenbewegungen“ sind hier glatte Augenfolgebewegungen (GAFs) zu verstehen. Obwohl es eine Vielzahl von Untersuchungen zu abrupten Veränderungen der Augen- (Sakkaden) oder Objektposition gibt, sind Studien zu kontinuierlichen Veränderung eher selten. Daher sollten zwei Aspekte in diesem ersten experimentellen Teil geklärt werden. Zum einen sollte in Erfahrung gebracht werden, ob das VKZG für die Position von Objekten während GAFs retinozentrisch oder räumlich organisiert ist. Zu diesem Zweck wurden zwei Bedingungen, eine, die die räumliche, und eine andere, die die retinale Stabilität der zu erinnernden Items gewährleistete, miteinander verglichen. Außerdem wurde untersucht, ob die Kapazität des VKZG für die Position oder die Farbe eines Objekts darunter leiden würde, wenn während der Darbietung der zu erinnernden Items eine GAF durchzuführen ist.

Die Kapazität des VKZG für die Position von Objekten war reduziert, wenn die Probanden eine GAF durchführen mussten im Vergleich zu einer Bedingung, in der sie einen stationären Reiz lediglich fixieren sollten. Die Reduzierung der Kapazität des VKZG während Smooth Pursuit betrug etwa ein Item im Vergleich zur Fixationsbedingung; die Leistung der Probanden lag während Pursuit jedoch immer noch weit über dem Zufallsniveau. Zwei verschiedene Smooth Pursuit-Bedingungen wurden getestet (wie oben bereits angedeutet): In einer ersten Bedingung mussten die Versuchspersonen einem Reiz mit den Augen folgen, der sich durch eine stationär dargebotene Reizkonfiguration hindurch bewegte. In der zweiten Bedingung mussten die Probanden einen Reiz visuell verfolgen, während ihnen eine Reizkonfiguration präsentiert wurde, die sich mit gleicher Geschwindigkeit wie das Target der Augenfolgebewegung über den Monitor bewegte. Es zeigte sich kein statistisch bedeutsamer

Unterschied zwischen der ersten Bedingung, die zu einer Bewegung der Targets auf der Retina führte, und der zweiten Bedingung, in der aufgrund dessen, dass sich die Targets mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Auge über den Bildschirm bewegten, keine retinale Bewegung vorhanden war. Das VKZG für die Position von Objekten während Smooth Pursuit ist also weder strikt retinozentrisch noch strikt räumlich organisiert, sondern scheint eher abstrakter Natur zu sein. Des Weiteren verschwand die Reduzierung der Kapazität für die Position von Objekten während Pursuit, wenn Miniaturreize Verwendung fanden, die auf dem Target der GAF dargeboten werden konnten. In ähnlicher Art und Weise unterschied sich die Kapazität des VKZG für die Farbe eines Objekts nicht für Smooth Pursuit und Fixation. Das sensorische Gedächtnis war hingegen nur leicht beeinträchtigt während GAFs.

Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass visuell-räumliche Aufmerksamkeit an das Target einer GAF gebunden ist, was wiederum zu einer Verschlechterung des VKZG für die Position peripherer Objekte führt. In diesem Sinne stimmen die vorliegenden Befunde mit der von Khurana und Kowler (1987) gemachten Beobachtung einer Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Target einer GAF und einer damit einhergehenden verschlechterten Verarbeitung peripherer Reize überein. Vergleicht man die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit Befunden aus Untersuchungen zu abrupten Veränderungen der Augen- oder Objektposition, also mit Experimenten zum transsakkadischen Gedächtnis (z.B. Irwin, 1991), dann existieren zwar Unterschiede zwischen dem VKZG während Sakkaden und dem während GAFs, diese Unterschiede reflektieren aber möglicherweise eher unterschiedliche Anforderungen der einzelnen Aufgaben und deuten nicht auf grundsätzlich unterschiedliche zugrunde liegende Gedächtnissysteme hin.

Im zweiten experimentellen Teil dieser Arbeit wurde in Anlehnung an eine Studie von van Donkelaar (1999) untersucht, wie visuelle Aufmerksamkeit während GAFs räumlich verteilt ist. Wie bei van Donkelaar (1999) war es die Aufgabe der Probanden, einerseits eine GAF durchzuführen und andererseits gleichzeitig so schnell wie möglich auf das Erscheinen eines peripheren Targets mit einem Knopfdruck zu reagieren. Die Auswertung der Knopfdrucklatenzen verdeutlicht, dass die manuellen Reaktionszeiten der Versuchspersonen kürzer waren für periphere Stimuli, die vor dem Pursuit-Target (also in Bewegungsrichtung

der GAF) präsentiert wurden, als für Reize, die hinter dem Pursuit-Target (entgegengesetzt der Bewegungsrichtung) präsentiert wurden. Visuelle Aufmerksamkeit scheint demnach die zukünftige Zielreizposition während GAFs zu antizipieren. Bei genauerer Betrachtung der Resultate wurde jedoch deutlich, dass die Probanden nur in der experimentellen Bedingung mit einem peripheren vor dem Pursuit-Target dargebotenen Reiz schneller reagierten (im Vergleich zu der Bedingung mit einem hinter dem Pursuit-Reiz präsentierten peripheren Stimulus), in der sich das Target der GAF zufällig von links nach rechts oder von rechts nach links über den Bildschirm bewegen konnte (ungeblockte Bewegungsbedingung). In der Experimentalbedingung, in der sich das Pursuit-Target immer nur von links nach rechts bewegte (geblockte Bewegungsbedingung), reagierten die Versuchsteilnehmer stets gleich schnell, egal an welcher Stelle das periphere Target gezeigt wurde. Dieser Befund ist insofern erstaunlich, weil van Donkelaar (1999) in seinen Untersuchungen gerade in dieser geblockten Bewegungsbedingung – und damit also ganz im Gegensatz zu dieser Arbeit – einen klaren Vorteil für periphere Stimuli, die vor dem Pursuit-Target präsentiert wurden, berichtet hat.

