

Gisela Müller-Plath: Formale Modellierung visueller Suchstrategien: Mit Anwendungen bei der Lokalisation von Hirnfunktionen und in der Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen. Leipzig: Max Planck Institute of Cognitive Neuroscience, 2000 (MPI Series in Cognitive Neuroscience; 9)

**Formale Modellierung visueller Suchstrategien
mit Anwendungen bei der Lokalisation von Hirnfunktionen
und in der Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen**

Von der Fakultät für Biowissenschaften, Pharmazie und Psychologie
der Universität Leipzig
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium
Dr. rer. nat.

vorgelegt
von Dipl. Psych. Gisela Müller-Plath
geboren am 25. September 1963 in Hamburg

Dekan:
Prof. Dr. Kurt Eger

Gutachter:
Prof. Dr. Hermann J. Müller
Prof. Dr. D. Yves von Cramon
Prof. Dr. Rainer Mausfeld

Inhaltsverzeichnis

<u>Kapitel 1</u> Einleitung: Visuelle Suche und Aufmerksamkeit	5
1.1 Visuelle Suche als experimentelles Paradigma	5
1.2 Zum Begriff der Aufmerksamkeit	7
1.3 Ziel der Arbeit	10
<u>Kapitel 2</u> Theoretischer Hintergrund.....	11
2.1 Formale Modelle der visuellen Suche.....	12
2.1.1 Das einfache serielle Modell	12
2.1.2 TREISMANS „Feature Integration Theory“ (FIT).....	13
2.1.3 WOLFES „Guided Search“-Modell.....	16
2.1.4 Das SERR-Modell von HUMPHREYS & MÜLLER	20
2.1.5 GROSSBERGS SOS-Modell.....	23
2.2 Aktuelle Forschungsfragen	26
<u>Kapitel 3</u> Fragestellung	29
3.1 Präzisierung der Zielsetzung.....	29
3.2 Probleme der traditionellen Reaktionszeitanalyse.....	30
<u>Kapitel 4</u> Reaktionszeitmodelle: Grundidee und erste Modellvariante	32
4.1 Reaktionszeitmodelle der visuellen Suche.....	32
4.1.1 Grundidee	32
4.1.2 Geltungsbereich.....	33
4.1.3 Offene und verdeckte Aufmerksamkeit.....	35
4.2 Erste Modellvariante	35
4.2.1 Modellannahmen	36
4.2.2 Modellgleichungen.....	41
4.2.3 Zusammenfassung der Modellparameter.....	44
4.3 Modelltest: Experiment 1	45
4.3.1 Methode.....	45
4.3.2 Ergebnisse	47
4.3.3 Diskussion	53
<u>Kapitel 5</u> Alternative Modellvarianten.....	55
5.1 Variationen der Modellannahmen und –gleichungen.....	55

5.2	Modellvergleich: Experiment 2.....	57
5.2.1	Methode.....	58
5.2.2	Ergebnisse	60
5.2.3	Diskussion	66
<u>Kapitel 6</u> Validität des Modells und der Parameterwerte.....		71
6.1	Allgemeine Überlegungen.....	71
6.2	Validierung der Reichweite der Aufmerksamkeit: Experiment 3.....	72
6.2.1	Methode.....	73
6.2.2	Ergebnisse	76
6.2.3	Diskussion	79
<u>Kapitel 7</u> Der Einfluss von Augenbewegungen auf die Gültigkeit des Modells.....		81
7.1	Fragestellung und Hypothesen.....	81
7.2	Experiment 4	83
7.2.1	Methode.....	83
7.2.2	Ergebnisse	84
7.2.3	Diskussion	87
<u>Kapitel 8</u> Zur Lokalisation von Hirnfunktionen bei visuellen Suchstrategien:		
<i>Ein Experiment mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT)</i>		90
8.1	Grundlagen der funktionellen Magnetresonanztomographie.....	91
8.1.1	Physikalische Grundlagen	91
8.1.2	Physiologische Grundlagen.....	92
8.1.3	Zur Frage des Zusammenhanges von neuronaler Aktivität und BOLD-Signal.....	92
8.2	Neuroanatomische Korrelate visueller Suchstrategien: Literaturüberblick	95
8.3	fMRT-Experiment.....	103
8.3.1	Methode.....	104
8.3.2	Hypothesen.....	110
8.3.3	Ergebnisse	113
8.4	Diskussion	122

<u>Kapitel 9</u> Klinische Anwendung des Reaktionszeitmodells: Differentialdiagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen bei hirngeschädigten Patienten.....	126
9.1 Fragestellung	126
9.2 Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit bei hirngeschädigten Patienten: Literaturüberblick	127
9.2.1 Diagnostische Verfahren	127
9.2.2 Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit bei Hirnschädigungen	128
9.3 Das Reaktionszeitmodell als diagnostisches Instrument zur Spezifizierung von Aufmerksamkeitsstörungen: Klinische Studie.....	132
9.3.1 Methode.....	133
9.3.2 Ergebnisse	140
9.3.3 Diskussion	145
<u>Kapitel 10</u> Zusammenfassung	153
Anhang: Mathematische Berechnungen zur Modellierung	159
Literaturverzeichnis	167

Kapitel 1

Einleitung: Visuelle Suche und Aufmerksamkeit

Die visuelle Suche ist jedem aus dem Alltag bekannt. Häufig sucht man nach Merkmalen oder Objekten in seiner Umgebung, wie beispielsweise dem Schlüsselbund in der Wohnung, dem eigenen Auto auf dem Parkplatz oder einer bestimmten Person in einer Menschenmenge. Visuelles Suchen kommt in verschiedensten Ausprägungen vor und dient unterschiedlichen Handlungszielen. Die Suche kann einfacher oder schwieriger sein, je nachdem, wie sehr sich das gesuchte Objekt von seiner Umgebung abhebt, und wie stark sich die umgebenden Objekte voneinander abheben. So ist es leichter, eine Person mit einer auffällig gefärbten Jacke in einer Menschenmenge zu entdecken als eine unauffällig gekleidete Person, und es wird noch einfacher, je unauffälliger und einander ähnlicher die anderen Menschen gekleidet sind. Das Gleiche gilt für die wohl jedem bekannten Erfahrungen, sein Auto auf einem großen Parkplatz oder seinen Koffer auf dem Gepäckband am Flughafen aufzufinden. Je nach Schwierigkeit der Suche verlangt sie mehr oder weniger Aufmerksamkeitszuwendung: Während man die Butter auf dem Frühstückstisch in der Regel nebenbei, ohne das Gespräch zu unterbrechen, finden und greifen kann, verlangt die Suche einer bestimmten Joghurtsorte im Regal des Supermarktes die volle Aufmerksamkeit. Entsprechend variieren die für die Suche benötigte Zeit und die Fehleranfälligkeit. Einen weiteren Unterschied macht es, ob das Aussehen des gesuchten Objektes, und eventuell sogar das der umgebenden Objekte, einem genau bekannt ist, oder ob lediglich nach einem bestimmten visuellen Merkmal („Guck mal, was ist das rote Ding da?“) oder überhaupt nur nach einer Auffälligkeit in der visuellen Szene („Was ist das da hinten?“) gesucht wird.

1.1 Visuelle Suche als experimentelles Paradigma

In der experimentellen Psychologie wird die visuelle Suche als beliebtes Paradigma zur Erforschung der visuellen Aufmerksamkeit verwendet. Ein typisches Experiment ist das Folgende: Die Versuchsperson bekommt wiederholt Suchbilder dargeboten, auf denen mehrere Objekte zu sehen sind. Sie soll unter diesen Objekten („Ablenkerobjekten“) ein bestimmtes „Zielobjekt“ suchen und entscheiden, ob es im Suchbild vorhanden ist. Letzteres ist nur in einem Teil (meist der Hälfte) der Durchgänge der Fall. Im Wesentlichen sind zwei Varianten dieses Paradigmas verbreitet. In der ersten wird das Suchbild nur für einen kurzen Moment (tachistoskopisch) dargeboten. Ausgewertet wird dann, wie hoch der Anteil richtig beantworteter

Durchgänge war, und es wird versucht, diese Zahl zu Eigenschaften des Suchbildes in Beziehung zu setzen. In der anderen Variante ist die Darbietung des Suchbildes zeitlich nicht begrenzt, allerdings soll die Versuchsperson ihre Entscheidung so schnell wie möglich treffen. Ausgewertet wird hier primär die Reaktionszeit¹ in Abhängigkeit von Merkmalen des Suchbildes, und die Fehlerrate dient lediglich zur Validitätskontrolle. Eine andere Variation des Paradigmas besteht darin, ob das Zielobjekt der Versuchsperson bekannt ist („target search“), oder ob sie lediglich nach einem abweichenden Objekt suchen soll („singleton search“). Bei Mischformen kennt die Versuchsperson beispielsweise die perzeptuelle Dimension, in der sich das Zielobjekt von den Ablenkerobjekten unterscheidet (z.B. Farbe, Größe, ...), nicht jedoch dessen genaues Aussehen, welches von einem Durchgang zum anderen verändert wird. Eine dritte Variation des Paradigmas liegt in der Restringierung von Augenbewegungen: Die Versuchspersonen dürfen entweder während der Suche die Augen frei bewegen (offene Aufmerksamkeitsverlagerung), oder sie müssen einen festen Punkt fixieren (verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerung). Bei der offenen Aufmerksamkeitsverlagerung werden teilweise zusätzlich zur Reaktionszeit auch die Augenbewegungen aufgezeichnet.

Alle Varianten des Suchparadigmas zielen darauf, Zusammenhänge herauszufinden zwischen Eigenschaften des Suchbildes und der Funktionsweise der visuellen Aufmerksamkeit: Wie viel Aufmerksamkeit wird wann und wie schnell wohin gelenkt, welche visuellen Merkmale werden wann besonders beachtet, und wie beeinflusst Aufmerksamkeitszu- oder -abwendung die visuelle Wahrnehmung? So wird beispielsweise die Anzahl der Objekte im Bild variiert und geprüft, ob die Reaktionszeit mit zunehmender Anzahl der Objekte ansteigt oder nicht. Aus einem Reaktionszeitanstieg wird gefolgert, dass die Versuchsperson ihre Aufmerksamkeit nacheinander auf die einzelnen Objekte gelenkt hat („serielle Suche“), während aus einer konstanten Reaktionszeit abgeleitet wird, die Versuchsperson habe alle Objekte gleichzeitig geprüft („parallele“ oder „Pop-Out-Suche“), die Aufmerksamkeit müsse also über das gesamte Suchbild verteilt gewesen sein. Letzteres macht eine Versuchsperson sinnvollerweise nur dann, wenn das Zielobjekt bereits mit wenig Aufmerksamkeitszuwendung erkennbar ist. Bei welchen Eigenschaften des Suchbildes dies der Fall ist, kann auf diese Weise herausgefunden werden. Ein Überblick über die Ergebnisse aus der Forschung mit der visuellen Suche wird in Kapitel 2 gegeben. Es sei jedoch vorangestellt, dass bei der Interpretation und dem Vergleich von Ergebnissen zu berücksichtigen ist, welche Variante des Suchparadigmas (s.o.) jeweils verwendet wurde, da die Aufgabenbedingungen die Funktionsweise des Aufmerksamkeitssystems beeinflussen. So reicht beispielsweise bei tachistoskopischer Darbietung die Zeit nicht aus, um die Aufmerksamkeit während der Suche zu verlagern, und somit verteilt die Versuchsperson sie möglicherweise von vornherein anders auf das Bild, als wenn eine sorgfältige Suche möglich ist. Darüber hinaus werden auch andere an der Aufgabenlösung beteiligte kognitive Prozesse von den Aufgabenbedingungen beeinflusst: Im Hinblick auf einfache Wahrnehmungsprozesse ist beispielsweise zu beachten, dass Adaptations- oder Maskierungsprozesse sich bei andauernder Darbietung anders verhalten als bei tachistoskopischer, und bei offener gegenüber verdeckter Aufmerksamkeitsverlagerung sind das zentrale und das periphere Sehen in unterschiedlichem Maße beteiligt. Auch die Inanspruchnahme von Gedächtnisprozessen unterscheidet sich zwischen den Varianten, je nachdem, ob sich die Ver-

¹ Da die Reaktionszeit in einem einzelnen Suchdurchgang stark zufallsabhängig ist - beispielsweise könnte sich das Zielobjekt zufälligerweise im initialen Zentrum der Aufmerksamkeit befinden -, werden Reaktionszeiten immer über eine große Anzahl gleichartiger Durchgänge gemittelt.

suchsperson das Aussehen des Zielobjektes merken muss, oder auch, welche Positionen sie bereits abgesucht hat. Weiterhin können auch Entscheidungsprozesse von der Wahl des Paradigmas abhängen (ob sie unter Zeitdruck erfolgen oder nicht), und auch die Motivation bleibt nicht unberührt: In der tachistoskopischen Bedingung kann sie aufgrund hoher Fehlerraten allgemein nachlassen, und in der zeitlich unbegrenzten Reaktionszeitbedingung besteht ein Motivationskonflikt, die Schnelligkeit oder die Genauigkeit zu optimieren (der sogenannte „Speed-Accuracy-Tradeoff“).

1.2 Zum Begriff der Aufmerksamkeit

Bisher wurde allgemein von „der visuellen Aufmerksamkeit“, d.h. der Aufmerksamkeit in der visuellen Wahrnehmung, gesprochen. Doch was beinhaltet dieses Konzept, das ja Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist, genau? Im historischen Rückblick finden sich zum Begriff der Aufmerksamkeit in der Psychologie mindestens zwei Extrempositionen. Der amerikanische Philosoph und Psychologe WILLIAM JAMES schrieb 1890:

„Jeder weiß, was Aufmerksamkeit ist. Das Bewusstsein ergreift, in klarer und lebendiger Form, Besitz von einem Gegenstand oder Gedankengang aus einer Reihe gleichzeitig möglicher. Das wesentliche Merkmal der Aufmerksamkeit ist, dass sich das Bewusstsein quasi in einem Brennpunkt konzentriert. Es ist ein Abwenden von den einen Dingen, um mit den anderen besser umgehen zu können.“ (Zitiert nach WURTZ, GOLDBERG & ROBINSON 1987).

Hingegen schreibt ODMAR NEUMANN rund hundert Jahre später:

„Aufmerksamkeit in dem Sinn, in dem der Begriff in derartigen Modellen benutzt wird, existiert nicht“, und bezieht sich damit auf jene weit verbreiteten Modelle, die Aufmerksamkeit als eine „einheitliche psychologische Komponente“ ansehen, welche sich durch „begrenzte Kapazität, willkürliche Steuerbarkeit und Repräsentation im Bewusstsein“ auszeichnet. (NEUMANN 1992)

Neumann schlägt vor, an Stelle einer Entität von verschiedenen Komponenten der Aufmerksamkeit zu sprechen, und den Begriff „Aufmerksamkeit“ nur noch als deskriptiven Oberbegriff, nicht mehr jedoch als einheitliches Forschungsthema zu verwenden.

In der dazwischen liegenden Zeit sind eine Vielzahl von Auffassungen und Theorien zum Thema Aufmerksamkeit entwickelt worden. Während TITCHENER noch 1908 schrieb, dass „die Lehre von der Aufmerksamkeit der Prüfstein des ganzen psychologischen Systems“ sei (zitiert nach SANDERS & NEUMANN 1996), wurde das Konzept der Aufmerksamkeit bereits von den Gestaltpsychologen (z.B. RUBIN 1921) als nicht existent betrachtet und von führenden Vertretern des Behaviorismus als zu mentalistisch abgelehnt. Erst durch die „kognitive Wende“ in den fünfziger Jahren wurde Aufmerksamkeit wieder zum interessierenden Konzept. Wesentliche Elemente aller Aufmerksamkeitstheorien in den folgenden Jahrzehnten waren zum einen die begrenzte Kapazität und zum anderen die Selektion, d.h. die Zuteilung der begrenzten Kapazität. Dabei wurden jedoch die Schwerpunkte auf diese beiden Elemente zum Teil unterschiedlich gesetzt, und es kam auch zu Bedeutungsverschiebungen: Während BROADBENT (1958) in seiner Filtertheorie noch unter „Kapazität“ die Übertragungskapazität von Verarbeitungskanälen verstand und unter „Selektion“ denjenigen Mechanismus, der den

Informationsfluss einschränkt, wurde später das Konzept einer völlig unspezifischen Kapazität, die insgesamt begrenzt sein sollte, zur beherrschenden Idee (KAHNEMAN 1973). Insbesondere wurden dann anstrengende, kapazitätsabhängige, und automatische, kapazitätsfreie Verarbeitung gegenübergestellt (z.B. POSNER & SNYDER, 1975). „Kapazität“ bedeutete hier allgemein „Vorrat“, „Selektion“ dessen Verteilung. Im Anschluss an die Arbeiten von ALLPORT (z.B. ALLPORT, ANTONIS & REYNOLDS 1972) wurde die Idee eines unspezifischen Vorrats zugunsten von verschiedenen, spezifischen Ressourcen aufgegeben. Die Frage der Selektion blieb hier zunächst unbeachtet. Erst in neuerer Zeit geriet der Ressourcengedanke mehr in den Hintergrund, während nun Selektion und auch Integration als die eigentlichen Funktionen der Aufmerksamkeit angesehen wurden (z.B. TREISMAN & GELADE 1980; VAN DER HEIJDEN 1992). Der Schwerpunkt der Forschung wurde zunehmend auf die visuelle Aufmerksamkeit gelegt. In Bezug auf die Selektion gibt es Debatten darüber, an welcher Stelle im Verarbeitungsprozess sie stattfindet („frühe Selektion“ gegenüber „später Selektion“) und wie viele Selektionsstellen es gibt (eine, zwei oder viele). Weiterhin wird über das Verhältnis von Ressourcenbegrenzung und Selektion gestritten: Die Vorstellung, dass die Selektion eine Folge von Kapazitätsbegrenzungen ist, scheint so plausibel, dass sie lange Zeit nicht hinterfragt wurde. Inzwischen ist jedoch von verschiedenen Theoretikern eine handlungsorientierte Sichtweise der Selektion entwickelt worden (z.B. ALLPORT 1987, 1993; NEUMANN, 1987, 1990), die ihre Wurzel bereits in recht frühen Betrachtungen hat (z.B. RIBOT 1906). Nach dieser Sichtweise selektiert die Aufmerksamkeit solche Elemente, deren bevorzugte Verarbeitung zur Ausführung zielgerichteter Handlungen erforderlich ist. Eine Ressourcenbegrenzung in der Verarbeitung ist dann eher eine funktionelle Konsequenz der Selektion als deren Ursache.