Worauf genau die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Studien zurückzuführen sind (ob z.B. die Qualität der Augenfolgebewegungen stark unterschiedlich war), lässt sich letztlich nicht klären. Die aktuellen Resultate weisen allerdings darauf hin, dass ein Reaktionszeitvorteil für periphere Reize, die vor dem Target der GAF dargeboten wurden, nur dann zu finden ist, wenn die GAF selbst bis zu einem gewissen Grade unvorhersehbar ist (ungeblockte Bewegungsbedingung). Ist die Trajektorie des Pursuit-Targets vorhersehbar (geblockt Bewegungsbedingung), verschwindet der Vorteil eines peripher vor dem Pursuit-Reiz präsentierten Stimulus. Während van Donkelaar (1999) schlussfolgert, dass visuelle Aufmerksamkeit während GAFs eindeutig dem Pursuit-Target vorausseilt, sprechen die vorliegenden Ergebnisse zwar auch für eine signifikante räumliche Modulierung der visuellen Aufmerksamkeit während einer GAF, aber der Zusammenhang scheint weniger strikt zu sein, als von van Donkelaar postuliert.

Im dritten und letzten Experimententeil dieser Arbeit wurden Aufmerksamkeitsverlagerungen während GAFs untersucht. Studien zur Interaktion von visueller Aufmerksamkeit und sakkadischen Augenbewegungen haben eine obligatorische

Kopplung von Aufmerksamkeitsfokus und Sakkadenziel nahe gelegt (z.B. Deubel und Schneider, 1996). Wie oben bereits dargestellt, haben auf ganz ähnliche Weise auch Khurana und Kowler (1987) argumentiert, dass visuelle Aufmerksamkeit während der Ausführung einer GAF an das Target der Augenfolgebewegung gebunden ist. Auch die in dieser Arbeit beschriebenen Ergebnisse zum VKZG während GAFs legen den Schluss nahe, dass visuell-räumliche Aufmerksamkeit an das Pursuit-Target gebunden ist, was wiederum zu einer Verschlechterung des VKZG für die Position peripherer Objekte führt.

Im dritten Teil der vorliegenden Arbeit wurde in Anknüpfung an diese Beobachtungen der Frage nachgegangen, ob trotz der gefundenen Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Target einer Augenbewegung dennoch räumlich eng umgrenzte Aufmerksamkeitsverlagerungen als Antwort auf die Präsentation eines exogenen oder endogenen Cues (Posner, 1980) während Smooth Pursuit möglich sind. Neben der Frage, ob Aufmerksamkeitsverlagerungen während GAFs grundsätzlich möglich sind, sollte außerdem geklärt werden, ob eine erfolgreiche Durchführung von Aufmerksamkeitsverlagerungen möglicherweise vom verwendeten Cue (exogen oder endogen) abhängig ist und ob Aufmerksamkeitsverlagerungen vielleicht nur in einem bestimmten Referenzsystem (räumlich oder retinozentrisch) stattfinden. Ein weiterer wichtiger Untersuchungsaspekt war, ob und wenn ja welche Auswirkungen Aufmerksamkeitsverlagerungen auf die GAF selbst haben: Lässt sich z.B. eine Veränderung des Pursuit-Gains in Folge einer Aufmerksamkeitsverlagerung feststellen? Um diesen Punkten nachgehen zu können, wurden in einem Dual-Task-Paradigma eine Blickbewegungsaufgabe und eine Detektions- bzw. Diskriminationsaufgabe miteinander kombiniert: Während die Versuchspersonen einen Blickbewegungsreiz fixierten oder ihn – wenn er sich bewegte – mit den Augen verfolgten, mussten sie gleichzeitig eine Detektions- bzw. Diskriminationsaufgabe bearbeiten, deren Reize entweder stationär dargeboten wurden oder sich über den Bildschirm bewegten.

Die Ergebnisse zeigen, dass Aufmerksamkeitsverlagerungen als Antwort auf die Präsentation von sowohl exogenen sensorischen als auch endogenen kognitiven Cues während GAFs möglich sind: Bei allen verwendeten Aufgabentypen (Diskrimination oder Detektion; exogene oder endogene Cues) waren die Probanden in den validen Durchgängen besser (im

Sinne eines Erzielens von kürzeren Reaktionszeiten bzw. höheren Prozentsätzen korrekter Antworten) als in den invaliden. Dieser Cueing-Effekt konnte für nahezu alle getesteten Blickbewegungsbedingungen (Fixation mit stationären Reizen, Fixation mit sich bewegenden Reizen, Pursuit mit stationären Reizen, Pursuit mit sich bewegenden Reizen) nachgewiesen werden. Ob sich die Diskriminations- bzw. Detektions-Targets dabei auf der Retina der Versuchspersonen bewegten oder nicht, hatte keinen Einfluss auf den Cueing-Effekt. Demnach sind Aufmerksamkeitsverlagerungen nicht nur in einem bestimmten Referenzsystem (räumlich oder retinozentrisch) möglich, sondern davon unabhängig. Eine Bewegung der Diskriminations- bzw. Detektions-Targets hatte jedoch in der Mehrzahl der Experimente einen ganz erheblichen Einfluss auf den Smooth Pursuit-Gain und somit auf die GAF selbst: Der Gain in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen verschlechterte sich im zeitlichen Verlauf eines Trials deutlich, während er in der Pursuit-Bedingung mit sich bewegenden Reizen auf hohem Niveau stabil blieb. Dabei konnte eindeutig geklärt werden, dass die Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen tatsächlich auf die auszuführende Aufmerksamkeitsverlagerung zurückzuführen ist und dass nicht etwa andere Faktoren für dieses Resultat ursächlich sind. Aufmerksamkeitsverlagerungen und retinal stabile Diskriminations- bzw. Detektions-Targets haben also scheinbar keinen nachteiligen Einfluss auf den Pursuit-Gain. Aufmerksamkeitsverlagerungen und retinal bewegte Diskriminations- bzw. Detektions-Targets führen hingegen zu einer Verschlechterung des Gains über die Zeit. Ein interessanter Befund in diesem Zusammenhang ist der, dass diese Verschlechterung des Gains in der Pursuit-Bedingung mit stationären Reizen unter Verwendung eines exogenen Cues zeitlich früher auftritt als unter Verwendung eines endogenen Cues. Dieser Punkt wiederum spiegelt schön frühere Ergebnisse wider, die besagten, dass exogenes und endogenes Cueing unterschiedliche zeitliche Verläufe aufweisen (z.B. Müller und Rabbitt, 1989).

Die Resultate deuten im Vergleich zu den Beobachtungen früherer Studien darauf hin, dass die Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Target einer Augenbewegung nicht so streng ist, wie bislang angenommen. Während eine räumliche Trennung von Aufmerksamkeitsfokus und Sakkadenziel nicht möglich scheint (z.B. Deubel und Schneider,

1996), zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass räumlich klar umgrenzte Aufmerksamkeitsverlagerungen vom Target einer GAF weg und auf einen peripheren Reiz zu während Smooth Pursuit ohne weiteres durchführbar sind. Und obwohl es zunächst den Anschein haben mag, spricht dieses Resultat auch nicht grundsätzlich gegen die Annahme einer Kopplung von visueller Aufmerksamkeit an das Pursuit-Target von Khurana und Kowler (1987), da die Probanden in deren Experimenten – ebenso wie in den oben beschriebenen Versuchen zum VKZG während GAF – weite Teile der Peripherie überwachen mussten. Wenn die Aufmerksamkeit hingegen nur auf einen eng begrenzten Bereich der Peripherie gelenkt werden soll, scheint dies auch während GAFs möglich zu sein, ohne dass damit Leistungseinbußen einhergehen müssen.

Neben der Tatsache, dass zwischen Sakkaden und GAFs Unterschiede existieren (siehe dazu beispielsweise die Befunde zum räumlichen Cueing), aber ebenso auch beträchtliche Gemeinsamkeiten bestehen (siehe z.B. die Resultate zum VKZG), zeigt diese Arbeit nach Ansicht der Verfasserin eines ganz deutlich: (Visuelle) Aufmerksamkeit ist ein extrem vielseitiges und vielschichtiges Konzept. Welche Schlüsse man über die Funktions- bzw. Arbeitsweise von visuell-räumlicher Aufmerksamkeit zieht, hängt in weiten Teilen von Dingen wie dem verwendeten experimentellen Design ab.

Nach wie vor existiert eine Vielzahl verschiedenster Definitionen des Begriffs Aufmerksamkeit. So erweckt ein Blick in die Literatur beinahe den Anschein, als ob jeder Wissenschaftler, der sich mit dem Konzept Aufmerksamkeit beschäftigt hat, auch gleichzeitig eine eigene Begriffsbestimmung mitliefere. Bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse werden dann jedoch gewöhnlich die Befunde weniger in Beziehung zur eigenen Definition von Aufmerksamkeit als vielmehr in einen stark verallgemeinernden Kontext gestellt. Nicht umsonst besteht wohl die einzige weitestgehend akzeptierte Definition des Konzepts Aufmerksamkeit in der recht vagen Annahme, dass Aufmerksamkeit die Verarbeitung bestimmter Reize gegenüber anderen Reizen fördert.

Wird nun das Zusammenspiel von visueller Aufmerksamkeit und Augenbewegungen untersucht, zeigt sich die Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse von den jeweiligen

Vorannahmen der Experimentatoren ganz deutlich. In der vorliegenden Arbeit sprechen beispielsweise die Ergebnisse zum VKZG während GAFs für eine Kopplung der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit an das Target der Augenfolgebewegung, zumindest auf der Reizdimension, die für eine richtige Antwort relevant ist (während das VKZG für die Position von peripheren Objekten während Pursuit beeinträchtigt ist, ist es das VKZG für die Farbe von Objekten nicht; während die Position eines Reizes während GAFs ein kritisches Attribut ist, ist es die Farbe in der Regel nicht). Die Befunde zum räumlichen Cueing hingegen zeigen, dass Aufmerksamkeitsverlagerungen auf räumlich eng umgrenzte periphere Positionen während Pursuit durchaus möglich sind. Die Annahme einer räumlichen Kopplung von Aufmerksamkeitsfokus und Augenbewegungsreiz ist also nur für ganz bestimmte experimentelle Paradigmen richtig. Die Verwendung anderer Aufgabentypen kann zu vollkommen verschiedenen Aussagen führen.

Eines ist vielleicht abschließend festzuhalten: Die Erschließung des Konzepts „visuelle Aufmerksamkeit“ wird sicher auch in Zukunft noch Gegenstand vieler Forschungsvorhaben sein. Einen ersten Beitrag zur Beantwortung der Frage, in welchem Zusammenhang visuelle Aufmerksamkeit und glatte Augenfolgebewegungen zueinander stehen, liefert jedoch schon diese Arbeit.

Des Weiteren ist noch einmal anzumerken, dass früher bei der Untersuchung glatter Augenfolgebewegungen hauptsächlich okulomotorische und mechanische Aspekte im Vordergrund standen, während das Interesse heute eher darauf gerichtet ist, wie visuelle Informationen durch glatte Augenfolgebewegungen beeinflusst werden. Insofern ist der Forschungsgegenstand dieser Arbeit ein vollkommen neuer. Welche Auswirkungen die Durchführung einer glatten Augenfolgebewegung auf die visuelle Aufmerksamkeit aber auch auf das visuelle Kurzzeitgedächtnis hat, ist bisher nicht empirisch untersucht worden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente liefern zu diesen beiden Punkten (visuelles Kurzzeitgedächtnis bzw. Aufmerksamkeit während Smooth Pursuit) daher eine Reihe interessanter und bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht berichteter Ergebnisse.

Literaturverzeichnis

- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control mechanisms. In K. W. Spence (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol. 2 (pp. 89-195). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Clarendon.
- Baddeley, A. D. (1997). *Human Memory* (Revised edn.). Hove, UK: Psychology Press.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working Memory. In G. A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation*, Vol. 8. New York: Academic Press.
- Baker, J. T., Harper, T. M. & Snyder, L. H. (2003). Spatial memory following shifts of gaze. I. Saccades to memorized world-fixed and gaze-fixed targets. *Journal of Neurophysiology*, 89(5), 2564-2576.
- Baloh, R. W., Yee, R. D., Honrubia, V. & Jacobson, K. (1988). A comparison of the dynamics of horizontal and vertical smooth pursuit in normal human subjects. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 59(2), 121-124.
- Barton, J. J., Sharpe, J. A. & Raymond, J. E. (1996). Directional defects in pursuit and motion perception in humans with unilateral cerebral lesions. *Brain*, 119 (Pt 5), 1535-1550.
- Bashinski, H. S. & Bacharach, V. R. (1980). Enhancement of perceptual sensitivity as the result of selectively attending to spatial locations. *Perception & Psychophysics*, 28(3), 241-248.
- Beauchamp, M. S., Cox, R. W. & DeYoe, E. A. (1997). Graded effects of spatial and featural attention on human area MT and associated motion processing areas. *Journal of Neurophysiology*, 78(1), 516-520.