Die Frage, ob es nun ein gemeinsames koordinierendes Aufmerksamkeitssystem gibt oder nicht, ist nach wie vor nicht entschieden. Im Falle eines gemeinsamen Systems müsste sich irgendwo ein neurophysiologisches Korrelat dieser Entität (im Sinne eines Netzwerkes von Neuronenpopulationen) lokalisieren lassen, was bisher nicht gelungen ist und zunehmend unwahrscheinlich erscheint. Die Verneinung eines solchen Systems im Sinne von Neumann (s.o.) würde dann bedeuten, dass Aufmerksamkeit ein rein deskriptives Konzept ist, mit dem in einzelnen Bereichen der Psychologie (wie Denken, Handeln, Wahrnehmen) unterschieden werden kann zwischen der Verarbeitung an sich und ihrer Modulation durch Selektivität bzw. Ressourcenzuteilung. Hinsichtlich einer solchen Modulation unterscheidet NEUMANN (1992) „in erster Annäherung“ fünf Komponenten der Aufmerksamkeit:

1. Verhaltenshemmung („behavioral inhibition“), die verhindert, das versucht wird, unvereinbare Handlungen zugleich auszuführen.
2. Regulation des psychophysiologischen Erregungsniveaus
3. Informationsselektion zur Handlungssteuerung („selection for action“) als die Funktion der sensorischen Aufmerksamkeit
4. Spezifikation von Handlungen durch Handlungsplanung
5. Funktionell erforderliche Hemmungsvorgänge beim Einsatz von Fertigkeiten („skills“).

Weshalb die Selektion (Punkt 3.) sich nur auf die Wahrnehmung von Informationen (den sensorischen Bereich) beziehen soll, erscheint nicht recht einsichtig. Eine Selektion von Inhalten im Sinne einer intensivierten Verarbeitung handlungsrelevanter Elemente und eine oberfläch-

liche oder vernachlässigte Verarbeitung handlungsirrelevanter Elemente findet sich ebenfalls bei der Verarbeitung von mentalen Vorstellungen, Gedächtnisinhalten, Denkvorgängen oder motorischen Tätigkeiten. Auch *zwischen* diesen Bereichen kann eine Selektion erfolgen, z.B. wird entweder die Wahrnehmung intensiviert oder das Denken, im Sinne einer „nach innen“ bzw. „nach außen“ gerichteten Aufmerksamkeit (was der populären Redewendung „aufmerksam sein“ wohl am nächsten kommt). Es soll hier jedoch nicht der Versuch einer völlig neuen Taxonomie von Komponenten der Aufmerksamkeit unternommen werden, zumal die übrigen von NEUMANN genannten Punkte Abgrenzungsprobleme zu anderen psychologischen Konzepten wie Arbeitsgedächtnis, Handlungssteuerung usw. aufwerfen, die dann zu diskutieren wären. Als Arbeitshypothese für die hier untersuchte Fragestellung – die visuelle Suche – genügt es, als zentrale Funktion der Aufmerksamkeit einen Selektionsmechanismus anzunehmen, der handlungsrelevante Elemente auswählt und deren Verarbeitung moduliert. Eine Taxonomie dieser auszuwählenden Elemente ist allerdings hilfreich für das Verständnis der weiteren Arbeit und ihre Einordnung in einen allgemeinspsychologischen Zusammenhang. Sie ist in Abbildung 1 dargestellt.

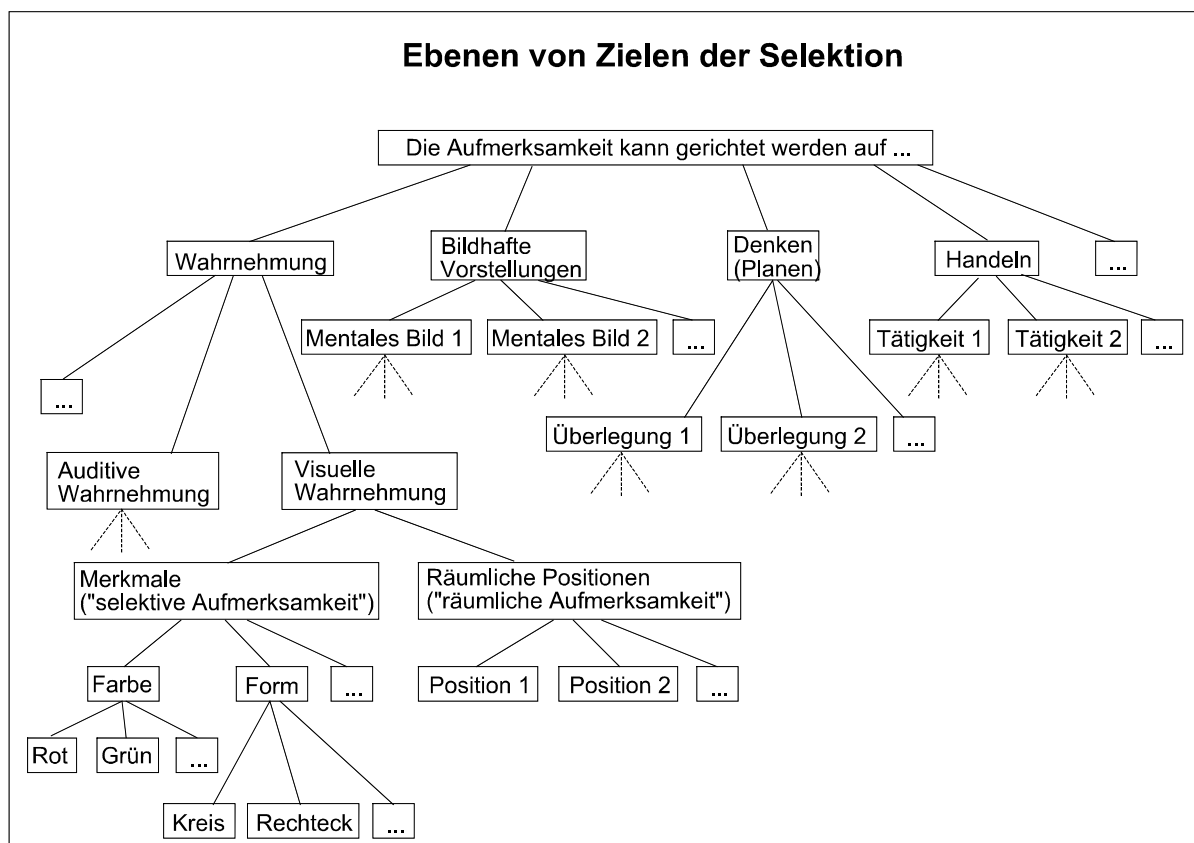


Abbildung 1. Taxonomie von psychologischen Bereichen und Inhalten, auf die sich Aufmerksamkeit im Sinne einer Selektion beziehen kann. Speziell die Unterteilung der visuellen Aufmerksamkeit in Merkmals- und räumliche Aufmerksamkeit wird allerdings nicht von allen Theoretikern geteilt, was in der Literatur als „Location-Special“ versus „Location-Non-Special“-Debatte geführt wird (vgl. Kapitel 2). In der letzteren Auffassung - der diese Arbeit nicht folgt - wird die Position eines Objektes als weiteres Objektmerkmal angesehen.

1.3 Ziel der Arbeit

In der Taxonomie aus Abbildung 1 beansprucht die visuelle Suche – abgesehen davon, dass die Aufmerksamkeit auf die Aufgabenbearbeitung an sich gerichtet sein muss – die visuelle Aufmerksamkeit, und zwar sowohl im Hinblick auf die Merkmals²- als auch auf die räumliche Aufmerksamkeit. Daher ist das Paradigma geeignet, speziell diese beiden Aspekte von Aufmerksamkeit zu untersuchen. In dieser Arbeit soll die visuell-räumliche Aufmerksamkeit im Vordergrund stehen, wobei die Merkmalsaufmerksamkeit allerdings immer beteiligt ist. Es sollen formale Modelle entwickelt werden, die Suchstrategien in verschiedenen Suchbildern beschreiben. Der Terminus „Suchstrategie“ beinhaltet dabei die Art der Suchschritte (insbesondere die Zuteilung und Verlagerung der Aufmerksamkeit), deren Anzahl, deren Abfolge und Zeitdauer. Die entwickelten Modelle sollen einerseits dazu dienen, Fragestellungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeitsforschung weiter aufzuklären, als auch dazu, Suchstrategien individueller Personen zu bestimmen, woraus sich Anwendungsaspekte ableiten.

² Der in der Literatur häufig gebrauchte Begriff „Selektive Aufmerksamkeit“ soll hier nicht verwendet werden, da er missverständlich ist, was genau selektiert wird. Statt dessen soll von „Merkmalsaufmerksamkeit“ gesprochen werden.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund

In dieser Arbeit kann es nicht darum gehen, die umfangreiche Aufmerksamkeitsforschung der letzten hundert Jahre vollständig zu referieren. Im Hinblick auf die Fragestellung soll statt dessen die Darstellung auf die Forschungsergebnisse zur visuellen Suche beschränkt werden. In diesem Bereich ist zum einen eine Vielzahl von Einzelbefunden zu speziellen Fragestellungen zusammengetragen worden, zum anderen wurden mehrfach Anstrengungen unternommen, das visuelle Suchen formal zu modellieren. Der Schwerpunkt dieses Kapitels (Abschnitt 2.1) soll auf der Darstellung dieser Ansätze und der durch sie erzielten Ergebnisse liegen. Eine kurze Übersicht über aktuelle Forschungsfragen, die nicht nur im Rahmen der Modelle, sondern auch mit einzelnen Experimentalserien, untersucht worden sind, wird im Anschluss (Abschnitt 2.2) gegeben, ohne jedoch auf die Befundlage im Einzelnen einzugehen. Soweit diese von Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist, werden Einzelergebnisse aus der Literatur in den entsprechenden Kapiteln referiert.

Unter einem „formalen Modell“ soll hier eine theoretische Nachbildung des Suchprozesses verstanden werden, die es erlaubt, Leistungen von Versuchspersonen quantitativ zu erklären. Formale Modelle unterscheiden sich von anderen, ungenaueren Konzepten in der Psychologie vor allem durch folgende Charakteristika: Sie sind in einer formalen Sprache (oft in der der Mathematik, aber auch der Prädikatenlogik oder in Form eines neuronalen Netzwerkes) abgefasst. Die gegebene Erklärung ist so detailliert, dass unter Berücksichtigung der angegebenen Voraussetzungen die Leistung des Modells mit der menschlicher Versuchspersonen verglichen werden kann. Schließlich enthält ein Modell meist quantitative Modellparameter, deren Werte so bestimmt werden, dass das Modell der menschlichen Leistung möglichst nahe kommt. Um die Güte des Modells abzuschätzen, kann dann beurteilt werden, wie gut die Modellleistung der menschlichen Leistung entspricht und für wie plausibel die dafür zu wählenden Parameterwerte gehalten werden.

Die Auswahl der im Folgenden dargestellten Modelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden vor Allem besonders einflussreiche oder für Forschungsrichtungen charakteristische Ansätze wiedergegeben. Nicht zuletzt erfolgte die Auswahl im Hinblick auf die Relevanz für die vorliegende Arbeit.

Modelle der visuellen Suche können zum einen nach der Art der Leistungen, zum anderen nach der Art der Prozesse unterteilt werden, die sie modellieren. Es können im Wesentlichen zwei Arten von Leistungen modelliert werden: die Suchgenauigkeit (Fehlerrate) und die Re-

aktionszeit. Modelle, die sich ausschließlich auf die Genauigkeit beziehen, sollen hier vernachlässigt werden, da in dieser Arbeit Reaktionszeiten die Grundlage der Modellierung bilden werden. Bezüglich der modellierten Prozesse lassen sich prinzipiell auf jeder Auflösungsebene Modelle formulieren. Die Bandbreite reicht von Suchzeitmodellen, in denen einzelne Komponenten der Suche (z.B. Objektvergleich, Verlagerung des Aufmerksamkeitsfokus, ...) als Module im Sinne einer „Black Box“ angesehen und nicht im Einzelnen aufgeklärt werden, über solche, die einzelne Teilprozesse im Sinne eines „Wettlaufs“ konkurrierender Prozesse oder eines Schwellenproblems im Signal-Rausch-Verhältnis modellieren und dabei Eigenschaften des verarbeitenden Systems, z.B. der Neuronen, zugrunde legen, bis hin zur konnektionistischen Modellierung neuronaler Prozesse bei der Mustererkennung.

2.1 Formale Modelle der visuellen Suche

2.1.1 Das einfache serielle Modell

Die ersten Ansätze, Reaktionszeiten bei visuellen Suchaufgaben zu modellieren, waren einfache serielle Modelle (STERNBERG 1966, 1969). In solchen Modellen wird das Suchbild Objekt für Objekt durchmustert, und jedes Objekt dabei als Ziel- oder Ablenkerobjekt klassifiziert. Die Suche ist „selbstterminierend“, d.h. der Suchvorgang wird abgebrochen, sobald das Zielobjekt gefunden ist. Ist im Suchbild kein Zielobjekt vorhanden, werden alle Objekte geprüft. Da die Suchreihenfolge als unabhängig von der Position des Zielobjektes angenommen wird, beträgt die Anzahl von Suchschritten bei N Objekten im Mittel $(1 + 2 + \dots + N)/N = (1 + N)/2$. Die Modellgleichung für die Suchzeit ist eine einfache lineare Gleichung:

$$RT = \begin{cases} c + \frac{1+N}{2} \cdot t & \text{für Durchgänge mit Zielobjekt} \\ c + N \cdot t & \text{für Durchgänge ohne Zielobjekt} \end{cases}$$

wobei RT die mittlere Reaktionszeit bezeichnet, N die Anzahl der Objekte im Suchbild, t die für jedes Objekt aufgewandte Zeit und c einen konstanten und von der Anzahl der Objekte unabhängigen Zeitbetrag.

SCHNEIDER & SHIFFRIN (1977) entwickelten diese Gleichungen weiter und differenzierten zwischen automatischen und kontrollierten Suchprozessen, wobei sie zusätzliche Zeitparameter für die jeweils postulierten Komponenten der Suche einführten. Ihre Gleichungen waren mit den Ergebnissen der von ihnen durchgeführten Experimenten kompatibel (SHIFFRIN & SCHNEIDER 1977), wobei auf diesen Ansatz, die Reaktionszeit immer weiter zu zerlegen, ohne Annahmen über die zu Grunde liegenden Prozesse zu machen, hier nicht weiter eingegangen werden soll.

2.1.2 TREISMANS „Feature Integration Theory“ (FIT)

TREISMAN & GELADE entwickelten 1980 die sogenannte „Feature Integration Theory“ (FIT), die in den Folgejahren eine breite Akzeptanz erfuhr und eine Vielzahl von Forschungstätigkeiten stimulierte. Kernstück dieses Modells ist die Unterscheidung zwischen Merkmals- und Konjunktionssuche und der Zusammenhang dieser beiden Suchvarianten mit präattentiver, paralleler Verarbeitung bzw. attentiver, serieller Verarbeitung. Zudem steht ein theoretisches Konzept der Aufmerksamkeit dahinter, das im Gegensatz zu den bisherigen Reaktionszeitmodellen in der Lage ist, nicht nur visuelle Suchleistungen, sondern auch eine Reihe weiterer Befunde aus der Aufmerksamkeitsforschung (z.B. illusionäre Verknüpfungen) zu erklären.

Ausgangspunkt der FIT war folgende Beobachtung: Unterscheidet sich das Zielobjekt in einer Suchaufgabe in einem einfachen physikalischen Merkmal von den Ablenkerobjekten (z.B. in einer bestimmten Farbe oder Form), und teilt kein Ablenkerobjekt dieses Merkmal (Abbildung 2 links), dann ist die Suchzeit unabhängig von der Anzahl der Ablenker. Die Suche wird dann Merkmalsuche oder auch Pop-Out-Suche genannt, da das Zielobjekt gewissermaßen „ins Auge springt“. Unterscheidet sich das Zielobjekt jedoch von den Ablenkerobjekten nur durch eine Konjunktion von physikalischen Merkmalen (z.B. ist es durch die Kombination einer bestimmten Farbe mit einer bestimmten Form definiert), und teilt es jedes dieser Merkmale mit einer gewissen Anzahl von Ablenkern (Abbildung 2 rechts), dann steigt die Reaktionszeit linear mit der Anzahl der Ablenkerobjekte an. Eine solche Suche nennt man auch Konjunktionssuche.

	Merkmalsuche	Konjunktionssuche
Beispiel: Zielobjekt ist die schwarze Raute		
Reaktionszeiten		
Charakteristika der Steigungen	Flach (< 10 ms / Objekt) Ähnlich für Zielobjekt vorhanden:nicht vorhanden	Linear ansteigend (> 10 ms / Objekt) Verhältnis 1:2 für Zielobjekt, vorhanden:nicht vorhanden
Suchziele	Merkmale (Helligkeit, Ortsfrequenz, ...)	Merkmalskonjunktionen
Aufmerksamkeitsprozesse	Präattentive Prozesse	Präattentive und attentive Prozesse

Abbildung 2. Merkmalsuche (links) und Konjunktionssuche (rechts). Beispiel eines Suchbildes, einer typischen Reaktionszeitkurve mit ihren Charakteristika sowie die hypothetische Beteiligung von Aufmerksamkeitsprozessen gemäß der FIT.

TREISMAN & GELADE berichten eine Reihe von Experimenten, in denen sich charakteristische Suchzeitverläufe für die Merkmals- und die Konjunktionssuche ergaben: Bei der Merkmalsuche ergab sich für eine zunehmende Anzahl von Suchobjekten eine flache, d.h. konstante Reaktionszeitkurve (Abbildung 2 links). Die Suchzeit war also unabhängig von der Anzahl

der Objekte. Bei der Konjunktionssuche hingegen stieg die Reaktionszeit mit der Anzahl der Ablenkerobjekte linear an. Dieser Anstieg war für Durchgänge ohne Zielreiz ungefähr doppelt so steil wie für Durchgänge mit Zielreiz (Abbildung 2 rechts). Daraus schlossen TREISMAN & GELADE, dass für die Konjunktionssuche die STERNBERGSchen Reaktionszeitgleichungen (s.o.) gelten, für die Merkmalssuche hingegen $RT = c$ formuliert werden kann.