- Becker, W. & Fuchs, A. F. (1985). Prediction in the oculomotor system: Smooth pursuit during transient disappearance of a visual target. *Experimental Brain Research*, 57(3), 562-575.
- Bekkering, H. & Neggers, S. F. (2002). Visual search is modulated by action intentions. *Psychological Science*, 13(4), 370-374.
- Bogousslavsky, J. & Meienberg, O. (1987). Eye-movement disorders in brain-stem and cerebellar stroke. *Archives of Neurology*, 44(2), 141-148.
- Braddick, O. J. (1980). Low-level and high-level processes in apparent motion. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Science*, 290(1038), 137-151.
- Brenner, E., Smeets, J. B. & van den Berg, A. V. (2001). Smooth eye movements and spatial localisation. *Vision Research*, 41(17), 2253-2259.
- Busey, T. A. & Loftus, G. R. (1994). Sensory and cognitive components of visual information acquisition. *Psychological Review*, 101(3), 446-469.
- Carlson-Radvansky, L. A. (1999). Memory for relational information across eye movements. *Perception & Psychophysics*, 61(5), 919-934.
- Carlson-Radvansky, L. A. & Irwin, D. E. (1995). Memory for structural information across eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning and Memory Cognition*, 21(6), 1441-1458.
- Carpenter, R. H. S. (1988). *Movements of the eye* (2nd ed.). London: Pion.
- Carrasco, M., Penpeci-Talgar, C. & Eckstein, M. (2000). Spatial covert attention increases contrast sensitivity across the CSF: Support for signal enhancement. *Vision Research*, 40(10-12), 1203-1215.
- Cavanagh, P. & Mather, G. (1989). Motion: The long and short of it. *Spatial Vision*, 4(2-3), 103-129.

- Churchland, M. M. & Lisberger, S. G. (2001). Experimental and computational analysis of monkey smooth pursuit eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 86(2), 741-759.
- Colby, C. L., Duhamel, J. R. & Goldberg, M. E. (1993). Ventral intraparietal area of the macaque: Anatomic location and visual response properties. *Journal of Neurophysiology*, 69(3), 902-914.
- Collewyn, H. & Tamminga, E. P. (1984). Human smooth and saccadic eye movements during voluntary pursuit of different target motions on different backgrounds. *Journal of Physiology*, 351, 217-250.
- Corbetta, M. (1998). Frontoparietal cortical networks for directing attention and the eye to visual locations: Identical, independent, or overlapping neural systems? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(3), 831-838.
- Corbetta, M. & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 201-215.
- Culham, J. C., Brandt, S. A., Cavanagh, P., Kanwisher, N. G., Dale, A. M. & Tootell, R. B. (1998). Cortical fMRI activation produced by attentive tracking of moving targets. *Journal of Neurophysiology*, 80(5), 2657-2670.
- de Brouwer, S., Missal, M. & Lefèvre, P. (2001). Role of retinal slip in the prediction of target motion during smooth and saccadic pursuit. *Journal of Neurophysiology*, 86(2), 550-558.
- Deubel, H. & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, 36(12), 1827-1837.
- Dodge, R. (1903). Five types of eye movement in the horizontal plane in the field of regard. *American Journal of Physiology*, 8, 307-329.

- Downing, C. J. (1988). Expectancy and visual-spatial attention: Effects on perceptual quality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(2), 188-202.
- Eriksen, C. W. & Colegate, R. L. (1971). Selective attention and serial processing in briefly presented visual displays. *Perception & Psychophysics*, 10, 321-326.
- Eriksen, C. W. & Hoffman, J. E. (1972). Temporal and spatial characteristics of selective encoding from visual displays. *Perception & Psychophysics*, 12, 201-204.
- Eriksen, C. W. & St James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 40(4), 225-240.
- Findlay, J. M. & Gilchrist, I. D. (2003). *Active vision: The psychology of looking and seeing*. Oxford: Oxford University Press.
- Ferrera, V. P. & Lisberger, S. G. (1995). Attention and target selection for smooth pursuit eye movements. *Journal of Neuroscience*, 15(11), 7472-7484.
- Ferrera, V. P. & Lisberger, S. G. (1997a). The effects of a moving distractor on the initiation of smooth-pursuit eye movements. *Visual Neuroscience*, 14, 323-338.
- Ferrera, V. P. & Lisberger, S. G. (1997b). Neuronal responses in visual areas MT and MST during smooth pursuit target selection. *Journal of Neurophysiology*, 78(3), 1433-1446.
- Fischer, M. H. (1999). An investigation of attention allocation during sequential eye movement tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 52A(3), 649-677.
- Flipse, J. P., van der Wildt, G. J., Rodenburg, M., Keemink, C. J. & Knol, P. G. (1988). Contrast sensitivity for oscillating sine wave gratings during ocular fixation and pursuit. *Vision Research*, 28(7), 819-826.

- Folk, C. L., Remington, R. W. & Wright, J. H. (1994). The structure of attentional control: Contingent attentional capture by apparent motion, abrupt onset, and color. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(2), 317-329.
- Ganel, T. & Goodale, M. A. (2003). Visual control of action but not perception requires analytical processing of object shape. *Nature*, 426(6967), 664-667.
- Gellman, R. S. & Fletcher, W. A. (1992). Eye position signals in human saccadic processing. *Experimental Brain Research*, 89(2), 425-434.
- Germeys, F., De Graef, P., Panis, P., Van Eccelpoel, C. & Verfaillie, K. (2004). Transsaccadic integration of bystander locations. *Visual Cognition*, 11(2/3), 203-234.
- Hanson, M. R., Hamid, M. A., Tomsak, R. L., Chou, S. S. & Leigh, R. J. (1986). Selective saccadic palsy caused by pontine lesions: Clinical, physiological, and pathological correlations. *Annals of Neurology*, 20(2), 209-217.
- Heidenreich, S. M. & Turano, K. A. (1996). Speed discrimination under stabilized and normal viewing conditions. *Vision Research*, 36(12), 1819-1825.
- Henderson, J. M. (1992). Visual attention and eye movement control during reading and picture viewing. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements and visual cognition* (pp. 261-283). Berlin: Springer.
- Hoffman, J. E. & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 57(6), 787-795.
- Ilg, U. J. (1997). Slow eye movements. *Progress in Neurobiology*, 53(3), 293-329.
- Irwin, D. E. (1991). Information integration across saccadic eye movements. *Cognitive Psychology*, 23(3), 420-456.
- Irwin, D. E. (1992). Memory for position and identity across eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2), 307-317.