Die FIT erklärt diese Dichotomie von Ergebnissen mit folgendem Modell (vgl. Abbildung 3): Im visuellen System wird zunächst eine bestimmte Anzahl von einfachen Merkmalen (wie Farbe, Orientierung, Größe) in separaten *Merkmalskarten* kodiert. Die Autoren nehmen an, dass in diesen Merkmalskarten räumliche Information (an welcher Position im Raum sich die einzelnen Merkmale befinden) zwar kodiert ist, diese Information ohne Beteiligung einer höheren Stufe der Verarbeitung (s.u.) aber nicht zugänglich ist. Unmittelbar zugänglich ist nur die Ausprägung der einzelnen Merkmale. Die Information aus allen Merkmalskarten wird verknüpft in einer *Positionskarte*. Auf ihr sind Orte mit salienten Eigenschaften verzeichnet, jedoch ohne Information über die Beschaffenheit dieser Orte. Mit Hilfe der Aufmerksamkeit wird nun die Information aus Merkmals- und Positionskarte gemeinsam verfügbar. TREISMAN & GELADE stellen sich die Aufmerksamkeit als eine Art „Fenster“ oder „Scheinwerfer“ vor, der jeweils auf einen bestimmten Bereich der Positionskarte gerichtet werden kann. Dadurch wird für die Position, die sich im Aufmerksamkeitsfenster befindet, die Information sowohl über alle Merkmale an dieser Position als auch über die Position selbst zugänglich. Das Aufmerksamkeitsfenster hat dabei eine feste Größe. Es kann jeweils nur ein Objekt enthalten. TREISMAN & GELADE schließen mit diesem Modell an die auf NEISSER (1967) zurückgehende Unterscheidung zwischen *präattentiver* und *attentiver* Verarbeitung an: In der frühen, präattentiven Verarbeitungsstufe bilden sich die Merkmalskarten. Erst in der späteren, attentiven Stufe bindet das Aufmerksamkeitsfenster diese mit der Positionskarte zusammen. Somit sind in der präattentiven Phase der Wahrnehmung nur die Merkmale einer Szene an sich, nicht jedoch ihre Zuordnung zu Objekten und Positionen verfügbar.

Dieses Modell erklärt die Dichotomie von Suchzeitverläufen: Eine Merkmals-Suchaufgabe, in der einzig und allein das Zielobjekt das zu suchende Merkmal enthält, kann auf der präattentiven Stufe gelöst werden. Die Information aus den Merkmalskarten reicht aus, um zu entscheiden, ob das gesuchte Merkmal in der Szene vorhanden ist oder nicht. Da die präattentive Wahrnehmung auf der gesamten Szene parallel operiert, ist die Suchzeit unabhängig von der Anzahl der Ablenkerobjekte. Für die Konjunktionssuche hingegen reicht die präattentive Wahrnehmung nicht aus, da jedes Merkmal des Zielobjektes von einigen der Ablenkerobjekte geteilt wird. Um zu entscheiden, ob ein Zielobjekt vorhanden ist, muss die Information aus mehreren Merkmalskarten verknüpft werden, wofür die attentive Stufe nötig ist: Das Aufmerksamkeitsfenster wird seriell über die Positionskarte bewegt, die das Suchbild räumlich repräsentiert. Für jeden Ort wird entschieden, ob das dort befindliche Objekt die interessierende Kombination von Merkmalen enthält. Somit steigt die Suchzeit mit der Anzahl der Suchschritte, d.h. mit zunehmender Objektanzahl, linear an. Es gelten somit die oben zitierten Gleichungen, die sich in den beobachteten Suchzeitverläufen (Abbildung 2 rechts) widerspiegeln. Aufgrund der postulierten Mechanismen werden die beiden Typen der Suche im Allgemeinen auch *präattentive* oder *parallele* Suche bzw. *attentive* oder *serielle* Suche genannt. Diese Termini sind bis heute in der psychologischen Literatur verbreitet.

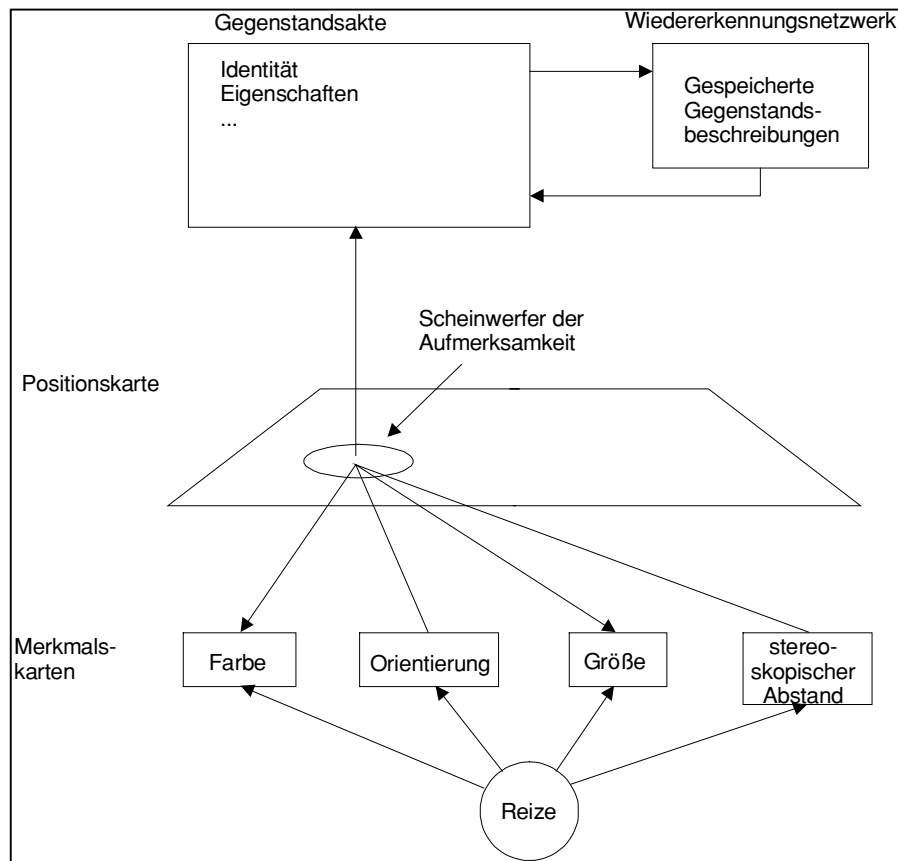


Abbildung 3. Schema des FIT-Modells (nach TREISMAN)

Die FIT war nicht nur in der Lage, die häufig beobachtete Dichotomie von Suchzeitverläufen zu erklären, sondern auch eine Reihe weiterer Beobachtungen, so z.B. das Phänomen illusorischer Verknüpfungen: Bei sehr kurzer (tachistoskopischer) Präsentation einer visuellen Szene, die Objekte mit mehreren Merkmalsverknüpfungen enthält (z.B. blaue X und rote O) berichten Versuchspersonen häufig die Merkmale richtig, aber die Verknüpfungen falsch (z.B. geben sie an, ein rotes X gesehen zu haben). Die FIT erklärt dies damit, dass hier nur die präattentive Verarbeitungsstufe zum Einsatz kam.

Zunächst erfuhr die FIT eine breite Akzeptanz. Insbesondere stimulierte sie eine rege Forschungstätigkeit, in der u.a. versucht wurde, eine Liste aller einfachen, also präattentiv verarbeiteten, Merkmale aufzustellen. Einen Überblick hierüber gibt ENNS 1990. Im Laufe der Zeit kam jedoch auch Kritik an der FIT auf. Zum einen wurden Gegenbeispiele veröffentlicht. So fanden NAKAYAMA & SILVERMAN (1986) bei Konjunktionssuchen aus Tiefe und Farbe sowie Tiefe und Bewegung flache Suchzeitverläufe im Sinne einer Merkmalsuche, und in der Folge wurden weitere ähnliche Beispiele beigebracht. Schließlich gelang es, ein ganzes Kontinuum von flachen bis hin zu sehr steilen Suchzeitverläufen zu produzieren (vgl. den Überblicksartikel von WOLFE 1996). Zum anderen konnte die FIT Befunde nicht erklären, nach denen strategische Kontrolle die Suchzeit beeinflusst. So werden bekannte Zielreize in der Regel schneller gefunden als unbekannte, welche sich erst durch ihren Unterschied zu den Ablenkern definieren („Singleton-Suche“, näher untersucht z.B. von MÜLLER, HELLER & ZIEGLER 1995).

Stimuliert durch diese Einwände, brachten TREISMAN & SATO 1990 eine revidierte Fassung der FIT heraus. In dieser ergänzten sie das ursprüngliche Modell um einen strategischen Mechanismus, mit dessen Hilfe höhere kognitive Funktionen auf das Suchgeschehen Einfluss nehmen können („Top-Down“-Kontrolle). Dieser Kontrollmechanismus ist in der Lage, störende Merkmale zu inhibieren. In einem Konjunktionssuchbild aus den Formen X und O und den Farben Blau und Rot, in dem das Zielobjekt ein blaues X ist, kann beispielsweise bereits vor der Suche die Farbe Rot inhibiert werden. Die Wahrnehmung konzentriert sich dann auf die blauen Objekte, unter denen nun bereits auf präattentiver Stufe das X erkennbar ist (die Suche nach der Form X stellt innerhalb der blauen Objekte eine Merkmalsuche dar.) Bereits in einer früheren Arbeit (TREISMAN & GORMICAN 1988) war auch das Konzept des Aufmerksamkeitscheinwerfers insofern verändert worden, dass dieser nun nicht mehr nur auf ein einzelnes Objekt beschränkt wurde, sondern auch Gruppen von Objekten enthalten konnte.

Die revidierte FIT war in der Lage, die meisten Einwände zu entkräften. Sie kann jedoch nach wie vor nicht erklären, wie es zu einer effizienten Konjunktionssuche kommt, wenn das Zielobjekt nicht vorher bekannt ist, die strategische Kontrolle also nicht greifen kann (vgl. Abbildung 4).

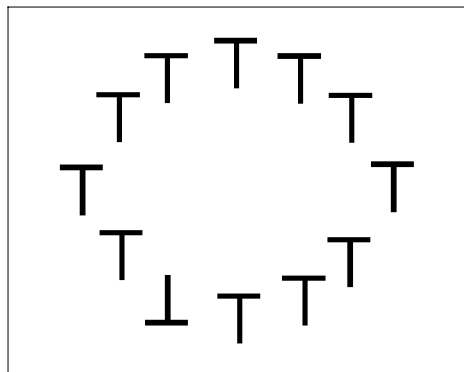


Abbildung 4. Beispiel einer effizienten Konjunktionssuche. Merkmale sind horizontale und vertikale Balken; das Zielobjekt ergibt sich erste aus der spezifischen Konjunktion „horizontaler Balken unten, vertikaler oben“. Ohne es vorher zu kennen, springt es auf den ersten Blick ins Auge (Pop-Out). Das Beispiel stammt aus HUMPHREYS, QUINLAN & RIDDOCH 1989.

2.1.3 WOLFES „Guided Search“-Modell

Das *Guided Search*-Modell liegt in einer ersten (CAVE & WOLFE 1990) und einer zweiten, überarbeiteten Fassung („Guided Search 2.0“, WOLFE 1994) vor. Letztere unterscheidet sich von der ersten Fassung in einer Reihe von Präzisierungen sowie einigen Änderungen. An dieser Stelle wird das aktuellere Modell Guided Search 2.0 referiert. Es weist in vielen Punkten Ähnlichkeiten zur revidierten FIT auf, ist jedoch darüber hinaus in der Lage, sowohl die Suche nach unbekanntem Konjunktionszielreizen zu erklären als auch die große Variabilität an Suchzeitverläufen, die selbst zwischen Versuchspersonen in derselben Aufgabe zu beobachten ist (WOLFE, CAVE & FRANZEL 1989). Wie bei der FIT handelt es sich um ein Zwei-Stufen-Modell: An eine präattentive (parallele) Verarbeitungsstufe mit unbegrenzter Kapazität schließt sich eine attentive (serielle), kapazitätsbegrenzte Stufe an. Die entscheidenden Unterschiede zur revidierten FIT liegen zum einen in einer besser elaborierten Modellierung der

präattentiven Stufe, zum anderen in einer veränderten Interaktion zwischen den beiden Stufen und zum dritten in der Art der strategischen Kontrolle (Aktivierung relevanter statt Inhibition irrelevanter Merkmalskarten).

Parallele Verarbeitungsstufe:

In dieser Stufe wird für jede perzeptuelle Dimension (Farbe, Form, ...) eine *Merkmalskarte* sowie eine zusammenfassende *Aktivierungskarte* berechnet. Abbildung 5 gibt eine Übersicht über die Prozesse in dieser Stufe. Sowohl Merkmals- als auch Aktivierungskarten sind räumlich organisiert. Zunächst wird (in einem „Bottom-Up-Prozess“) die Aktivierung jedes Objektes in einer Merkmalskarte berechnet. Sie ist das gewichtete Mittel der Differenzen zwischen diesem Objekt und seinen Nachbarobjekten. „Gewichtet“ bedeutet, dass jede Differenz zwischen Objekt und Nachbarobjekt mit einem Gewicht in die Mittelung eingeht, das umgekehrt proportional zum räumlichen Abstand zwischen Objekt und Nachbarobjekt ist (Gleichung (1)). Mit „Differenzen“ sind perzeptuelle Unterschiede im betreffenden Merkmal gemeint. Sie werden wiederum als gewichtete Summen gebildet, und zwar werden hier die Objektunterschiede in verschiedenen „weit eingestellten (kategorienähnlichen) Kanälen“ aufsummiert und dabei gewichtet mit der Bedeutung des jeweiligen „Kanals“ für die Aufgabe, d.h. für die Diskrimination des Zielobjektes von den Ablenkerobjekten. Diese Gewichte werden von höheren kognitiven Prozessen gesetzt („Top-Down-Einfluss“) (Gleichung (2)). Die Modellgleichung für die Aktivierung eines Objektes i in einer Merkmalskarte lautet also

$$a(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{d(i,j)}{l(i,j)} \quad (1)$$

wobei n die Anzahl der Objekte im Suchbild ist, $d(i,j)$ die Differenz des Objektes i zum Nachbarobjekt j im betreffenden Merkmal und $l(i,j)$ der räumliche Abstand zwischen den Objekten i und j . Die Differenz $d(i,j)$ zwischen zwei Objekten berechnet sich als

$$d(i,j) = \sum_{k=1}^K g(k) \cdot |f_{i,k} - f_{j,k}| \quad (2)$$

K ist dabei die Anzahl der Kanäle, in denen das betreffende Merkmal verarbeitet wird, $g(k)$ das strategisch gesteuerte Gewicht des Kanals k im Hinblick auf seine Aufgabenrelevanz, und $|f_{i,k} - f_{j,k}|$ der Objektunterschied zwischen den Objekten i und j im Kanal k .

Die Aktivierung eines Objektes in der *Aktivierungskarte* wird berechnet als gewichtete Summe seiner Aktivierungen in allen *Merkmalskarten*. Die Gewichte werden wiederum in einem „Top-down-Prozess“ entsprechend der Relevanz der einzelnen Merkmalskarten für die Aufgabe gesetzt (Gleichung (3)). Die Aktivierung eines Objektes i in der *Aktivierungskarte* berechnet sich demnach als

$$A(i) = \sum_{m=1}^M g(m) \cdot a_m(i) \quad (3)$$

wobei M die Anzahl der Merkmalskarten beschreibt, $g(m)$ das Gewicht der m -ten Merkmalskarte, welches im Hinblick auf ihre Aufgabenrelevanz gesetzt wird, und $a_m(i)$ die Aktivierung des Objektes i in der m -ten Merkmalskarte (s.o.).

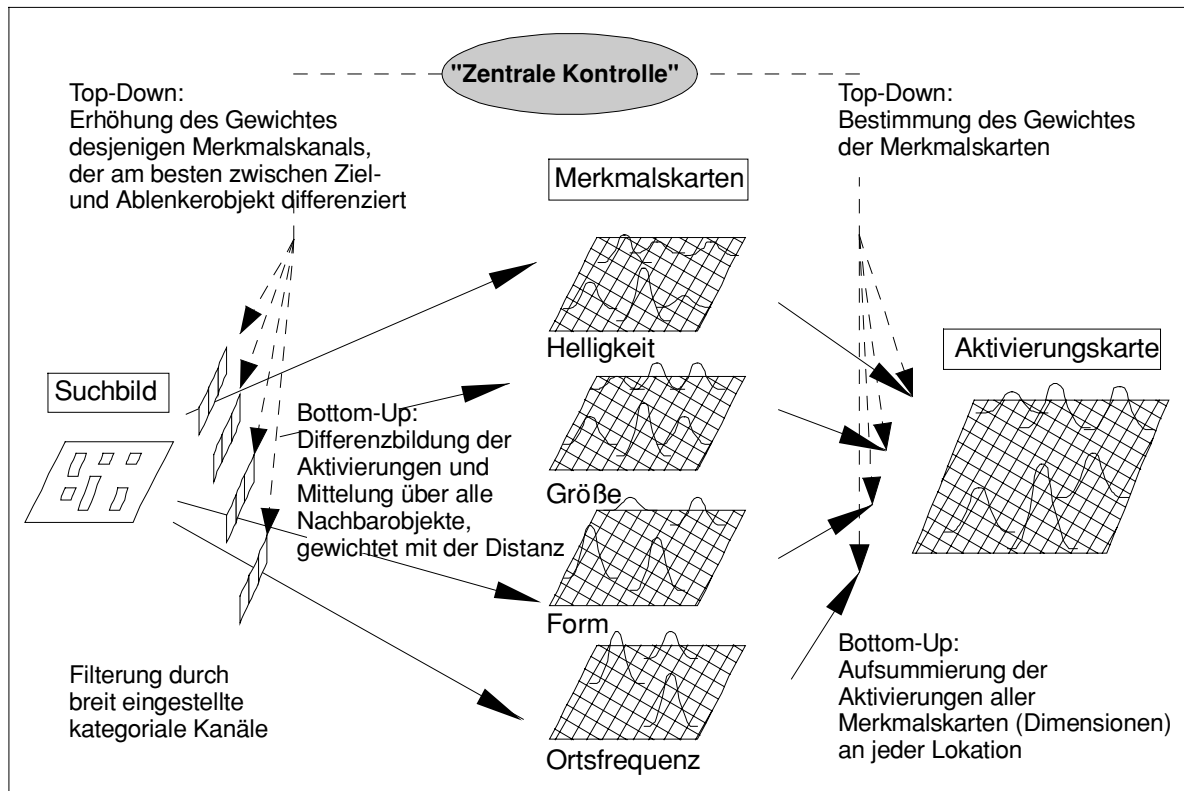


Abbildung 5. Die parallele Verarbeitungsstufe in *Guided Search 2.0*: Berechnung der Aktivierungskarte (modifiziert nach Abbildung 2 in WOLFE 1994).

Ein explizites Ziel von *Guided Search* war es, ein Kontinuum von Sucheffizienzen erklären zu können. WOLFE erklärt unterschiedliche Effizienzen mit einer Variabilität von Aktivierungen in der Aktivierungskarte, die aufgrund von Rauschen im System und / oder in den Reizen zustande kommt. Aufgrund dieses Rauschens, das als normalverteilt angenommen wird, sind auch die Aktivierungen von Ziel- und Ablenkerobjekten keine Konstanten, sondern Werte einer normalverteilten Zufallsvariablen. Obige Gleichungen geben daher lediglich deren Mittelwerte an. Nach der Signalentdeckungstheorie hängt die Effizienz der Suche ab von der Differenz zwischen dem Mittelwert der Zielreiz-Aktivierung und den Ablenker-Aktivierungen (Signalstärke): Ein ausgeprägter Zielreiz-Ablenker-Unterschied, d.h. ein starkes Signal, führt zu einer so großen Differenz der Aktivierungen in der Aktivierungskarte, dass selbst unter dem Einfluss von Zufallsrauschen die maximale Aktivierung in der Karte an der Stelle des Zielobjektes sein wird, so dass dieses auf Anhieb gefunden wird (Pop-Out) (vgl. Abbildung 6a). Je kleiner das Signal ist, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass Aktivierungen von Ablenkern durch den Einfluss des Rauschens größer als die Zielreiz-Aktivierung werden, so dass das Zielobjekt erst im zweiten oder einem späteren Suchschritt gefunden wird (Abbildung 6b).

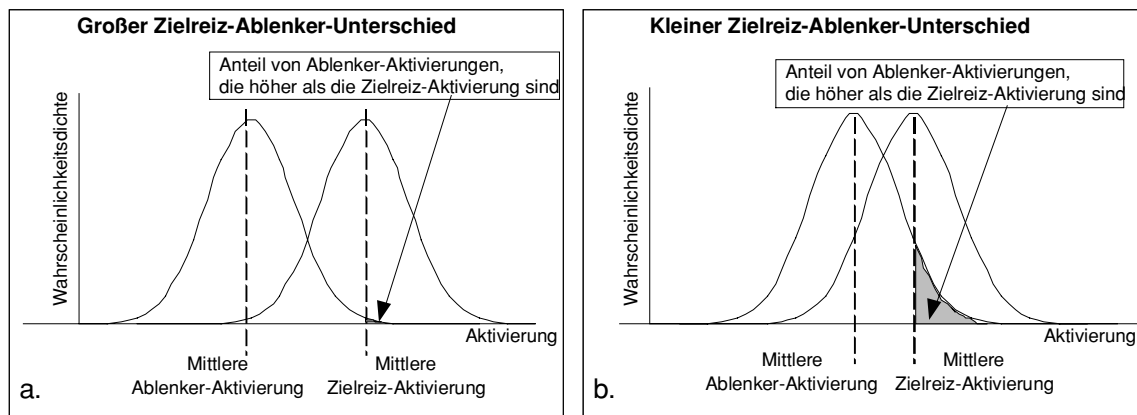


Abbildung 6. Verteilungen von Zielreiz- und Ablenker-Aktivierungen und Wahrscheinlichkeit, dass die Ablenkeraktivierung höher ist als die Zielreiz-Aktivierung, (a) für große und (b) für kleine physikalische Zielreiz-Ablenker-Unterschiede. Nach WOLFE (1994).

Serielle Verarbeitungsstufe:

WOLFE (1994) skizziert mehrere mögliche Mechanismen, wie basierend auf der Aktivierungskarte die Zuteilung der Aufmerksamkeit stattfinden könnte. Er entscheidet sich für einen rein seriellen Mechanismus, bei dem die Aufmerksamkeit immer nur auf einem Objekt zur Zeit sein kann. Sie wendet sich den Objekten in der Reihenfolge absteigender Aktivierungen zu, bis das Zielobjekt gefunden ist, oder alle Objekte abgesucht sind und die Suche abgebrochen wird. Eine hohe Sucheffizienz, d.h. eine flache Reaktionszeitkurve, ergibt sich, wenn in nahezu allen Durchgängen das Zielobjekt gleich im ersten Schritt gefunden wird, was bei einem deutlichen Unterschied zwischen Ziel- und Ablenkerobjekt in den relevanten Merkmalen der Fall sein wird. Eine steile Kurve ist die Folge einer so geringen Salienz des Zielobjektes, dass die Signalstärke unter dem Schwellenwert bleibt, der nötig wäre, um das Rauschen zu übertreffen.

Mit Computersimulationen des Modells konnten eine Reihe von psychophysikalischen Daten aus der Literatur nachgebildet werden (vgl. WOLFE 1994). Das Guided Search-Modell ist aufgrund mehrerer Besonderheiten attraktiv: Es erklärt nicht nur die Möglichkeit kontinuierlicher und individuell unterschiedlicher Sucheffizienzen bei der Konjunktionssuche, sondern es bietet auch die Möglichkeit flacher Reaktionszeitkurven bei der Konjunktionssuche sowie ansteigender Kurven bei der Merkmalssuche. Letzteres ist dann der Fall, wenn der physikalische Zielreiz-Ablenker-Unterschied im zu suchenden Merkmal sehr gering ist. Eine Konjunktionssuche hingegen ist effizient, wenn in jeder der betreffenden Merkmalskarten eine starke Aktivierung der Zielreizposition auftritt und diese Aktivierungen zu einem Aktivierungsmaximum in der Aktivierungskarte kombiniert werden. So können selbst unbekannte Zielobjekte schnell gefunden werden (vgl. das Beispiel aus Abbildung 4). Durch die Einbeziehung der Objektanzahl N in die Aktivierungsberechnung bietet das Modell weiterhin die Möglichkeit, auch nichtlineare Reaktionszeitkurven anzupassen. Tatsächlich sind die häufig beschriebenen linearen Anstiege häufig lediglich das Ergebnis einer Mittelung mehrerer Versuchspersonen, während die individuellen Kurven an verschiedenen Stellen „Knicks“ aufweisen (z.B. in den Experimenten von DUNCAN & HUMPHREYS 1989).

Probleme des Modells wurden von einigen Autoren (z.B. MÜLLER & HUMPHREYS 1983) in seiner strengen Serialität gesehen, die keinen Raum für den bereits mehrfach nachgewiesenen

Einfluss von Gruppierungsprozessen auf die Suchzeit lässt. Beispielsweise verglichen MORDKOFF u.a. (1990) Konjunktionssuchen mit einem und zwei Zielobjekten und fanden, dass die *kürzesten* Reaktionszeiten bei zwei Zielobjekten kürzer waren als die *kürzesten* bei einem Zielobjekt. Ein rein serielles Modell, bei dem die Aufmerksamkeit nur auf einem Objekt zur Zeit sein kann, kann dies nicht erklären. Etwas unbefriedigend an *Guided Search* erscheint weiterhin die Tatsache, dass der Einfluss der parallelen auf die serielle Stufe so stark ist, dass eigentlich jede noch so schwierige Suchaufgabe auf Anhieb gelöst werden würde, wenn WOLFE nicht das Konzept des Rauschens eingeführt hätte. Ist Rauschen tatsächlich die einzige Eigenschaft des Aufmerksamkeitssystems, die zu einer Ineffizienz führt und damit die Kapazitätsbegrenzung begründet?

2.1.4 Das SERR-Modell von HUMPHREYS & MÜLLER

Das Modell SERR („Search via Recursive Rejection“, HUMPHREYS & MÜLLER 1993) stellt eine konnektionistische Implementierung des bereits 1989 von DUNCAN & HUMPHREYS propagierten Ähnlichkeitskonzeptes dar. Im Gegensatz zu den bisherigen Zwei-Stufen-Modellen nimmt dieses Konzept für die gesamte Suche nur einen einzigen parallelen Prozess an. Insbesondere wendet es sich damit auch gegen die verbreitete Vorstellung eines räumlichen Aufmerksamkeitsfensters oder –scheinwerfers, der die Szene „absucht“. Statt dessen werden alle Objektmerkmale, also auch Konjunktionen, unabhängig und parallel im gesamten visuellen Feld enkodiert und mit den zu suchenden Zielreizmerkmalen verglichen. Die Sucheeffizienz hängt von zwei Faktoren ab: der Ähnlichkeit zwischen Ziel- und Ablenkerobjekten (je ähnlicher sie sich sind, desto ineffizienter wird die Suche), und der Ähnlichkeit zwischen den Ablenkerobjekten untereinander (je ähnlicher sie sich sind, desto effizienter wird die Suche). Dabei beruhen die Ähnlichkeitseffekte auf Gruppierungsprozessen: Im Extremfall homogener Ablenker und eines deutlich unterschiedlichen Zielobjektes werden alle Ablenker zusammengegruppert, das Zielobjekt hingegen bleibt einzeln und wird auf Anhieb erkannt. Im anderen Extremfall großer Unterschiede zwischen den Ablenkern, aber großer Ähnlichkeit des Zielobjektes zu Einigen der Ablenkern, können nur wenige Gruppierungen stattfinden, und unter diesen wenigen ist auch noch eine „kontraproduktive“, nämlich die Zusammengruppierung des Zielobjektes mit Ablenkerobjekten.

In der Konkretisierung des Modells SERR werden diese Ideen deutlicher. Implementiert wurde es als neuronales Netzwerk zur Erkennung von Form-Zielreizen (auch Form-Konjunktionen), aber die Ideen sind leicht auf andere Merkmale übertragbar. Es wird am Beispiel einer Konjunktionssuche erklärt, in der das Suchbild aus T's in vier möglichen Orientierungen besteht (0°, 90°, 180°, 270° gedreht). Das Zielobjekt ist das auf dem Kopf stehende T. Das Modell besteht aus sechs hierarchisch organisierten und miteinander verknüpften Karten (vgl. Abbildung 7):

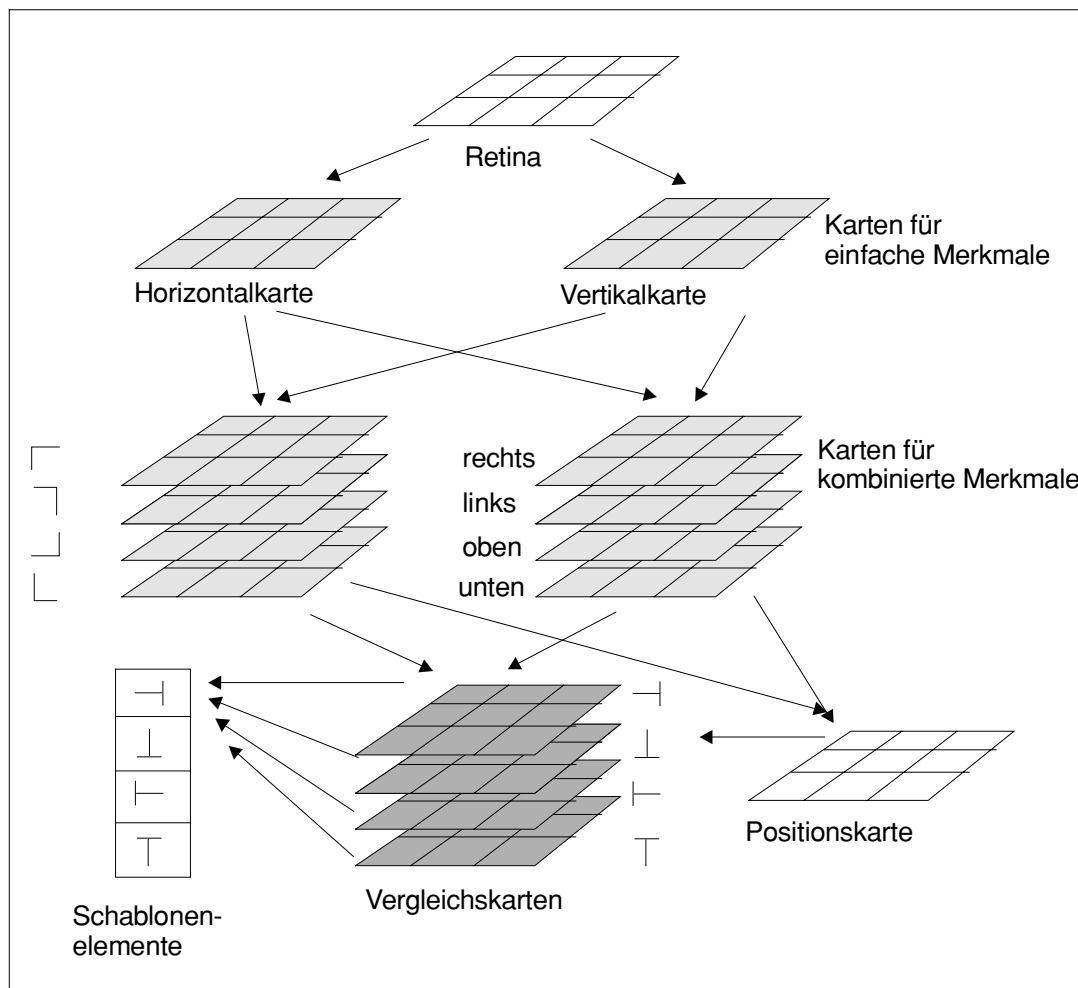


Abbildung 7. Die Architektur der SERR-Modells (nach Abbildung 1 in MÜLLER & HUMPHREYS 1994).

Die „Retina“:

Die Retina besteht aus einer Matrix von 26×26 Elementen. Wird die Retina mit einem Suchbild konfrontiert, dann werden die Elemente eingeschaltet, die mit den Positionen des Reizes korrespondieren (das Suchbild besteht immer aus weniger Elementen als die Retina).

Karten für einfache Merkmale:

Einfache Merkmale sind hier vertikale und horizontale Linienelemente, es gibt also zwei solcher Karten. Jede stellt wiederum eine (etwas kleinere) Matrix dar. Sie sind so mit der Retina verknüpft, dass ein Element auf der „Horizontalkarte“ nur dann eingeschaltet wird, wenn zwei horizontal benachbarte Elemente auf der Retina eingeschaltet sind, die entsprechenden vertikal benachbarten Elemente auf der Retina hingegen ausgeschaltet sind. Die „Vertikalkarte“ verhält sich umgekehrt. Weiterhin gibt es Interkonnektivitäten innerhalb der beiden Merkmalskarten, die die Herausbildung längerer Liniensegmente begünstigen, das unmittelbare nebeneinander Liegen paralleler Linien jedoch inhibieren.

Karten für kombinierte Merkmale:

Kombinierte Merkmale sind im vorliegenden Beispiel einerseits Linienenden, andererseits L-förmige Linienverbindungen. Da es von jeder Kategorie vier gibt (vier verschiedene Orientierungen), existieren insgesamt acht solcher Karten. Sie sind ebenfalls Matrizen und so mit den einfachen Merkmalskarten verknüpft, dass beispielsweise ein Element in der Karte für Linienenden nach unten dann eingeschaltet wird, wenn das korrespondierende Element in der Vertikalkarte eingeschaltet und das unmittelbar darunter liegende ausgeschaltet ist. Ein Element in einer Karte für L-Verbindungen wird eingeschaltet, wenn das korrespondierende Element sowohl in der Vertikal- als auch der Horizontalkarte eingeschaltet ist. Interkonnektivitäten innerhalb der einzelnen Karten begünstigen wiederum eine Ausbreitung der Aktivierung, die mit dem kodierten Merkmal kompatibel ist (z.B. Verlängerung der Arme des L) und inhibieren Elemente, die das Merkmal zerstören würden. Die „Bottom-Up“-Verarbeitung des Reizes ist an dieser Stelle beendet.

Vergleichskarten:

Vergleichskarten dienen dazu, das bisher erstellte Aktivierungsmuster in den acht kombinierten Merkmalskarten mit den zur Entscheidung anstehenden Objekten zu vergleichen. Sie sammeln gewissermaßen Evidenz für oder gegen die zur Auswahl stehenden Objekte (die vier T's) an den einzelnen Positionen. Für jedes der vier Objekte existiert eine Vergleichskarte, in der jedes Element mit einem Bereich von 5×5 Elementen aus den kombinierten Merkmalskarten verknüpft ist. Jede Vergleichskarte ist auf eines der vier T's voreingestellt. Bildlich gesprochen werden die Vergleichskarten über die kombinierten Merkmalskarten gelegt. Ein Element der Vergleichskarte wird positiv „aufgeladen“ vom 5×5 -Bereich einer kombinierten Merkmalskarte, wenn der Inhalt des Bereiches (Linienende bzw. L-Verbindung) kompatibel mit dem jeweiligen T ist, und es wird negativ „aufgeladen“ von inkompatiblen Elementen. Außerdem vermitteln die Vergleichskarten durch Verknüpfungen innerhalb jeder Karte auch Gruppierungen gleichartiger T's im Suchbild.

Positionskarte:

Die Positionskarte ist ebenfalls eine Matrix, deren Elemente die Verbindung zwischen kombinierten Merkmals- und Vergleichskarten vermitteln. Insbesondere verhindern sie, dass sich zwei oder mehr Objekte in überlappenden 5×5 -Bereichen befinden.

Schablonenelemente:

Für jedes Objekt (die vier T's) existiert ein Schablonenelement, das keine räumliche Matrix darstellt, sondern ein kategorielles Element ist. Die vier Schablonen konkurrieren miteinander, da in jeder Iteration des Netzwerkes nur eine im Wert erhöht werden kann. Jede Schablone ist mit allen Elementen aller Vergleichskarten so verknüpft, dass sie positiv aufgeladen wird von Elementen der passenden Vergleichskarte und negativ von den Elementen der drei inkompatiblen Vergleichskarten. Überschreitet der Wert einer Schablone eine bestimmte Schwelle, so „feuert“ sie. Dadurch werden alle zu dieser Schablone passenden Elemente der Vergleichskarte inhibiert, d.h. gelöscht und aus der Suche entfernt. Handelte es sich um das Zielobjekt, gilt es als gefunden und die Suche ist beendet. Wenn nicht, geht das Netzwerk in eine weitere Iteration. Es stoppt spätestens, wenn das Suchbild leer ist, und entscheidet dann auf „kein Zielobjekt“. Auf die geschilderte Weise können gleichartige Ablenker gruppenweise abgelehnt werden oder gleichartige Zielobjekte in Gruppen erkannt werden. Je mehr Objekte einer Kategorie vorhanden sind, desto „stärker“ ist die Gruppierung, und desto eher feuert die entsprechende Schablone.

MÜLLER, HUMPHREYS & DONNELLY (1994) verglichen die Leistung von SERR mit denen von Versuchspersonen. Zur Modellanpassung wurde jeder Netzwerkkiteration ein konstanter Zeitbetrag zugewiesen. Die Modellanpassung war zunächst schlecht, da SERR zu viele Fehler machte. Nach dem Einbau eines „Fehlerprüfungsmechanismus“ konnten die psychophysikalischen Daten aber sehr gut nachgebildet werden. Leistungen in der Form-Konjunktionssuche wurden erfolgreich modelliert. SERR führte weiterhin zu modellspezifischen Vorhersagen bezüglich Suchaufgaben mit einem und zwei Zielobjekten, die durch psychophysikalische Experimente bestätigt werden konnten. Keines der bisher geschilderten Modelle konnte diese Ergebnisse erklären. Auch die von DUNCAN & HUMPHREYS (1989) propagierten Ähnlichkeitsgradienten (s.o.) wurden durch das Modell nachgebildet.