- Irwin, D. E., Yantis, S. & Jonides, J. (1983). Evidence against visual integration across saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 34(1), 49-57.
- Irwin, D. E., Zacks, J. L. & Brown, J. S. (1990). Visual memory and the perception of a stable visual environment. *Perception & Psychophysics*, 47(1), 35-46.
- Irwin, D. E. & Zelinsky, G. J. (2002). Eye movements and scene perception: Memory for things observed. *Perception & Psychophysics*, 64(6), 882-895.
- Jiang, Y., Olson, I. R. & Chun, M. M. (2000). Organization of visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26(3), 683-702.
- Jonides, J. (1981). Voluntary versus automatic control over the mind's eye. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX* (pp. 187-203). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Kathmann, N., Hochrein, A. & Uwer, R. (1999). Effects of dual task demands on the accuracy of smooth pursuit eye movements. *Psychophysiology*, 36(2), 158-163.
- Keller, E. L. & Heinen, S. J. (1991). Generation of smooth-pursuit eye movements: Neuronal mechanisms and pathways. *Neuroscience Research*, 11(2), 79-107.
- Kerzel, D. (2000). Eye movements and visible persistence explain the mislocalization of the final position of a moving target. *Vision Research*, 40(27), 3703-3715.
- Kerzel, D. & Gegenfurtner, K. R. (2003). Neuronal processing delays are compensated in the sensorimotor branch of the visual system. *Current Biology*, 13(22), 1975-1978.
- Kerzel, D., & Ziegler, N. E. (2005). Visual short-term memory during smooth pursuit eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(2), 354-372.

- Khurana, B. & Kowler, E. (1987). Shared attentional control of smooth eye movement and perception. *Vision Research*, 27(9), 1603-1618.
- Kinchla, R. A. (1992). Attention. *Annual Review of Psychology*, 43, 711-742.
- Klein, R. (1980). Does oculomotor readiness mediate cognitive control of visual attention? In R. S. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance VIII*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B. & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision Research*, 35(13), 1897-1916.
- Krauskopf, J., Williams, D. R. & Heeley, D. W. (1982). Cardinal directions of color space. *Vision Research*, 22(9), 1123-1131.
- Krauzlis, R. J. (2004). Recasting the smooth pursuit eye movement system. *Journal of Neurophysiology*, 91(2), 591-603.
- Krauzlis, R. J. & Lisberger, S. G. (1994). A model of visually-guided smooth pursuit eye movements based on behavioral observations. *Journal of Computational Neuroscience*, 1(4), 265-283.
- Krauzlis, R. J. & Miles, F. A. (1996). Release of fixation for pursuit and saccades in humans: Evidence for shared inputs acting on different neural substrates. *Journal of Neurophysiology*, 76(5), 2822-2833.
- Krauzlis, R. J. & Stone, L. S. (1999). Tracking with the mind's eye. *Trends in Neurosciences*, 22(12), 544-550.
- LaBerge, D. & Brown, V. (1989). Theory of attentional operations in shape identification. *Psychological Review*, 96, 101-124.
- Levy, J. & Pashler, H. (2001). Is dual-task slowing instruction dependent? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(4), 862-869.

- Lisberger, S. G., Evinger, C., Johanson, G. W. & Fuchs, A. F. (1981). Relationship between eye acceleration and retinal image velocity during foveal smooth pursuit in man and monkey. *Journal of Neurophysiology*, 46(2), 229-249.
- Lisberger, S. G., Morris, E. J. & Tychsen, L. (1987). Visual motion processing and sensory-motor integration for smooth pursuit eye movements. *Annual Review of Neuroscience*, 10, 97-129.
- Lisberger, S. G. & Westbrook, L. E. (1985). Properties of visual inputs that initiate horizontal smooth pursuit eye movements in monkeys. *Journal of Neuroscience*, 5(6), 1662-1673.
- Long, G. M. & Homolka, J. L. (1992). Contrast sensitivity during horizontal visual pursuit: Dynamic sensitivity functions. *Perception*, 21(6), 753-764.
- MacAvoy, M. G., Gottlieb, J. P. & Bruce, C. J. (1991). Smooth-pursuit eye movement representation in the primate frontal eye field. *Cerebral Cortex*, 1(1), 95-102.
- Mack, A. & Herman, E. (1973). Position constancy during pursuit eye movement: An investigation of the Filehne illusion. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25(1), 71-84.
- Macmillan, N. A. & Creelman, C. D. (1991). *Detection theory: A user's guide*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mateeff, S., Yakimoff, N. & Dimitrov, G. (1981). Localization of brief visual stimuli during pursuit eye movements. *Acta Psychologica*, 48(1-sup-3), 133-140.
- Melcher, D. & Morrone, M. C. (2003). Spatiotopic temporal integration of visual motion across saccadic eye movements. *Nature Neuroscience*, 6(8), 877-881.
- Meyer, C. H., Lasker, A. G. & Robinson, D. A. (1985). The upper limit of human smooth pursuit velocity. *Vision Research*, 25(4), 561-563.

- Meyer, D. E. & Kieras, D. E. (1999). Précis to a practical unified theory of cognition and action: Some lessons from EPIC computational models of human multiple-task performance. In D. Gopher & A. Koriat (Eds.), *Attention and performance XVII: Cognitive regulation of performance: Interaction of theory and application. Attention and performance* (pp. 17-88). Cambridge, MA, USA: The Mit Press.
- Mitrani, L. & Mateeff, S. (1981). Localization of brief light stimuli on differently labelled reference patterns during smooth eye tracking. *Acta Physiologica et Pharmacologica Bulgarica*, 7(2), 19-24.
- Morgan, M. J., Findlay, J. M. & Watt, R. J. (1982). Aperture viewing: A review and a synthesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 34(2), 211-233.
- Morris, E. J. & Lisberger, S. G. (1987). Different responses to small visual errors during initiation and maintenance of smooth-pursuit eye movements in monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 58(6), 1351-1369.
- Müller, H. J. & Findlay, J. M. (1988). The effect of visual attention on peripheral discrimination thresholds in single and multiple element displays. *Acta Psychologica*, 69(2), 129-155.
- Müller, H. J. & Rabbitt, P. M. (1989). Reflexive and voluntary orienting of visual attention: Time course of activation and resistance to interruption. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(2), 315-330.
- Müller, H. J., Reimann, B. & Krummenacher, J. (2003). Visual search for singleton feature targets across dimensions: Stimulus- and expectancy-driven effects in dimensional weighting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(5), 1021-1035.
- Müsseler, J. & Prinz, W. (Hrsg.). (2002). *Allgemeine Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