In SERR gibt es keinen Aufmerksamkeits-„scheinwerfer“ oder „-fokus“, der die Szene seriell absucht. Statt dessen werden alle Elemente parallel verarbeitet. Diese Annahme erscheint auf den ersten Blick kontraintuitiv zum natürlichen Suchverhalten, bei dem man den Blick und damit die Aufmerksamkeit über die Szene bewegt. Hier ist jedoch anzumerken, dass SERR die Funktionsweise der verdeckten Aufmerksamkeit modelliert, d.h. die Verarbeitung während einer Fixation. Das Modell ist nicht geeignet, die Verlagerung der Aufmerksamkeit zu beschreiben, die üblicherweise stattfindet, um einen Blicksprung (Sakkade) vorzubereiten (DEUBEL & SCHNEIDER 1996).

Das größte Problem von SERR muss aber wohl darin gesehen werden, dass eine Objekterkennung auf der Basis von Schablonen in der hier implementierten Form kaum auf alle perceptuellen Merkmale und Dimensionen auszudehnen ist. Der Rechen- und Speicheraufwand würde auf nicht mehr beherrschbare Größen ansteigen, und es erscheint unwahrscheinlich, dass das menschliche Gehirn, dessen Arbeitsweise hier modelliert werden soll, ihn bewältigen könnte. Trotzdem muss festgehalten werden, dass dieses Modell am anspruchsvollsten ist, was den Tiefgang der Erklärung (auf Neuronenebene) angeht.

2.1.5 GROSSBERGS SOS-Modell

Das SOS-Modell („Spatial and Object Search“) von GROSSBERG, MINGOLLA & ROSS (1994) stellt einen weiteren Versuch dar, Gruppierungsprozesse bei der Suche zu berücksichtigen. Insbesondere soll es auch visuelle Suchleistungen in natürlichen Szenen erklären, welche gegenüber den üblichen Laborexperimenten weitaus höhere Anforderungen an die visuelle Verarbeitung stellen. In der Gegenüberstellung von Modellen mit einer seriellen Stufe, in der die Aufmerksamkeit von Objekt zu Objekt wandert, und dem einstufigen, parallelen Modell SERR nimmt SOS gewissermaßen eine Zwischenstellung ein: Die Aufmerksamkeit wandert hier von Gruppe zu Gruppe.

Der SOS-Algorithmus besteht aus vier Stufen (vgl. Abbildung 8):

In Stufe 1 wird die visuelle Szene präattentiv verarbeitet. Das Ergebnis dieser Stufe sind retinotop Repräsentationen von Reizmerkmalen, im Grunde also Merkmalskarten. In Stufe 2 operiert auf diesen Merkmalskarten ein Segmentierungsalgorithmus. Aufgrund von Kantendetektion und Herausbildung von Flächen wird des retinotop Feld in Teilregionen zerlegt. Grundlage für die Segmentierung und Flächenbildung ist der bereits früher von GROSSBERG (1994) entwickelte Algorithmus FACADE („Form-And-Color-And-Depth Information“), der

sich an neuronale Gegebenheiten der menschlichen Informationsverarbeitung anlehnt. Im Ergebnis bilden Regionen mit gleichen Reizmerkmalen (z.B. Objekte der Farbe Blau) dann eine Gruppe, wenn ihr Verbindungspfad nicht von Objekten mit einem anderen Merkmal unterbrochen wird (Abbildung 9). Die Gruppierung enthält zwei freie Parameter: zum einen die hierfür relevante Breite P des Verbindungspfades als Funktion der Objektdurchmesser (für $P = 1,5$ z.B. ist er 1,5mal so breit wie der Durchmesser der Objekte). Zum anderen werden auf Zufallsbasis nicht alle der möglichen Gruppierungen hergestellt. Die Gruppierung ist um so besser ausgeprägt, d.h. der Anteil ausgelassener Möglichkeiten ist um so geringer, je größer der Kontrast des betreffenden Merkmals zum Hintergrund ist. Der Anteil weggelassener Verbindungen wird mit C bezeich-

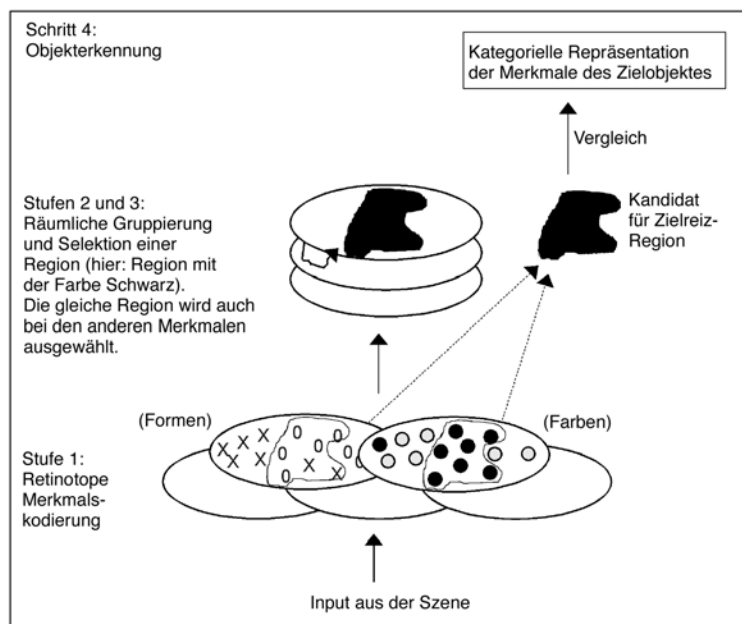


Abbildung 8. Die Funktionsweise des SOS-Modells. Vereinfachte Darstellung ohne Rekursionen nach GROSSBERG, MINGOLLA & ROSS (1994.)

net. Die in Stufe 2 bestimmten Regionen stellen Kandidaten für Regionen dar, in denen im Folgenden das Zielobjekt gesucht wird. Die Autoren merken an, dass die in Stufe 2 gebildeten Regionen häufig den einzelnen Objekten in Laborsuchbildern gleichzusetzen sind. Der Algorithmus würde in solchen Fällen also erst mit Stufe 3 beginnen. In Stufe 3 wird eine der Regionen als Kandidat für die Suche nach dem Zielobjekt ausgewählt. Diese Auswahl kann durch strategische Kontrolle („Top-Down“) beeinflussbar sein. In Stufe 4 schließlich findet die Suche statt: Innerhalb der ausgewählten Region werden alle Merkmalsgruppierungen mit der gespeicherten Repräsentation des Zielobjektes verglichen. Es gibt drei mögliche Ergebnisse: a) Das Zielobjekt wird gefunden. Damit ist die Suche beendet. b) Keines der Merkmale innerhalb der Region stimmt mit dem Zielobjekt überein. Dann wird eine andere Region ausgewählt (Rückkehr zu Stufe 3). c) Einige Merkmale innerhalb der Region stimmen überein, andere nicht. Dann ist es nötig, die Region weiter zu unterteilen (Rückkehr zum Segmentierungsmechanismus in Stufe 2).

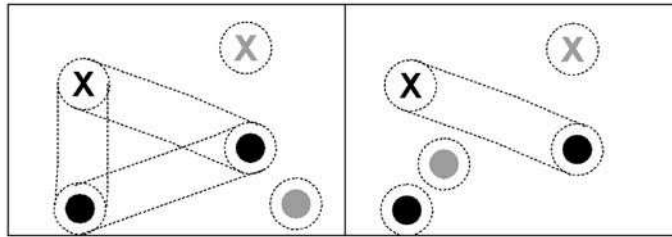


Abbildung 9. Gruppierung von Objekten gleicher Farbe. Links: Drei Objekte werden verbunden. Rechts: Nur zwei der Objekte können gruppiert werden, da der Verbindungspfad zum dritten durch eine andere Farbe unterbrochen wird. Nach GROSSBERG, MINGOLLA & ROSS (1994).

Die Reaktionszeit wird dabei folgendermaßen modelliert: Auf der Basis des physikalischen Suchbildes wird nach geeigneter Festlegung der Parameter P und C (s.o.) die Gruppierung vorgenommen und die Anzahl der Regionen N bestimmt. Die Reaktionszeit setzt sich zusammen aus einer konstanten Zeit R , die als Zeitdauer der Stufe 1 angenommen wird, und einer von N abhängigen Zeitdauer. Letztere besteht aus Vielfachen der Segmentationsdauer S plus der Vergleichsdauer M , je nachdem, wie oft Segmentierung und Vergleich wiederholt werden müssen. Im Mittel ergeben sich folgende Reaktionszeitgleichungen:

$$RT = \begin{cases} R + k \cdot \frac{N+1}{2} \cdot (S + M) & \text{für Durchgänge mit Zielobjekt} \\ R + N \cdot k \cdot (S + M) & \text{für Durchgänge ohne Zielobjekt} \end{cases}$$

k ist dabei die Anzahl der Rekursionen und beträgt in einer Konjunktionssuche aus zwei Merkmalen üblicherweise 2, muss aber nicht identisch mit der Zahl der Stimulusdimensionen sein.

Es gelang den Autoren, für eine Vielzahl visueller Suchexperimente aus der Literatur (Merkmalssuche, Konjunktionssuche mit verschiedenen vielen Dimensionen und verschiedenen vielen Zielobjekten) die Parameter so zu bestimmen, dass das Modell die psychophysikalischen Ergebnisse replizierte. Die dabei erhaltenen Parameterwerte erschienen plausibel, S und M ließen sich jedoch in den meisten Fällen nicht trennen. Ein Vorteil des Modells ist sein Geltungsbereich, der sich insbesondere auf natürliche Szenen erstreckt. Hier liefert der Segmentationsalgorithmus die natürlichen Objekte. Es ist dabei möglich, sowohl nach Objekten als auch nach Merkmalen oder Teilen von Objekten zu suchen. Bezüglich der typischen Laboraufgaben stellt sich jedoch die Frage nach der Spezifität und damit der selektiven Testbarkeit des Modells: Wenn hier, wie die Autoren behaupten, die Regionen identisch mit den Objekten sind, sind obige Gleichungen in der Modellrechnung äquivalent zu den alten STERNBERG'schen Reaktionszeitgleichungen (Abschnitt 2.1.1). Die Autoren postulieren zwar einen Rekursionsfaktor k , dieser ist rechnerisch jedoch konfundiert mit der Zeitdauer $(S + M)$ für die einzelnen Schritte.

2.2 Aktuelle Forschungsfragen

An dieser Stelle soll nur ein kurzer Überblick über eine Reihe kontrovers diskutierter Fragestellungen gegeben werden. Die unterschiedlichen Positionen werden hier nicht diskutiert und nur beispielhaft Referenzen angegeben. Solche Probleme, die für den Fortgang dieser Arbeit bedeutsam sind, werden an gegebener Stelle eingehender behandelt. Einige der im Folgenden genannten Positionen sind in den oben referierten Modellen enthalten und dort teilweise unterschiedlich implementiert, so dass die Problematik bereits angesprochen wurde. Andere konträre Annahmen wurden bisher lediglich in Einzelexperimenten untersucht. Die wesentlichen aktuellen Forschungsfragen sind:

- Insgesamt hat die visuelle Aufmerksamkeit nur eine begrenzte Verarbeitungskapazität. Aber an welcher Stelle im Prozess befindet sich der „Flaschenhals“, d.h. auf welcher Verarbeitungsebene findet eine Selektion statt? Während die meisten Autoren einen zweistufigen Prozess annehmen, bei dem eine frühe Verarbeitungsstufe noch über unbegrenzte Kapazität verfügt, die spätere jedoch begrenzt ist („early selection“, z.B. TREISMAN & GELADE 1980; WOLFE 1994), gehen DUNCAN & HUMPHREYS (1989) sowie das SERR-Modell (HUMPHREYS & MÜLLER 1993) von einer einstufigen Verarbeitung aus, an deren Ende das Zielobjekt ausgewählt wird („late selection“).
- Unter der Annahme einer zweistufigen Verarbeitung stellt sich die Frage, welche Merkmale bereits auf der präattentiven Stufe verarbeitet werden und welche erst attentiv. Während bezüglich einer Reihe von Merkmalen, z.B. Farbe und Helligkeit, Einigkeit herrscht, dass sie präattentiv zugänglich sind, wird beispielsweise über die präattentive Verarbeitung von Formmerkmalen kontrovers diskutiert (vgl. den Überblicksartikel von WOLFE 1996).
- Gibt es einen qualitativen Unterschied zwischen serieller Suche und Pop-Out-Suche? Während TREISMAN & GELADE (1980) explizit einen solchen annehmen, stellt im *Guided-Search*-Modell (WOLFE 1994) die Pop-Out-Suche eigentlich nur einen Spezialfall der seriellen Suche dar, insofern, dass auch hier die Aufmerksamkeit auf das Zielobjekt verlagert wird, jedoch gleich im ersten Schritt.
- Ist die Metapher eines Aufmerksamkeitsfokus (TREISMAN & GELADE 1980) zutreffend, der einen Ausschnitt der visuellen Szene selektiv moduliert, oder findet eine gleichartige Verarbeitung im gesamten visuellen Feld statt? DUNCAN & HUMPHREYS (1989) sowie das SERR-Modell (HUMPHREYS & MÜLLER 1993) nehmen Letzteres an, lehnen also die Existenz eines Aufmerksamkeitsfokus ab.
- Wenn es einen Aufmerksamkeitsfokus gibt, wie ist seine Geometrie? Ist er kreisförmig mit fester Größe („Scheinwerfer“, TREISMAN & GELADE 1980), mit variabler Größe („Zoom-Linse“, ERIKSEN 1985), hat er eine beliebige, allerdings konvexe oder zumindest zusammenhängende Form, oder ist er möglicherweise sogar teilbar (MÜLLER & HUMPHREYS 1991)? Für Letzteres wäre der Begriff „Fokus“ allerdings kaum noch zutreffend.

-
- Ist es sinnvoll, zwischen Positionen und Objektmerkmalen zu unterscheiden, oder ist die Position eines Objektes besser als ein weiteres, gleichwertiges Merkmal zu betrachten – d.h., werden Positionen anders verarbeitet als Merkmale oder nicht? Während die älteren Aufmerksamkeitstheorien keine spezielle Rolle der Position annehmen (BROADBENT 1958; KAHNEMAN 1973) und auch DUNCAN (1981) eine solche ablehnt, kommt VAN DER HEIJDEN (1993) in einem umfangreichen Überblicksartikel zu dem gegenteiligen Ergebnis, das inzwischen durch neurowissenschaftliche Befunde gestützt wird (vgl. Kapitel 8 dieser Arbeit).
 - Wie ist das Verhältnis zwischen automatischer Zielreizentdeckung, d.h. einer exogen gesteuerten Aufmerksamkeitsverlagerung, und einer kontrollierten Suche, d.h. endogen gesteuerten Aufmerksamkeitsverlagerungen? MÜLLER & RABBITT (1989) nehmen hier zwei getrennte Mechanismen mit unterschiedlicher Zeitdauer an. Ist es insbesondere möglich, normalerweise automatische Aufmerksamkeitszuwendungen strategisch zu kontrollieren? Während TREISMAN & SATO (1990) und WOLFE (1994) von einer Top-Down-Steuerung der zu beachtenden Merkmale ausgehen, konnte THEEUWES (z.B. 1992) mehrfach zeigen, dass ein in einer irrelevanten Dimension salientes Objekt nicht ignoriert werden kann. Häufig finden sogar automatische Sakkaden dorthin statt (THEEUWES, KRAMER & ATCHLEY 1999).
 - Verfügt die visuelle Suche über ein „Gedächtnis“ – d.h., merkt man sich einmal abgeseuchte Positionen, oder werden diese beliebig oft wieder geprüft? Nachdem diese Frage bereits in den 60er Jahren auf der Basis kumulativer Reaktionszeitverteilungen zu beantworten versucht worden war, ist die Diskussion vor Kurzem durch die Arbeit von HOROWITZ & WOLFE (1998) wiederbelebt worden. Zu Einzelheiten vgl. Kapitel 6 dieser Arbeit.
 - Wie lange dauert die Verlagerung der Aufmerksamkeit? WARD & DUNCAN (1996) berichten hier Zeiten von bis zu 500 ms, während SAGI & JULESZ (1985) hier Werte von 17 – 33 ms angeben.
 - Ist die Zeitdauer der Verlagerung von ihrer Länge abhängig, unabhängig oder bewegt sich die Aufmerksamkeit sprunghaft (im Sinne eines Wechsels zwischen zwei Zuständen), ohne dafür überhaupt Zeit zu benötigen (vgl. hierzu den Überblicksartikel von EGETH & YANTIS 1997)?
 - Wie lange werden die einzelnen Objekte bei der visuellen Suche betrachtet? Hängt diese Zeitdauer von der Beschaffenheit der Objekte ab, wie beispielsweise HOOGE & ERKELENS (1996) oder DEHAENE (1989) behaupten, oder nicht?
 - Wie unterscheidet sich die visuelle Suche mit Augenbewegungen von der ohne Augenbewegungen – abgesehen von den Sensitivitätsunterschieden im fovealen, parafovealen und peripheren Bereich? Während KLEIN & FARRELL (1989) mit und ohne Augenbewegungen keine Reaktionszeitunterschiede fanden, war im Experiment von ZELINSKY & SHEINBERG (1997) die Suche ohne Augenbewegungen etwas effizienter.
 - Die meisten Modelle (z.B. *Guided Search*) modellieren lediglich das Finden vorhandener Zielobjekte. Wie werden jedoch Durchgänge ohne Zielreiz verarbeitet? Wird wirklich erschöpfend gesucht, wie lange Zeit angenommen wurde, oder beenden Versuchspersonen

die Suche vorzeitig, um Zeit zu sparen? Wenn ja, nach welchen Kriterien geschieht dies? CHUN & WOLFE (1996) fanden hier einen sogenannten „staircase“-Mechanismus, in dem die Versuchsperson ihr Kriterium immer wieder veränderte, je nachdem, ob sie Fehler machte oder nicht.

- Gibt es Unterschiede in der visuellen Suche in Abhängigkeit von räumlichen Positionen, oder funktioniert die Suche überall im visuellen Feld gleich gut? Die meisten Autoren vernachlässigen das Problem. EFRON & YUND (1996) konnten solche räumlichen Unterschiede jedoch nachweisen.

Diese Übersicht erhebt sicher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. So sind beispielsweise Fragen nach Einflüssen der Geometrie des Suchbildes (Größe, Exzentrizität und Verteilung der Objekte) unerwähnt geblieben; ebenso auch die Frage, wie unbekanntes im Gegensatz zu bekannten Zielobjekten gesucht werden (z.B. Wechsel des Merkmals / Wechsel der perceptuellen Dimension), oder das Problem des „Inhibition of Return“ (IOR), das sich damit beschäftigt, ob und wie bereits abgesuchte Positionen inhibiert werden. Dem Leser mögen eine Reihe weiterer, bereits untersuchter oder untersuchenswerter Fragestellungen einfallen.