- Murphy, B. J. (1978). Pattern thresholds for moving and stationary gratings during smooth eye movement. *Vision Research*, 18(5), 521-530.
- Newsome, W. T., Wurtz, R. H. & Komatsu, H. (1988). Relation of cortical areas MT and MST to pursuit eye movements. II. Differentiation of retinal from extraretinal inputs. *Journal of Neurophysiology*, 60(2), 604-620.
- Nickerson, R. S. (1965). Short-term memory for complex meaningful visual configurations: A demonstration of capacity. *Canadian Journal of Psychology*, 19, 155-160.
- Norman, D. A. & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- Palmer, J. (1994). Set-size effects in visual search: The effect of attention is independent of the stimulus for simple tasks. *Vision Research*, 34(13), 1703-1721.
- Pashler, H. (1988). Familiarity and visual change detection. *Perception & Psychophysics*, 44(4), 369-378.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220-244.
- Pashler, H. (Ed.). (1998). *Attention*. Hove, UK: Psychology Press.
- Petit, L., Clark, V. P., Ingeholm, J. & Haxby, J. V. (1997). Dissociation of saccade-related and pursuit-related activation in human frontal eye fields as revealed by fMRI. *Journal of Neurophysiology*, 77(6), 3386-3390.
- Phillips, W. A. (1974). On the distinction between sensory storage and short-term visual memory. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 283-290.
- Phillips, W. A. & Baddeley, A. D. (1971). Reaction time and short-term visual memory. *Psychonomic Science*, 22, 73-74.

- Pola, J. & Wyatt, H. J. (1980). Target position and velocity: The stimuli for smooth pursuit eye movements. *Vision Research*, 20(6), 523-534.
- Pola, J. & Wyatt, H. J. (1991). Smooth pursuit: Response characteristics, stimuli and mechanisms. In R. H. S. Carpenter (Ed.), *Eye Movements* (Vol. 8, pp. 138-157). London, UK: Macmillan Press Ltd.
- Pola, J. & Wyatt, H. J. (1997). Offset dynamics of human smooth pursuit eye movements: Effects of target presence and subject attention. *Vision Research*, 37(18), 2579-2595.
- Pola, J. & Wyatt, H. J. (2001). The role of target position in smooth pursuit deceleration and termination. *Vision Research*, 41(5), 655-669.
- Pollatsek, A., Rayner, K. & Henderson, J. M. (1990). Role of spatial location in integration of pictorial information across saccades. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(1), 199-210.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3-25.
- Posner, M. I., Boies, S. J., Eichelman, W. H. & Taylor, R. L. (1969). Retention of visual and name codes of single letters. *Journal of Experimental Psychology*, 79, 1-16.
- Posner, M. I. & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & D. G. Bouwhuis (Eds.), *Attention and Performance X*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Posner, M. I., Snyder, C. R. & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109(2), 160-174.
- Rashbass, C. (1961). The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements. *Journal of Physiology*, 159, 326-338.
- Rayner, K., McConkie, G. W. & Zola, D. (1980). Integrating information across eye movements. *Cognitive Psychology*, 12(2), 206-226.

- Remington, R. W. (1980). Attention and saccadic eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6(4), 726-744.
- Rizzolatti, G. (1983). Mechanisms of selective attention in mammals. In J. P. Ewert, R. R. Capranica & D. J. Ingle (Eds.), *Advances in the vertebrate neuroethology* (pp. 261-297). London: Plenum Press.
- Rizzolatti, G. & Camarda (1987a). Neural circuits for spatial attention and unilateral neglect. In M. Jeannerod (Ed.), *Neurophysiological and neuropsychological aspects of spatial neglect* (pp. 289-313). Amsterdam: North Holland.
- Rizzolatti, G., Riggio, L., Dascola, I. & Umiltà, C. (1987b). Reorienting attention across the horizontal and vertical meridians: Evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia*, 25(1A), 31-40.
- Rizzolatti, G., Riggio, L. & Sheliga, B. M. (1994). Space and selective attention. In C. Umiltà & M. Moscovitch (Eds.), *Attention and performance XV*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Robinson, D. A. (1965). The mechanics of human smooth pursuit eye movement. *Journal of Physiology*, 180(3), 569-591.
- Robinson, D. A., Gordon, J. L., & Gordon, S. E. (1986). A model of the smooth pursuit eye movement system. *Biological Cybernetics*, 55(1), 43-57.
- Ross, J., Morrone, M. C., Goldberg, M. E. & Burr, D. C. (2001). Changes in visual perception at the time of saccades. *Trends in Neurosciences*, 24(2), 113-121.
- Salzman, C. D. & Newsome, W. T. (1994). Neural mechanisms for forming a perceptual decision. *Science*, 264(5156), 231-237.
- Schlag, J. & Schlag-Rey, M. (2002). Through the eye, slowly: Delays and localization errors in the visual system. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 191-215.

- Schneider, W. X. (1993). Space-based visual attention models and object selection: Constraints, problems, and possible solutions. *Psychological Research*, 56(1), 35-43.
- Seidemann, E. & Newsome, W. T. (1999). Effect of spatial attention on the responses of area MT neurons. *Journal of Neurophysiology*, 81(4), 1783-1794.
- Shaw, M. L. (1982). Attending to multiple sources of information. *Cognitive Psychology*, 14, 353-409.
- Sheliga, B. M., Craighero, L., Riggio, L. & Rizzolatti, G. (1997). Effects of spatial attention on directional manual and ocular responses. *Experimental Brain Research*, 114(2), 339-351.
- Sheliga, B. M., Riggio, L., Craighero, L. & Rizzolatti, G. (1995a). Spatial attention-determined modifications in saccade trajectories. *Neuroreport*, 6(3), 585-588.
- Sheliga, B. M., Riggio, L. & Rizzolatti, G. (1994). Orienting of attention and eye movements. *Experimental Brain Research*, 98(3), 507-522.
- Sheliga, B. M., Riggio, L. & Rizzolatti, G. (1995b). Spatial attention and eye movements. *Experimental Brain Research*, 105(2), 261-275.
- Shepherd, M., Findlay, J. M. & Hockey, R. J. (1986). The relationship between eye movements and spatial attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, Section A*, 38(3), 475-491.
- Shi, D., Friedman, H. R. & Bruce, C. J. (1998). Deficits in smooth-pursuit eye movements after muscimol inactivation within the primate's frontal eye field. *Journal of Neurophysiology*, 80(1), 458-464.
- Simons, D. J. (1996). In sight, out of mind: When object representations fail. *Psychological Science*, 7(5), 301-305.

- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74(11), 2-29.
- Sperling, G. (1963). A model for visual memory tasks. *Human Factors*, 5, 19-31.
- Sperling, G. & Doshier, B. A. (1986). Strategy and optimization in human information processing. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance*, Vol. 1, *Sensory processes and perception* (Chap. 2). New York: Wiley.
- Sun, J.-S. & Irwin, D. E. (1987). Retinal masking during pursuit eye movements: Implications for spatiotopic visual persistence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(1), 140-145.
- Tanaka, M., Yoshida, T. & Fukushima, K. (1998). Latency of saccades during smooth-pursuit eye movement in man. Directional asymmetries. *Experimental Brain Research*, 121(1), 92-98.
- Treisman, A. (1988). Features and objects: The fourteenth Bartlett memorial lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, Section A*, 40(2), 201-237.
- Treue, S. & Martinez-Trujillo, J. C. (1999). Feature-based attention influences motion processing gain in macaque visual cortex. *Nature*, 399(6736), 575-579.
- Treue, S. & Maunsell, J. H. (1996). Attentional modulation of visual motion processing in cortical areas MT and MST. *Nature*, 382(6591), 539-541.
- Turvey, M. T. (1973). On peripheral and central processes in vision: Inferences from an information-processing analysis of masking with patterned stimuli. *Psychological Review*, 80, 1-52.
- Umiltà, C., Riggio, L., Dascola, I. & Rizzolatti, G. (1991). Differential effects of central and peripheral cues on the reorienting of spatial attention. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3, 247-267.

- van der Heijden, A. H. C. (1992). *Selective attention in vision*. London: Routledge.
- van Donkelaar, P. (1999). Spatiotemporal modulation of attention during smooth pursuit eye movements. *Neuroreport*, 10(12), 2523-2526.
- van Donkelaar, P. & Drew, A. S. (2002). The allocation of attention during smooth pursuit eye movements. *Progress in Brain Research*, 140, 267-277.
- van Gelder, P., Lebedev, S., Liu, P. M. & Tsui, W. H. (1995). Anticipatory saccades in smooth pursuit: Task effects and pursuit vector after saccades. *Vision Research*, 35(5), 667-678.
- Wolfe, J. M. & Cave, K. R. (1990). Deploying visual attention: The guided search model. In Blake, A. & Troscianko, T. (Eds.), *AI and the eye* (pp. 79-103). New York: John Wiley and Sons.
- Wyatt, H. J., Pola, J., Fortune, B. & Posner, M. (1994). Smooth pursuit eye movements with imaginary targets defined by extrafoveal cues. *Vision Research*, 34(6), 803-820.
- Yeshurun, Y. & Carrasco, M. (1998). Attention improves or impairs visual performance by enhancing spatial resolution. *Nature*, 396(6706), 72-75.
- Zeki, S., Watson, J. D. G., Lueck, C. J., Friston, K. J., Kennard, C. & Frackowiak, R. S. J. (1991). A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 11(3), 641-649.

Anhang A

Anhang A. Smooth Pursuit-Gain, augenblickliche Geschwindigkeit des Auges (nachdem die Target-Geschwindigkeit subtrahiert worden ist) und Standardabweichung (SD) der Augenposition relativ zur Target-Position für jedes Experiment und jede experimentelle Bedingung

	Bedingung	Pursuit-Gain	Augenblickliche Geschwindigkeit (Winkelgrad/s)	SD der Augenposition (Winkelgrad ²)
Exp. 1a (All-Items)	Fixation	--	3.09 ± 30.25	0.06 ± 0.51
	Stationäres Bild	0.91 ± 1.98	7.89 ± 32.45	0.23 ± 2.71
	Bewegtes Bild	0.99 ± 1.20	7.38 ± 31.42	0.17 ± 2.09
	Blank-Trials	0.97 ± 1.28	7.31 ± 33.04	0.16 ± 1.73
Exp. 1a (Single-Item)	Fixation	--	3.51 ± 16.79	0.06 ± 0.67
	Stationäres Bild	0.93 ± 2.68	8.52 ± 30.34	0.24 ± 4.05
	Bewegtes Bild	0.99 ± 1.46	7.99 ± 23.58	0.17 ± 2.33
	Blank-Trials	0.97 ± 1.47	8.05 ± 24.76	0.18 ± 2.21
Exp. 1b	Fixation	--	3.79 ± 16.55	0.08 ± 0.95
	Zentrales Testbild	0.96 ± 1.20	11.01 ± 28.00	0.33 ± 3.80
	Exzentrisches Testbild	0.95 ± 1.04	10.96 ± 21.01	0.33 ± 3.89
	Blank-Trials	0.93 ± 1.92	10.92 ± 26.82	0.32 ± 4.22
Exp. 1c	Fixation	--	3.79 ± 21.83	0.07 ± 0.87
	Bewegtes Testbild	0.94 ± 1.56	10.51 ± 37.01	0.25 ± 2.49
	Exzentrisches Testbild	0.94 ± 1.46	10.56 ± 32.64	0.25 ± 1.70
	Blank-Trials	0.94 ± 1.34	10.61 ± 37.05	0.24 ± 2.13
Exp. 1d	Fixation	--	2.87 ± 23.52	0.02 ± 0.10
	Aufgeblitztes Bild	0.98 ± 1.13	7.08 ± 46.34	0.07 ± 0.64
	Blank-Trials	0.98 ± 1.16	7.05 ± 38.21	0.06 ± 0.47
Exp. 2	Fixation	--	3.32 ± 25.21	0.07 ± 0.44
	Bewegtes Bild	1.00 ± 0.80	7.39 ± 28.94	0.13 ± 0.69
	Blank-Trials	0.99 ± 0.83	7.51 ± 31.16	0.13 ± 0.91
Exp. 3	Fixation	--	3.71 ± 14.73	0.09 ± 0.82
	Stationäres Bild	0.94 ± 2.54	8.30 ± 14.33	0.22 ± 2.80
	Blank-Trials	0.97 ± 2.08	7.98 ± 14.56	0.18 ± 2.55
Exp. 4	Fixation	--	2.99 ± 17.15	0.05 ± 0.27
	Stationäres Bild	0.94 ± 2.13	7.98 ± 34.25	0.22 ± 3.28
	Bewegtes Bild	0.99 ± 1.10	7.35 ± 22.71	0.16 ± 1.65
	Blank-Trials	0.98 ± 1.38	7.58 ± 27.72	0.17 ± 1.94
Exp. 5	Fixation	--	3.01 ± 9.89	0.06 ± 0.45
	Stationäres Bild	0.94 ± 2.59	8.25 ± 17.91	0.22 ± 1.34
	Bewegtes Bild	0.99 ± 1.72	7.56 ± 14.70	0.16 ± 1.12
	Blank-Trials	0.97 ± 1.88	7.89 ± 15.02	0.18 ± 1.37
Exp. 6	4 °/s Stationäres Bild	0.99 ± 2.24	4.66 ± 17.67	0.12 ± 1.01
	4 °/s Bewegtes Bild	0.97 ± 1.49	4.71 ± 22.40	0.11 ± 0.86
	4 °/s Blank-Trials	0.97 ± 2.57	4.56 ± 16.97	0.10 ± 0.73
	11 °/s Stationäres Bild	0.98 ± 1.42	8.28 ± 22.50	0.20 ± 1.54
	11 °/s Bewegtes Bild	0.99 ± 1.35	7.99 ± 21.59	0.16 ± 1.17
	11 °/s Blank-Trials	0.99 ± 1.30	8.09 ± 17.87	0.16 ± 1.13
	23 °/s Stationäres Bild	0.95 ± 1.14	12.25 ± 31.65	0.29 ± 2.45
	23 °/s Bewegtes Bild	0.98 ± 1.40	11.77 ± 30.59	0.25 ± 1.71
	23 °/s Blank-Trials	0.97 ± 1.42	11.43 ± 36.31	0.23 ± 2.45