Kapitel 3

Fragestellung

3.1 Präzisierung der Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit soll es sein, eine Technik zu entwickeln, mit der Suchstrategien individueller Personen qualitativ und quantitativ bestimmt werden können. Dazu soll auf die geschilderten formalen Modelle aufgebaut und dies nötigenfalls modifiziert und erweitert werden. Das Schwergewicht soll dabei allerdings nicht so sehr auf der Formulierung eines neuen Modells liegen, das im Geltungsbereich womöglich über die bisher existierenden hinausgeht. Statt dessen soll anhand einer recht simplen Klasse von Suchaufgaben versucht werden, ein Modell so weit zu konkretisieren und ein experimentelles Paradigma dazu zu entwickeln, mit dem es möglich wird, die Suchschritte sowohl qualitativ zu spezifizieren als auch die beteiligten Subprozesse quantitativ so weit wie möglich aufzulösen. Insbesondere soll die Art der Suchschritte bestimmt werden, ihre Abfolge, ihre Anzahl und ihre Zeitdauer. Dies soll mit Reaktionszeitgleichungen geschehen, deren Parameter an empirische Reaktionszeiten angepasst werden.

Die Ergebnisse sollen zum einen zur Klärung einiger offener Forschungsfragen beitragen, beispielsweise der für alle Modelle zentralen Frage, welches die einzelnen Schritte einer Suche sind, und was innerhalb dieser Schritte abläuft: Werden die Objekte einzeln geprüft, wobei sich unterschiedliche Sucheffizienzen lediglich aufgrund unterschiedlicher Prüfwahrscheinlichkeiten (CAVE & WOLFE 1990; WOLFE 1994) oder unterschiedlicher Zeitdauern der Prüfung (z.B. HOOGE & ERKELENS 1996) ergeben, oder werden Objekte in Gruppen geprüft (z.B. TREISMAN & GORMICAN 1988; GROSSBERG, MINGOLLA & ROSS 1995)? Ist eine Pop-Out-Suche etwas qualitativ Anderes als eine serielle Suche (TREISMAN & GELADE 1980) oder stellt sie einen Spezialfall der seriellen Suche mit nur einem Suchschritt dar (WOLFE 1994)? Wie lange dauern Aufmerksamkeitsverlagerungen und das Prüfen der Objekte (die Aufmerksamkeitsverweildauer)? Sind diese Werte konstant oder aufgabenabhängig?

Zum anderen bietet eine solch explizite Bestimmung individueller Suchstrategien verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. In den Neurowissenschaften kann eine präzise Modellierung eines psychologischen Prozesses dazu verwendet werden, mit Hilfe bildgebender Verfahren neuronale Korrelate für einzelne Teilprozesse zu bestimmen. In der neuropsychologischen Klinik ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten für eine prozessorientierte Diagnostik

von Aufmerksamkeitsstörungen. Beide genannten Möglichkeiten werden in dieser Arbeit untersucht.

3.2 Probleme der traditionellen Reaktionszeitanalyse

Zur Bestimmung visueller Suchstrategien aus Reaktionszeiten wird üblicherweise die Steigung der Reaktionszeitkurve bei zunehmender Objektanzahl analysiert. Obwohl diese Steigung (Anstieg pro zusätzlichem Objekt) „Suchrate“ genannt wird, erlaubt dies nicht die Schlussfolgerung, dass die Objekte tatsächlich einzeln mit dieser Zeitdauer verarbeitet werden. Dieselbe Steigung könnte sich aus einer Verarbeitung der Objekte in Gruppen ergeben, wobei dann die für jede Gruppe aufgewendete Zeitdauer länger wäre. In der Steigung sind Informationen über die Anzahl der Schritte und deren Zeitdauer konfundiert. Bereits 1971 merkte TOWNSEND an, dass ein linearer Reaktionszeitanstieg nicht notwendigerweise aus einer seriellen Suche hervorgegangen sein muss, sondern auch einen parallelen Prozess mit begrenzter Kapazität reflektieren kann. Weiterhin ist es allein aufgrund der Steigung nicht möglich, die Verweildauer der Aufmerksamkeit von der Verlagerungsdauer zu trennen. Ein weiteres Problem liegt darin, dass jede Interpretation der Steigung nur dann gültig sein kann, wenn die Versuchsperson ihre Suchstrategie nicht mit zunehmender Objektanzahl ändert. Es gibt keinen Grund, weshalb das der Fall sein sollte. Im Gegenteil sind individuelle Reaktionszeitverläufe häufig nichtlinear oder nicht einmal monoton (z.B. bei DUNCAN & HUMPHREYS 1989, experimentelle Ergebnisse). WOLFES (1994) *Guided-Search*-Modell nimmt sogar einen expliziten Einfluss der Objektanzahl und –anordnung auf die Aktivierungskarte und damit auf die Suchstrategie an (vgl. Abschnitt 2.1.3, Gleichung (1)).

Die zweite Größe, aus der gerne Schlussfolgerungen über die Strategie gezogen werden, ist das Verhältnis der Steigungen zwischen Durchgängen mit und ohne Zielobjekt. Ein 1:2-Verhältnis wird dabei als Indikator für eine serielle Suchstrategie gewertet. Dies gilt jedoch nur, wenn mit „seriell“ „streng seriell“, d.h. „ein Objekt zur Zeit“, gemeint ist, und wenn die Suche selbstterminierend im positiven Fall und erschöpfend im negativen Fall ist. Ob und wann die erste Annahme gilt, ist eine der Fragestellungen der vorliegenden Arbeit. Die zweite Annahme wurde bereits von CHUN & WOLFE (1996) widerlegt: Eine Versuchsperson bricht eine erfolglose Suche oft bereits ab, bevor sie auch noch das letzte Objekt geprüft hat, um ihre Suchzeit zu optimieren. Insgesamt ist inzwischen eine große Bandbreite empirischer Steigungen und Steigungsverhältnisse zusammengetragen worden (WOLFE 1998). Es gibt dabei keinerlei theoretische Annahmen, wie andere Verhältnisse als das 1:2-Steigungsverhältnis zu interpretieren sind.

Ein drittes Maß, das allerdings bisher nur selten ausgewertet wurde, ist die Varianz der Reaktionszeiten als Funktion der Objektanzahl. Eine ansteigende Varianz kann dahin gehend interpretiert werden, dass irgendeine Art von seriellen Prozess an der Suche beteiligt sein muss - da es dann einen Unterschied macht, ob das Zielobjekt zufälligerweise im ersten oder im letzten Schritt gefunden wird. Eine nähere Bestimmung, welcher Art diese Serialität ist, erlaubt die Varianz jedoch nicht. Die Problematik ist mehr oder weniger dieselbe wie bei der Steigung.

CHEAL & LYON (1992) verwendeten eine Kombination der drei Methoden, um zu untersuchen, ob es mehr Klassen von Suchstrategien gibt als nur die streng serielle und die parallele

Suche, und fanden mehrere sogenannte „Zwischenklassen“. Um deren Beschaffenheit jedoch genauer zu klären, ist ein anderer Ansatz der Reaktionszeitanalyse nötig.

Kapitel 4

Reaktionszeitmodelle: Grundidee und erste Modellvariante

4.1 Reaktionszeitmodelle der visuellen Suche

4.1.1 Grundidee

Die Grundidee der hier entwickelten Reaktionszeitmodelle besteht darin, Reaktionszeiten in Suchaufgaben in die Zeiten aufeinanderfolgender Suchschritte zu zerlegen. Welches die einzelnen Suchschritte sind und von welchen Aufgabenbedingungen sie in welcher Weise abhängen, wird in Modellannahmen formuliert. Die Modellannahmen stützen sich auf vorhandene und weiterzuentwickelnde theoretische Konzepte über die Art und die Interaktion der zu Grunde liegenden kognitiven Prozesse. Entsprechend den Modellannahmen wird ein Reaktionszeitmodell dann in Form einer Reaktionszeitgleichung formuliert. Diese enthält Parameter für die Aufgabeneigenschaften (z.B. Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Ablenkern, Anzahl und geometrische Anordnung der Objekte) und für Verarbeitungseigenschaften der Versuchsperson (z.B. Verlagerungsdauer der Aufmerksamkeit, Verweildauer der Aufmerksamkeit, Dauer der motorischen Reaktion). Bei Realisierung einer geeigneten Vielzahl von Aufgabenbedingungen können die Parameter geschätzt werden, indem das Reaktionszeitmodell numerisch an die empirischen Reaktionszeiten angepasst wird. Aufgrund der Parameterschätzungen ist es dann möglich, die Suchstrategien in den einzelnen Aufgabenbedingungen hinsichtlich ihrer Effizienz zu klassifizieren.

Die Bewertung konkurrierender Modelle - und damit konkurrierender theoretischer Konzepte der visuellen Suche - gründet sich sowohl auf die statistische Güte der Modellanpassung als auch auf inhaltliche Kriterien bezüglich der geschätzten Parameter und Suchstrategien: Die geschätzten Parameterwerte sollten „psychologisch valide“ sein, d.h. ihre Relationen zueinander sollten die Relationen der entsprechenden Aufgabenbedingungen widerspiegeln. (Je schwieriger beispielsweise der Zielreiz von den Ablenkern zu unterscheiden ist, desto länger sollte die geschätzte Verweildauer der Aufmerksamkeit sein.) Die Schätzungen für die Suchstrategien sollten verträglich sein mit einem Kontinuum von Sucheffizienzen mit den beiden Polen *Pop-Out* und *serielle Suche*. Ein gutes Modell sollte beispielsweise Suchstrategien, die einen flachen Reaktionszeitverlauf haben, als *Pop-Out-Suche* klassifizieren.

Mit der Entscheidung für eines der konkurrierenden Modelle sind die Suchstrategien jeder Versuchsperson bestimmt: Die Beschaffenheit und die Abfolge der Suchschritte ist in den Modellannahmen enthalten, und ihre Anzahl und Zeitdauer in den geschätzten Parameterwerten.

Die Bestimmung der Suchstrategien ermöglicht Schlussfolgerungen und Entscheidungen über einige kontrovers diskutierten Fragen der Aufmerksamkeitsforschung: Werden Objekte einzeln geprüft oder gruppenweise, ist die Pop-Out-Suche ein Spezialfall der seriellen Suche oder etwas qualitativ Anderes, und wie sind die zeitlichen Charakteristika der Verlagerung und des Verweilens der Aufmerksamkeit? Darüber hinaus könnte eine genaue Beschreibung der Suchstrategien einzelner Versuchspersonen im klinischen Bereich Anwendung finden, beispielsweise bei der differentiellen Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen.

4.1.2 Geltungsbereich

In der vorliegenden Arbeit ist der Geltungsbereich der Modelle recht beschränkt. Als Geltungsbereich wird eine Klasse von Suchaufgaben festgelegt, in der nur wenige Aufgabenbedingungen variieren, so dass die Anzahl der Modellparameter auf ein vernünftiges Maß reduziert werden kann. Allerdings ermöglicht selbst ein so beschränktes Paradigma bereits grundlegende Entscheidungen zwischen kontrovers diskutierten Vorstellungen über die Funktionsweise der visuellen Aufmerksamkeit. Wenn ein Modell gefunden ist, das für die vorgegebene Klasse von Suchaufgaben gilt, kann der Anwendungsbereich schrittweise erweitert werden und geprüft werden, welche der Modellannahmen auch für andersartige Suchaufgaben gelten. In der vorliegenden Arbeit beziehen sich alle Modelle auf die im folgenden beschriebene Klasse von Suchaufgaben:

- Das Zielobjekt unterscheidet sich von den Ablenkerobjekten in nur einer perzeptuellen Dimension (Merkmalsuche).
- Die Ablenkerobjekte sind homogen.
- Der Versuchsperson ist das Zielobjekt bekannt. Durchgänge mit gleichem Zielobjekt werden in Blöcken zusammengefasst dargeboten.
- Jedes Bild enthält höchstens ein Zielobjekt.
- Nur positive Durchgänge werden modelliert (d.h. Durchgänge, in denen ein Zielobjekt vorhanden ist und entdeckt wird).
- Alle Objekte haben den gleichen räumlichen Abstand zum Fixationspunkt (dem anfänglichen Mittelpunkt der Aufmerksamkeit), und der räumliche Abstand zwischen benachbarten Objekten ist so weit wie möglich gleich. Abbildung 10 illustriert die geometrische Anordnung der Objekte.

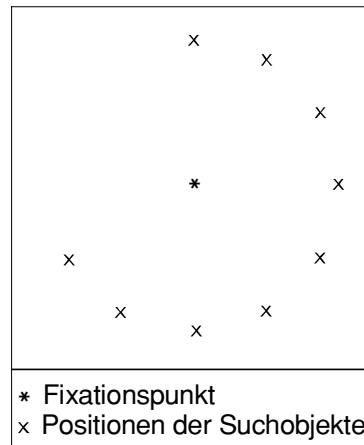


Abbildung 10: Geometrische Anordnung der Objekte im Suchbild.

Zwei Faktoren werden variiert, um ein Kontinuum von Sucheffizienzen für die numerische Modellanpassung zu erhalten:

- Die Ähnlichkeit zwischen Zielobjekt und Ablenkerobjekten in der relevanten perceptuellen Dimension und damit die Schwierigkeit der Suche. Diese Ähnlichkeit wird nur in einer „Richtung“ der Dimension variiert (z.B. in der Helligkeitsdimension nur inkrementell oder nur dekrementell).
- Die Anzahl von Objekten im Suchbild.

Die Begründungen für oben genannte Restriktionen sind die folgenden: Wenn sich das Zielobjekt in nur einer perceptuellen Dimension von den Ablenkerobjekten unterscheidet, kann das Problem, wie Dimensionen und Merkmale perceptuell kombiniert werden (z.B. TREISMAN & GELADE 1980; DUNCAN & HUMPHREYS 1989; MÜLLER, HELLER & ZIEGLER 1995), vernachlässigt werden, und die Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit kann entlang einer physikalischen Skala stufenlos variiert werden. Die Beschränkung der Variation auf eine „Richtung“ der Dimension vermeidet Probleme asymmetrischer Verarbeitung von Dekrementen und Inkrementen (TREISMAN & GORMICAN 1988). Homogene Ablenker reduzieren das Problem, inwieweit Gruppierungsprozesse die Suche bestimmen (DUNCAN & HUMPHREYS 1989). Bei Bekanntheit des Zielobjektes und blockweiser Darbietung kann man davon ausgehen, dass Einflüsse höherer kognitiver Prozesse (sogenannte „Top-Down-Einflüsse“) während jedes Blockes konstant bleiben und Fragen nach deren Natur und Interaktionsweise (CAVE & WOLFE 1990; TREISMAN & SATO 1990) somit unberücksichtigt bleiben können. Durch die feste Größe und Anordnung der Objekte werden Exzentrizitäts- und Größeneffekte kontrolliert (CARRASCO, EVERT, CHANG & KATZ 1995), und die Beschränkung auf maximal ein Zielobjekt in jedem Suchbild vermeidet Redundanzeffekte (ESTES & TAYLOR 1966). Das Modell beschränkt sich auf positive Suchdurchgänge, da für Durchgänge ohne Zielobjekt ein vollständiges zweites Modell formuliert werden müsste, basierend auf theoretischen Konzepten, wie solche sogenannten „leeren“ Suchdurchgänge verarbeitet und beendet werden (z.B. CHUN & WOLFE 1996).

4.1.3 Offene und verdeckte Aufmerksamkeit

In der Forschungstradition der visuellen Suche werden zwei unterschiedliche Paradigmen verwendet: Im Paradigma der *offenen Aufmerksamkeit* (overt attention) ist die Versuchsperson in ihren Augenbewegungen während der Suche nicht beschränkt, während sie im Paradigma der *verdeckten Aufmerksamkeit* (covert attention) einen festen Punkt im Suchbild fixiert und nur einen inneren Aufmerksamkeitsfokus, nicht jedoch die Augen bewegen darf. Während mit der *offenen* Suchaufgabe natürliches Suchverhalten untersucht werden kann, erlaubt es das *verdeckte* Paradigma, Aufmerksamkeitseffekte von Effekten der Blickbewegung zu trennen. Die Beziehungen zwischen Aufmerksamkeitsverlagerungen und Augenbewegungen sind bisher nicht vollständig geklärt. Es gibt vielfältige Evidenz, dass die Vorbereitung einer Sakkade mit einer Aufmerksamkeitsverlagerung zum Sakkadenziel einhergeht. Daraus schließen z.B. DEUBEL & SCHNEIDER (1996) auf einen gemeinsamen zugrundeliegenden Mechanismus. Vorherrschende Meinung ist zur Zeit, dass Aufmerksamkeits- und Blickbewegungen normalerweise gekoppelt sind, dass sie jedoch auch entkoppelt werden können, wenn es die Aufgabe verlangt (z. B. CORBETTA 1998; GOTTLIEB, POWELL & GOLDBERG 1999). Suchaufgaben sind Aufgaben, in denen es nicht sinnvoll ist, beides zu entkoppeln, da die Sehschärfe im fovealen Bereich am größten ist. Da in dieser Arbeit Strategien der visuellen Suche untersucht werden sollen und nicht die Modulation der Wahrnehmung durch Aufmerksamkeitseffekte, erscheint das Paradigma der *offenen* Aufmerksamkeit geeigneter. Falls die Annahme stimmt, dass bei visuellen Suchaufgaben Aufmerksamkeits- und Blickbewegungen einhergehen, müsste ein Modell, das *offene* Suchstrategien beschreibt, auch für die *verdeckte* Suche gültig sein, vermutlich mit lediglich anderen Parameterwerten. Falls die Annahme nicht zutrifft, würde das *verdeckte* Paradigma artifizielle Suchstrategien hervorrufen, deren Bedeutung für das natürliche Suchverhalten nicht abzuschätzen wäre. Da hier natürliches Suchverhalten untersucht werden soll, wird zunächst die *offene* Suche modelliert. In einem späteren Teil der Arbeit soll dann geprüft werden, inwieweit ein Modell für die *offene* Suche auch die *verdeckte* Suche beschreibt. Da nicht klar ist, ob bei der offenen Suche jede Aufmerksamkeitsverlagerung mit einer Blickbewegung verbunden ist, oder ob hier auch verdeckte Verlagerungen erfolgen, wird im Folgenden weiter von „Verlagerung“ und „Verweilen“ der Aufmerksamkeit statt explizit von „Sakkade“ und „Fixation“ gesprochen.