Anmerkung. Die Mittelwerte und die Standardschätzfehler (zwischen Versuchspersonen) sind in dem Format $M \pm SE * 10^2$ angegeben. Die Indices wurden für ein Intervall von 400 ms berechnet (mit Ausnahme von Experiment 1d, in dem 50ms vor und nach dem Aufblitzen des Bildes benutzt wurden). Exp. = Experiment

Anhang B

Anhang B. Mittlerer Prozentsatz der Trials, in denen eine Sakkade während der Präsentation des Gedächtnisbildes aufgetreten ist sowie die mittlere Anzahl der Sakkaden, die mittlere Dauer der Sakkaden und die mittlere Amplitude der Sakkaden für die Trials, in denen eine Sakkade aufgetreten ist

Experiment und Bedingung	Prozentsatz der Trials	Anzahl der Sakkaden	Dauer der Sakkaden (ms)	Amplitude der Sakkaden (Winkelgrad)
Exp. 1a (All-Items)				
Fixation	0.06 ± 1.93	1.27 ± 11.65	22 ± 301	0.53 ± 8.20
Stationäres Bild	0.55 ± 5.80	1.10 ± 2.39	20 ± 80	0.92 ± 5.66
Bewegtes Bild	0.33 ± 4.53	1.13 ± 4.25	19 ± 125	0.76 ± 7.18
Exp. 1a (Single-Item)				
Fixation	0.07 ± 2.46	1.23 ± 11.07	20 ± 215	0.51 ± 10.25
Stationäres Bild	0.50 ± 6.06	1.12 ± 3.16	21 ± 98	0.94 ± 8.29
Bewegtes Bild	0.30 ± 4.53	1.13 ± 2.94	19 ± 109	0.66 ± 5.91
Exp. 1b Fixation	0.10 ± 3.25	1.09 ± 4.55	18 ± 107	0.45 ± 8.44
Zentrales Testbild	0.64 ± 5.14	1.17 ± 3.85	22 ± 110	1.04 ± 7.34
Exzentrisches Testbild	0.60 ± 4.14	1.17 ± 3.14	23 ± 131	1.07 ± 8.32
Exp. 1c Fixation	0.06 ± 1.64	1.07 ± 4.02	17 ± 90	0.70 ± 21.41
Bewegtes Testbild	0.57 ± 5.33	1.17 ± 4.13	21 ± 135	0.92 ± 6.27
Exzentrisches Testbild	0.66 ± 4.08	1.12 ± 2.65	20 ± 103	0.90 ± 6.55
Exp. 2 Fixation	0.08 ± 1.92	1.13 ± 4.82	16 ± 128	0.36 ± 3.84
Bewegtes Bild	0.34 ± 4.93	1.07 ± 2.42	16 ± 50	0.59 ± 2.32
Exp. 3 Fixation	0.10 ± 2.33	1.03 ± 1.33	17 ± 70	0.52 ± 6.83
Stationäres Bild	0.53 ± 6.61	1.09 ± 1.91	19 ± 102	0.82 ± 7.12
Exp. 4 Fixation	0.03 ± 0.85	1.13 ± 4.82	18 ± 194	0.41 ± 3.51
Stationäres Bild	0.48 ± 7.37	1.11 ± 2.00	20 ± 92	0.91 ± 10.01
Bewegtes Bild	0.27 ± 5.04	1.05 ± 1.29	17 ± 66	0.60 ± 4.97
Exp. 5 Fixation	0.05 ± 1.51	1.11 ± 4.66	17 ± 160	0.42 ± 7.61
Stationäres Bild	0.59 ± 7.25	1.08 ± 2.05	19 ± 62	0.86 ± 3.90
Bewegtes Bild	0.36 ± 5.28	1.07 ± 1.51	17 ± 48	0.70 ± 3.61
Exp. 6 Stationäres Bild	0.47 ± 5.89	1.11 ± 1.79	21 ± 35	1.01 ± 4.01
Bewegtes Bild	0.33 ± 2.66	1.13 ± 4.44	20 ± 103	0.81 ± 5.12

Anmerkung. Die Mittelwerte und die Standardschätzfehler (zwischen Versuchspersonen) sind in dem Format $M \pm SE * 10^2$ angegeben. In den Fixationsbedingungen machten bis zu drei Versuchsteilnehmer keinerlei Sakkaden. Exp. = Experiment

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Gießen, den 05.10.2005