4.2 Erste Modellvariante

In diesem Abschnitt soll eine Modellvariante aus theoretischen Konzepten abgeleitet, explizit formuliert und an empirische Daten angepasst werden. Dieses erste Modell basiert in weiten Teilen auf dem formalen Modell *Guided Search 2.0* von WOLFE (1994, vgl. Abschnitt 2.1.3), und zwar aus den folgenden Gründen: WOLFE nimmt zwei Verarbeitungsstufen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit an: Auf eine parallele Verarbeitungsstufe, die in ihrer Kapazität unbeschränkt ist, folgt eine kapazitätsbegrenzte serielle Verarbeitungsstufe. Nur solche zweistufigen Modelle sind prinzipiell geeignet, auch die offene Suche (mit Augenbewegungen) zu beschreiben. Einstufige Modelle wie SERR (Abschnitt 2.1.4), die einen Fokus, der sich über das Bild bewegt, ablehnen, können nicht die Folge von Fixationen und Sakkaden modellieren, die bei der offenen Suche auftreten kann. Darüber hinaus ist es in der Lage, einen weiten Bereich von Phänomenen zu erklären, wie beispielsweise das vielfach beobachtete Kontinuum von Sucheigenschaften, die effiziente Entdeckung von „singleton“-Zielreizen (nicht explizit

vorgegebene, sondern aufgrund des Unterschieds zu den Ablenkern erkennbare Zielreize), Effekte der Zielreiz-Ablenker- sowie Ablenker-Ablenker-Ähnlichkeit, oder eine mögliche Änderung der Sucheffizienz bei wachsender Objektanzahl. Es gibt nur wenige widersprechende Arbeiten (z.B. ZELINSKY 1996). Der größte Vorteil für die vorliegende Arbeit ist jedoch, dass *Guided Search* explizite Formalisierungen zumindest für die parallele Verarbeitungsstufe enthält, die leicht in Modellgleichungen überführbar sind. An Stellen, die es an Explizität fehlen lassen oder die für die offene Suche unplausibel erscheinen (insbesondere in der seriellen Verarbeitungsstufe), sollen zusätzliche Annahmen ergänzt werden.

4.2.1 Modellannahmen

Die parallele Verarbeitungsstufe umfasst die Berechnung einer *Aktivierungskarte*, auf der der dann folgende serielle Prozess, das Prüfen der Objekte, operiert. Für die oben spezifizierte Klasse von Suchaufgaben (vgl. Abschnitt 4.1.2) werden die folgenden Modellannahmen aus *Guided Search 2.0* (WOLFE 1994) abgeleitet, wobei allerdings einige Punkte modifiziert werden:

Parallele Verarbeitungsstufe

Zunächst wird (in einem „Bottom-Up-Prozess“) die Aktivierung jedes Objektes in einer *Merkmalskarte*³ berechnet (vgl. Abbildung 5). Sie ist das gewichtete Mittel der Differenzen zwischen diesem Objekt und seinen Nachbarobjekten. Diese Gewichte werden von höheren kognitiven Prozessen gesetzt („Top-Down-Einfluss“). In der vorliegenden Klasse von Suchaufgaben kann hier für jeden Aufgabenblock ein konstanter Satz von Gewichten angenommen werden, da das Zielobjekt bekannt ist und gleiche Zielobjekte blockweise dargeboten werden. Daher kann jedes angesehen werden als repräsentiert durch einen „Merkmalswert“, der während einer Aufgabenbedingung (also einem Block) konstant bleibt. Aus diesen aufgabenspezifischen Merkmalswerten werden die Differenzen und deren gewichtete Mittel, also die Aktivierung des Objektes in der *Merkmalskarte*, berechnet.

Die Aktivierung eines Objektes in der *Aktivierungskarte* wird berechnet als gewichtete Summe seiner Aktivierungen in allen *Merkmalskarten*. Die Gewichte werden wiederum in einem „Top-down-Prozess“ entsprechend der Relevanz der einzelnen Merkmalskarten für die Aufgabe gesetzt. Im vorliegenden Fall, in dem Ziel- und Ablenkerobjekte sich nur in einer einzigen perzeptuellen Dimension unterscheiden, ist die *Aktivierungskarte* äquivalent zu einer der *Merkmalskarten* (derjenigen, die das zieldefinierende Merkmal repräsentiert), da alle anderen *Merkmalskarten* nur Nullen enthalten. Daher lautet die Modellannahme für die parallele Verarbeitungsstufe:

³ Mit *Karte* ist hier und im Folgenden eine kognitive Repräsentation des Raumes gemeint.

Annahme 1:

Die Aktivierung jedes Objektes in der *Aktivierungskarte* berechnet sich als gewichtetes Mittel der Differenzen zwischen den Merkmalswerten dieses Objektes und seinen Nachbarobjekten. Die Gewichte sind umgekehrt proportional zu den räumlichen Distanzen des Objektes zu den Nachbarobjekten.

Variabilität der Aktivierung und das Konzept der *Reichweite der Aufmerksamkeit*

Es ist zu erwarten, dass eine abgestufte Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit abgestufte Suche effizienzen produziert. WOLFES (1994) Modell erklärt solch unterschiedliche Effizienzen mit der Variabilität von Aktivierungen in der Aktivierungskarte allein aufgrund von Zufallsrauschen. Da diese Erklärung nicht vollständig befriedigend angesehen werden kann – dieselbe Meinung hat übrigens auch WOLFE⁴ selbst geäußert - soll hier als Erweiterung zu *Guided Search* das neue Konzept der *Reichweite der Aufmerksamkeit* eingeführt werden. Es ist vor allem geeignet, um Vorhersagen über die exakte Reihenfolge von Suchschritten in der seriellen Verarbeitungsstufe machen zu können. Insbesondere kann hiermit auch die Abnahme der Sehschärfe mit zunehmender Entfernung vom Fixationspunkt modelliert werden: In einer von Rauschen beeinflussten *Aktivierungskarte* gibt es eine Umgebung um das Zielobjekt, in der das Zielobjekt die maximale Aktivierung besitzt, innerhalb der also das Aktivierungsmaximum tatsächlich das Zielobjekt markiert (vgl. Abbildung 11). Die maximale Größe (Radius) dieser Umgebung soll als *Reichweite der Aufmerksamkeit* bezeichnet werden, da sie angibt, innerhalb welcher Reichweite die Aufmerksamkeit zuverlässig arbeitet⁵. Da diese Größe von der jeweils aktuellen Menge und Verteilung des Rauschens abhängt, unterscheidet sie sich von einem Durchgang zum nächsten, auch wenn das Suchbild physikalisch gleich bleibt. Für jedes Suchbild wird die Reichweite der Aufmerksamkeit als normalverteilt über alle Durchgänge angenommen, was sich mit der Normalverteilung von Zielreiz- und Ablenker-Aktivierung (s.o.) plausibel begründen lässt. Der Mittelwert⁶ der Verteilung der Reichweiten hängt ab von der mittleren Aktivierungsdifferenz zwischen Zielreiz und Ablenkern: Je geringer diese Differenz, desto größer die mittlere Anzahl von Ablenker-Aktivierungen, die größer als die Zielreiz-Aktivierung werden, und desto kleiner die mittlere Größe der Umgebung des Zielobjektes, innerhalb derer es die maximale Aktivierung hat - die *Reichweite der Aufmerksamkeit*.

⁴ Persönliche Kommunikation.

⁵ Das Konzept weist Übereinstimmungen auf mit der Metapher einer Zoom-Linse für die Aufmerksamkeit.

⁶ Die Begriffe „Mittelwert“ und „mittlere ...“ werden hier und im Folgenden im Sinne eines Erwartungswertes gebraucht.

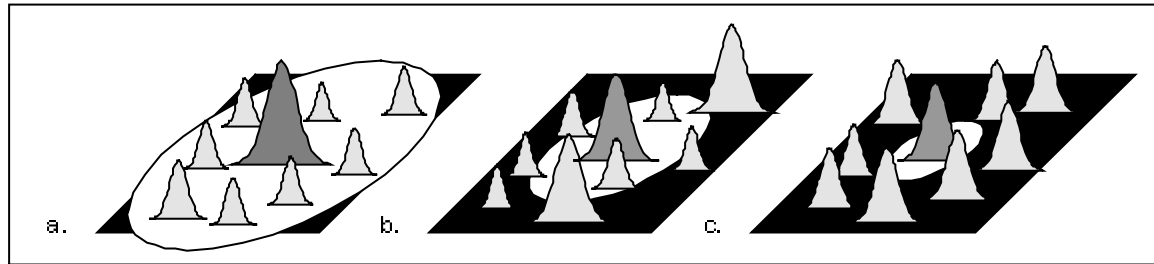


Abbildung 11. Das Konzept der *Reichweite der Aufmerksamkeit*: a. Der physikalische Zielreiz-Ablenker-Unterschied ist so groß, dass die höchste Aktivierung immer beim Zielobjekt ist. Die Reichweite der Aufmerksamkeit umfasst das gesamte Suchbild. b. Der physikalische Zielreiz-Ablenker-Unterschied ist kleiner, so dass einige Ablenker-Aktivierungen größer als die Zielreiz-Aktivierung sind. Die Reichweite der Aufmerksamkeit, innerhalb der das Zielobjekt die maximale Aktivierung hat, ist dementsprechend kleiner. c. Der physikalische Zielreiz-Ablenker-Unterschied ist so klein, dass die Aktivierung aller Ablenker so groß wie die des Zielobjektes ist und deshalb die Reichweite der Aufmerksamkeit nur ein Objekt enthält.

Damit lautet die zweite Modellannahme:

Annahme 2:

Die *Reichweite der Aufmerksamkeit* ist der größte Radius einer Umgebung des Zielobjektes in der *Aktivierungskarte*, in der die Zielreiz-Aktivierung größer ist als alle Ablenker-Aktivierungen.

Für ein Suchbild mit festen physikalischen Eigenschaften ist die *Reichweite der Aufmerksamkeit* normalverteilt über alle Durchgänge.

Der Mittelwert dieser Normalverteilung (d.h. die mittlere *Reichweite der Aufmerksamkeit*) ist proportional zur mittleren Differenz zwischen Zielreiz- und Ablenker-Aktivierungen (welche gemäß Annahme 1 errechnet werden).

Serielle Verarbeitungsstufe

WOLFE (1994) beschreibt zwei mögliche Mechanismen, wie basierend auf der Aktivierungskarte die Verlagerung der Aufmerksamkeit stattfinden könnte. Der erste ist eine rein serielle Aufmerksamkeitsverlagerung in der Reihenfolge absteigender Aktivierungen: Die Aufmerksamkeit wandert von Aktivierungsspitze zu Aktivierungsspitze, bis das Zielobjekt gefunden oder die Suche abgebrochen wird. In diesem Konzept befindet sich die Aufmerksamkeit bei jeweils nur einem Objekt zur Zeit, und jede Verlagerung benötigt Zeit. Jedoch betrachtet WOLFE selbst die Unterscheidung seriell / parallel als „somewhat fuzzy“, und skizziert als Alternative eine parallele Aufmerksamkeitszuteilung mit begrenzter Kapazität. Dieses Alternativkonzept ist bei ihm nicht so explizit ausgearbeitet; die Grundidee ist jedoch, dass Aufmerksamkeitsressourcen aufgeteilt werden zwischen Objekten, wobei die Anzahl von Objekten, die gleichzeitig beachtet werden, proportional zu ihren relativen Aktivierungen ist. WOLFE entschied sich, die erste Variante in *Guided Search* aufzunehmen, räumt jedoch ein, dass diese Entscheidung einer gewissen Beliebigkeit unterlag.

Diese Unklarheit bezüglich der seriellen Stufe lässt Raum für verschiedene Varianten eines Reaktionszeitmodells. Das hier entwickelte erste Modell folgt weitgehend der Entscheidung von WOLFE. Die folgende Modellannahme basiert auf seiner Vorstellung, wie Aufmerksam-

keit von den Aktivierungsspitzen angezogen wird, kombiniert mit dem Konzept der *Reichweite der Aufmerksamkeit*. Aus der Kombination der beiden Konzepte folgt, dass die Aufmerksamkeit dann automatisch vom Zielobjekt angezogen wird, wenn der Abstand zwischen dem Zentrum der Aufmerksamkeit und dem Zielobjekt kleiner ist als *die Reichweite der Aufmerksamkeit* (vgl. Abbildung 12).

Annahme 3:

Die Aufmerksamkeit richtet sich nacheinander auf die einzelnen Objekte in der Reihenfolge absteigender Aktivierung. Sie kann nur auf einem Objekt zur Zeit sein. Innerhalb ihrer Reichweite richtet sie sich als Erstes auf das Zielobjekt.

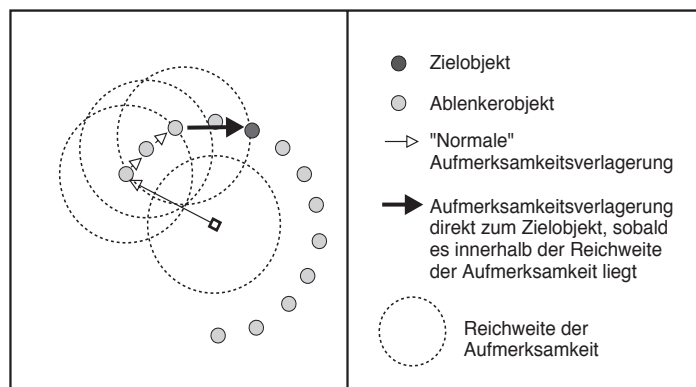


Abbildung 12: Die serielle Verarbeitungsstufe: Abfolge der Verlagerungsschritte der Aufmerksamkeit.

Für die oben (Abschnitt 4.1.2) beschriebene Klasse von Suchaufgaben führt diese Annahme je nach *Reichweite der Aufmerksamkeit* zu drei möglichen Klassen von Suchstrategien: Eine *Pop-Out-Suche*, eine *vollständig serielle Suche* und eine *teilserielle Suche*. Abbildung 13 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der *Reichweite der Aufmerksamkeit* und der Strategieklassifizierung und illustriert die Abfolge der Suchschritte bei jeder dieser Strategieklassen. Bei der Abfolge der Suchschritte wurde *Guided Search* in einem weiteren Punkt spezifiziert: Es war erstellt worden für unregelmäßige geometrische Anordnungen von Objekten im Suchbild und berücksichtigt somit keine Einflüsse geometrischer Regelmäßigkeit. Bei der hier gegebenen kreisförmigen Anordnung der Objekte ist anzunehmen, dass die Abfolge der Suchschritte nicht vollständig zufällig ist: Falls das erste geprüfte Objekt nicht das Zielobjekt ist, erscheint es plausibler, dass die Aufmerksamkeit sich als nächstes auf das Nachbarobjekt richtet, als auf ein beliebiges Objekt in der Kreisanordnung, wenn sich die Aktivierungen der Ablenker nicht überschwellig voneinander unterscheiden.

Reichweite der Aufmerksamkeit und Suchstrategie	Abfolge von Suchschritten
$r < 2e \sin(\alpha/2)$ \Leftrightarrow Vollständig serielle Suche	
$2e \sin(\alpha/2) \leq r < e$ \Leftrightarrow Teilserielle Suche	
$r \geq e$ \Leftrightarrow Pop-Out Suche	
r = Reichweite der Aufmerksamkeit e = Exzentrizität der Objekte vom anfänglichen Fixationspunkt α = Kreiswinkel zwischen benachbarten Objekten	

Abbildung 13. Zusammenhang zwischen Reichweite der Aufmerksamkeit, Suchstrategie und Abfolge der Suchschritte. Für die Bezeichnungen der Suchschritte siehe Text.

Neben der Abfolge der Suchschritte ist auch ihr Zeitverlauf wesentlich bei der Erstellung eines Reaktionszeitmodells zu berücksichtigen. Schritte, die Zeit benötigen, sind die Verlagerung der Aufmerksamkeit⁷, das Verweilen der Aufmerksamkeit sowie weitere, aufmerksamkeitsunabhängige Prozesse wie die initiale Wahrnehmung des Suchbildes, die Reaktionsauswahl oder das Drücken einer Antworttaste (zur Reaktionszeitmessung). Es wird angenommen, dass der Zeitbedarf dieser letzteren Prozesse unabhängig von den Aufmerksamkeitsanforderungen der Aufgabe ist. Deshalb werden sie im Reaktionszeitmodell aufsummiert zu einer konstanten Zeit, ohne die Diskussion zu vertiefen, ob diese Prozesse nacheinander stattfinden oder einander überlappen. Die Verweildauer der Aufmerksamkeit ist die Zeit, die ein Proband benötigt, um zu entscheiden, ob das Objekt, auf das seine Aufmerksamkeit gerade gerichtet ist, das Zielobjekt ist oder nicht („Prüfzeit“). Da die Vorstellung einer konstanten Verweildauer der Aufmerksamkeit bei unterschiedlichen Suchaufgaben in der gegenwärtigen Literatur allgemein kritisiert wird (vgl. WOLFE 1996), soll hier angenommen werden:

⁷ Anstatt von „Verlagerung“ und „Verweilen“ der Aufmerksamkeit könnte man vermutlich auch von „Augenbewegung“ und „Fixation“ sprechen. Da jedoch nicht klar ist, ob in der vorliegenden Aufgabe die Suche mit oder ohne Augenbewegungen durchgeführt wird (es wurden diesbezüglich keine Vorgaben gemacht), soll zunächst von Bewegungen der *Aufmerksamkeit* gesprochen werden. Augenbewegungen können diese begleiten.

Annahme 4:

Die Verweildauer der Aufmerksamkeit steht in umgekehrt monotoner Beziehung zum physikalischen Unterschied zwischen Ziel- und Ablenkerobjekten.

Die Verlagerungsdauer der Aufmerksamkeit ist seit über 15 Jahren kontrovers diskutiert worden. Das Hauptproblem ist, ob die Zeitdauer einer Aufmerksamkeitsverlagerung von der Länge dieser Verlagerung abhängt oder eine längenunabhängige Konstante ist. Für das erste Konzept gibt es nur wenig Evidenz (z.B. TSAL 1983), während eine wachsende Befundlage für das zweite spricht (vgl. den Überblicksartikel von EGETH & YANTIS 1997). Falls Augenbewegungen stattfinden, entspricht die Verlagerungsdauer der Sakkadendauer. Auch in diesem Fall sind nur unwesentliche Unterschiede der Sakkadendauer bei unterschiedlichen Sakkadenlängen zu erwarten, zumindest bei Längen von weniger als 5° visuellem Winkel (ABEL, TROOST & DELL'OSSO 1983). Daher wurde dem Reaktionszeitmodell zunächst das zweite Konzept zugrunde gelegt. Die Annahme lautet also:

Annahme 5:

Jede Verlagerung der Aufmerksamkeit benötigt Zeit. Die Verlagerungen sind diskret und ihre Zeitdauer ist konstant, unabhängig von der Länge der Verlagerung.

Nach diesen Entscheidungen über die relevanten theoretischen Fragen können die Modellannahmen nun leicht in Modellgleichungen überführt werden.

4.2.2 Modellgleichungen

Die Nummerierung der Gleichungen entspricht der der zugehörigen Modellannahmen im Abschnitt 4.1.2.

Die Aktivierung des Zielobjektes in der Aktivierungskarte ist (vgl. Abschnitt 2.1.3, Gleichung (1)):

$$a(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{|t-d_j|}{l(t,d_j)} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{|t-d|}{l(t,d_j)} \quad (1.1)$$

t repräsentiert den Merkmalswert des Zielobjektes, und d_j den Merkmalswert des j -ten Ablenkerobjektes, wobei d_1 der Wert des dem Zielobjekt direkt benachbarten und d_{n-1} der Wert des am weitesten entfernten Ablenkers sein soll ($j=1, \dots, n-1$, mit n als Anzahl von Objekten im Suchbild). $l(t,d_j)$ ist die räumliche Distanz zwischen Zielobjekt und j -tem Ablenker (vgl. Abbildung 14). Die zweite Gleichung in (1.1) folgt mit $d_j =: d$ für alle j wegen der Homogenität der Ablenker.

Die Aktivierung des j -ten Ablenkers ist somit

$$a(d_j) = \frac{1}{n-1} \left(\frac{|t-d_j|}{l(t,d_j)} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n-1} \overbrace{\frac{|d_i-d_j|}{l(d_i,d_j)}}{=0} \right) = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{|t-d|}{l(t,d_j)} \quad (1.2)$$

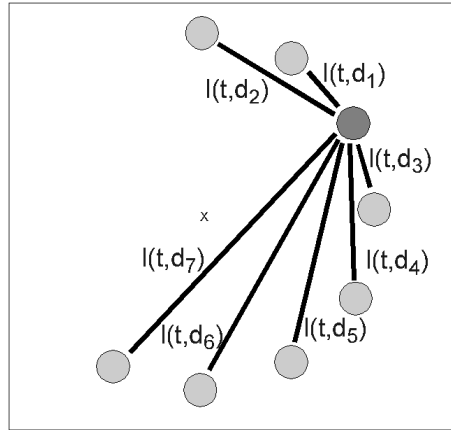


Abbildung 14. Die räumlichen Distanzen $l(t, d_j)$ im Suchbild.

- (2) Für jede Experimentalbedingung (s, n) (wobei s die Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit und n die Anzahl der Objekte im Suchbild bezeichne) ist die Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ normalverteilt mit Mittelwert $\mu(r_{s,n})$ und Standardabweichung $\sigma(r_{s,n})$. Der Mittelwert $\mu(r_{s,n})$ ist proportional zur Differenz zwischen den Aktivierungen $a(t_s)$ und $a(d_1)$. Sei t_s der Merkmalswert des Zielobjektes mit einem physikalischen Unterschied der Stufe s zu den Ablenkern. d_1 sei wieder der Merkmalswert des dem Zielobjekt benachbarten Ablenkern. Aus Gleichung (1.2) ist leicht erkennbar, dass $a(d_1)$ die maximale Ablenkeraktivierung ist, da $l(t, d_j)$ für $j=1$ am kleinsten ist. Die Proportionalitätsannahme lautet also

$$\begin{aligned}
 \mu(r_{s,n}) &= k \cdot |a(t_s) - a(d_1)| \\
 &= k \cdot \left| \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{|t_s - d|}{l(t, d_j)} - \frac{1}{n-1} \frac{|t_s - d|}{l(t, d_1)} \right| \\
 &= \frac{k}{n-1} \cdot \sum_{j=2}^{n-1} \frac{|t_s - d|}{l(t, d_j)} \\
 &= \underbrace{k \cdot |t_s - d|}_{=d_s} \cdot \underbrace{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{j=2}^{n-1} \frac{1}{l(t, d_j)} \right)}_{=l_n} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Demnach kann die mittlere *Reichweite der Aufmerksamkeit* geschrieben werden als Produkt

$$\mu(r_{s,n}) = d_s \cdot l_n \quad (2.2)$$

wobei der Faktor d_s ausschließlich von der physikalischen Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit abhängt und der Faktor l_n ausschließlich von der Objektanzahl. Damit korrespondiert d_s zum ersten experimentell variierten Faktor und l_n zum zweiten experimentell variierten Faktor (vgl. Abschnitt 4.1.2).

- (3), (4), (5): Für die drei verschiedenen Klassen von Suchstrategien sind die Abfolgen der Suchschritte unterschiedlich (vgl. Abbildung 13). In allen drei Fällen wird die Reaktionszeit als Summe der folgenden Zeiten modelliert:

p_s : Aufmerksamkeitsverweildauer (oder auch „Prüfzeit“) - abhängig von der physikalischen Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit s . Da keine weitergehenden mathematischen Annahmen über die Art des Zusammenhangs zwischen Verweildauer und Ähnlichkeit gemacht wurden (vgl. Annahme 4), kann keine Gleichung für p_s aus d_s abgeleitet werden. Allerdings ist als Ergebnis der Parameterschätzungen ein umgekehrt monotoner Zusammenhang zwischen den Werten für p_s und d_s zu erwarten (die Erfüllung dieser Erwartung kann zur Modellbewertung dienen).

x : Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer.

c : Zeitdauer aller Prozesse, die in allen Aufgabenbedingungen konstant sind.

Die allgemeine Reaktionszeitgleichung für die experimentellen Bedingungen „Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit s “ und „Objektanzahl n “, die für alle drei Klassen von Suchstrategien gilt, kann formuliert werden als

$$RT_{s,n} = \underbrace{(x + p_s) + \dots + (x + p_s)}_{\substack{0 \text{ bis } (n - \lfloor (f_{s,n} - 1)/2 \rfloor) \text{ mal} \\ (1 \text{ bei teilserieller Suche,} \\ \text{außer Zielobjekt auf der 1. Position)}}} + \underbrace{x}_{\substack{0 \text{ oder } 1 \text{ mal} \\ (1 \text{ bei teilserieller Suche,} \\ \text{außer Zielobjekt auf der 1. Position)}}} + c \quad (3)$$

$f_{s,n}$ ist hierbei die „Fokusgröße“, d.h. die Anzahl von Objekten, die innerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit liegen. Sie ergibt sich aus der geometrischen Anordnung der Objekte im Suchbild in Beziehung zur Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ (zur Berechnung vgl. Anhang).

Die Anzahl von Suchschritten $(x + p_s)$ hängt ab von der Fokusgröße $f_{s,n}$ in Relation zur Objektanzahl n : Je mehr Objekte der Fokus enthält und je kleiner die Objektanzahl, desto weniger Schritte sind nötig. Darüber hinaus hängt (außer in der Strategiekategorie *Pop-Out-Suche*) die Anzahl der Suchschritte ab von der Position des Zielobjektes im Verhältnis zur Startposition der Suche.

Um eine Reaktionszeitgleichung zu erhalten, die ausschließlich von den beiden experimentellen Faktoren *Ähnlichkeit* (d.h. *Schwierigkeit* der Suche) und *Objektanzahl* abhängt, wird der Erwartungswert der obigen Gleichung (3) über alle Zielreizpositionen berechnet. Die Berechnung (vgl. Anhang) basiert auf der Annahme einer Normalverteilung der *Reichweite der Aufmerksamkeit* und einer Gleichverteilung der Zielreizpositionen. Die Erwartungswertgleichung für die Reaktionszeit lautet

$$E(RT_{s,n}) = e(p) \cdot p_s + e(x) \cdot x + c \quad (*)$$

wobei $e(p)$ und $e(x)$ die Erwartungswerte der *Anzahl* der Suchschritte p bzw. x sind, mit

$$e(p) = 1 + \frac{n-1}{2} F(e) - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} (1 + (n-2) \lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor) \cdot [F(e \cdot \sin(\frac{i}{2} \alpha)) - F(e \cdot \sin(\frac{i-1}{2} \alpha))]$$

$$e(x) = 1 + \frac{n-1}{2} F(e) - \frac{n-2}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} (1 + \lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor) \cdot [F(e \cdot \sin(\frac{i}{2} \alpha)) - F(e \cdot \sin(\frac{i-1}{2} \alpha))]$$

F ist dabei die kumulative Normalverteilung der *Reichweite der Aufmerksamkeit* r (mit dem Mittelwert $\mu(r)$, berechnet nach Gleichung (2.1), und der Standardabweichung $\sigma(r)$, einem zu schätzenden Modellparameter). e und α sind Konstanten, deren Werte aus der Geometrie des Suchbildes bestimmt werden können (vgl. Abbildung 13):

e = Exzentrizität der Objekte

α = Abstand zwischen benachbarten Objekten als Kreiswinkel

Gleichung (*) soll im folgenden „Modellgleichung“ heißen.

4.2.3 Zusammenfassung der Modellparameter

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der Modellparameter:

Parameter	Bedeutung
Zeitparameter	
c	Konstante Zeit in allen Bedingungen
x	Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer
p_s	Aufmerksamkeitsverweildauer in Schwierigkeitsstufe s
Andere Parameter	
d_s	Differenz zwischen den „Merkmalswerten“ von Ziel- und Ablenkerobjekten in der Schwierigkeitsstufe s („perzeptueller Kontrast“)
$\sigma(r)$ ⁸	Standardabweichung der Verteilung der Reichweite der Aufmerksamkeit r
l_n	Geometrische Konstante für die Objektanzahl n

Tabelle 1: Bezeichnungen, Bedeutungen und Maßeinheiten der Modellparameter

Zur Anzahl von Parametern: Wenn I (geometrisch identische) Experimente mit J Versuchspersonen angepasst werden, die jeweils aus S Stufen des Faktors *Schwierigkeit* und N Stufen des Faktors *Objektanzahl* bestehen, dann beträgt die Anzahl der zu schätzenden Parameter $(2S+3)IJ + N - 1$ ⁹. Die Anzahl der Datenpunkte in einem vollständigen faktoriellen Plan ist $IJSN$. Damit das Gleichungssystem lösbar ist, muss $IJSN > (2S+3)IJ + N - 1$ gelten. Das Experiment war also entsprechend zu konzipieren.

⁸ Lediglich aus praktischen Gründen (um eine zu große Anzahl von Parametern zu vermeiden) wurde eine Varianzhomogenität für r in den verschiedenen experimentellen Bedingungen angenommen. Im Gegensatz dazu nimmt *Guided Search* (WOLFE 1994) eine Abnahme der Varianz der Aktivierungen an bei zunehmendem Zielreiz-Ablenker-Unterschied. Obwohl dies eher der Wirklichkeit gerecht werden mag, ist die vorliegende vereinfachende Annahme nicht kritisch für das Modell. Im Gegensatz zu *Guided Search* werden hier nämlich unterschiedliche Sucheigenschaften durch die unterschiedliche Reichweite der Aufmerksamkeit modelliert und nicht durch deren Varianz.

⁹ Von der Summe der Anzahl der Parameter wurde 1 subtrahiert, da der Parameter l_4 frei wählbar ist und auf 1 normiert wird: Da l_n und d_s nicht separat voneinander im Modell auftreten, sondern nur im Produkt $r = l_n d_s$, ist die Faktorzerlegung von r in l_n und d_s nicht eindeutig. Ein Faktor ist also frei wählbar.

4.3 Modelltest: Experiment 1

Das Experiment war darauf angelegt, Daten für den Modelltest zu produzieren. Daher sollte es eine möglichst große Bandbreite von Sucheigenschaften von der Pop-Out-Suche bis zur vollständig seriellen Suche hervorrufen. Entsprechend dem Geltungsbereich des Modells (vgl. Abschnitt 4.1.2) sollten die Versuchspersonen ein Zielobjekt suchen, das sich von den homogenen Ablenkerobjekten in lediglich einem Merkmal (einer perzeptuellen Dimension) unterschied. Variiert wurden die Diskriminationsschwierigkeit (physikalische Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Ablenkern), die Anzahl von Objekten im Suchbild und das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein eines Zielobjektes im Suchbild. Ein vollständiger faktorieller Versuchsplan mit diesen drei Faktoren wurde realisiert. Das Experiment wurde mit verschiedenen Zielreizdimensionen wiederholt.

4.3.1 Methode

Versuchspersonen

Drei Versuchspersonen (einer männlich und zwei weiblich) nahmen freiwillig gegen Bezahlung am Experiment teil. Sie waren zwischen 23 und 27 Jahren alt, rechtshändig und normal-sichtig.

Apparatur

Die Reize wurden von einem Personalcomputer (Lintec Pentium 90) generiert und auf einem 20-Zoll-Farbmonitor (Eizo Flex Scan F764-M) mit einer Auflösung von 800 x 600 Punkten dargeboten. Die Versuchspersonen antworteten, indem sie mit Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand eine von zwei externen Antworttasten drückten. Der Sehabstand betrug 120 cm und wurde durch die Verwendung einer Kinnstütze gewährleistet. Die Versuche fanden in einem vollständig abgedunkelten Raum statt, in dem die einzige Beleuchtung vom Monitor ausging.

Reize

Vier, sechs, acht oder zehn Objekte wurden jeweils dargeboten. Sie lagen nebeneinander auf einem imaginären Kreisbogen mit zwölf gleichabständigen Positionen (vgl. Abbildung 10). Der Kreisbogen hatte einen Durchmesser von 9° visuellem Winkel. Die Ablenkerobjekte waren Quadrate mit einer Seitenlänge von $1,7^\circ$ visuellem Winkel. Sie bestanden aus Rechteckgittern mit einer Ortsfrequenz von 3,2 cpd, in denen die Luminanz der dunklen Streifen $7,9 \text{ cd/m}^2$ und die des Hintergrundes $15,2 \text{ cd/m}^2$ betrug. Sowohl quadratische Gitter als auch Hintergrund waren achromatisch (CIE-x-y-Koordinaten: 0,274 / 0,334). Die Zielobjekte wichen von den Ablenkerobjekten in einer der drei Dimensionen *Helligkeit*, *Größe* oder *Form* ab. Das Ausmaß der Abweichung erstreckte sich von „deutlich sichtbar“ bis „kaum erkennbar“ (nahe der Diskriminationsschwelle). Das Aussehen der Objekte und ihre physikalischen Werte sind in Abbildung 15 dargestellt.

Dimension	Ablenker	Zielobjekt in Schwierigkeitsstufe				
		5	4	3	2	1
Helligkeit cd/m ²	7,9	6,7	5,6	4,6	3,3	2,3
Größe Grad vis. Winkel	1,72	1,78	1,84	1,93	2,06	2,23
Form Fehlender Anteil	0	0,07	0,12	0,17	0,25	0,50

Abbildung 15: Erscheinungsbild und physikalische Werte von Zielobjekten und Ablenkern in Experiment 1.

Die Auswahl der perzeptuellen Dimensionen und die Abstufung des Faktors *Schwierigkeit* beruhten auf einem Vorexperiment, an dem drei andere Versuchspersonen teilgenommen hatten. Bei diesem Vorexperiment hatte es sich im Übrigen auch gezeigt, dass die ursprünglich geplanten weiteren Dimensionen *Ortsfrequenz* und *Orientierung* nicht realisierbar waren, da die verfügbare Monitorauflösung keine genügend feine Abstufung dieser Dimensionen erlaubte, die zu dem gewünschten Kontinuum von Sucheigenschaften geführt hätte.

Versuchsablauf

Jeder Durchgang begann mit einem Kreuz in Bildschirmmitte, das fixiert werden musste. Nach einer Sekunde folgte das Suchbild. Es blieb sichtbar, bis der Proband eine der beiden Antworttasten drückte. Während der Suche durfte der Proband die Augen frei bewegen. In der Hälfte der Durchgänge war das Zielobjekt vorhanden, in der anderen Hälfte nicht. Durchgänge mit und ohne Zielobjekt erschienen in randomisierter Reihenfolge mit einem Intervall von jeweils einer Sekunde. Die Position des Kreisbogens von Objekten innerhalb des imaginären Kreises sowie die Position des Zielobjektes innerhalb des Kreisbogens waren ebenfalls randomisiert.

Die Durchgänge waren zu Blöcken gleicher Schwierigkeit und Objektanzahl zusammengefasst (pro Block 96 Durchgänge), um es den Versuchspersonen zu ermöglichen, für jede experimentelle Bedingung (*Schwierigkeit* \times *Objektanzahl*) die optimale Suchstrategie zu finden und anzuwenden (vgl. Abschnitt 4.1.2). Zusätzliche 24 Durchgänge zu Beginn jeder Sitzung und vier Durchgänge zu Beginn jedes Blockes waren Übungsdurchgänge ohne Wertung. Nach jedem Block konnten die Versuchspersonen eine Pause machen, während der sie allerdings den abgedunkelten Raum nicht verlassen durften. Die Blöcke wurden in ansteigender Schwierigkeit und innerhalb einer Schwierigkeitsstufe in ansteigender Objektanzahl präsentiert. Eine Sitzung enthielt alle Blöcke eines Experimentes (d.h. einer perzeptuellen Dimension) und dauerte ungefähr zwei Stunden.

Um „Speed-Accuracy-Tradeoffs“ (d.h. Genauigkeitsverluste zur Geschwindigkeitssteigerung) zu verhindern, wurden die Versuchspersonen aufgefordert, ihre Fehlerzahl trotz ansteigender Schwierigkeit möglichst konstant zu halten, auch wenn dafür längere Suchzeiten nötig würden.

Datenanalyse

Da es das Ziel des Modells ist, individuelle Suchstrategien in den verschiedenen Suchbedingungen zu beschreiben, wurden die Daten für jede Versuchsperson und jede perzeptuelle Dimension separat ausgewertet.

Für jede Faktorstufenkombination (*Schwierigkeit* \times *Objektanzahl* \times *Vorhandensein des Zielobjektes*) wurden die Fehlerraten und die Reaktionszeiten ausgewertet. Zur Ausreißerkontrolle – da bei Reaktionszeiten Ausreißer nach oben wesentlich größere Werte annehmen können als nach unten – wurden Reaktionszeiten außerhalb eines Intervalls von zwei Standardabweichungen um den empirischen Mittelwert (für jede Faktorstufenkombination separat berechnet) weggelassen. Dies führte zu einem Verlust von 4,9 % aller Durchgänge, von denen die weitestens meisten oberhalb der oberen Grenze des Intervalls gelegen hatten.

Anschließend wurde die Modellgleichung an die Reaktionszeitmittelwerte der positiven Durchgänge (d.h. Durchgänge mit vorhandenem Zielobjekt und richtiger Antwort) jeder experimentellen Bedingung angepasst. Dazu wurden die Parameter der Modellgleichung so bestimmt, dass die Fehlersumme über alle Experimentalbedingungen

$$\varepsilon = \sum_{s=1}^5 \sum_{n=4,6,8,10} (E(RT_{s,n}) - M_{s,n}(t))^2$$

ihr Minimum annahm. $M_{s,n}(t)$ ist dabei der Reaktionszeitmittelwert der positiven Durchgänge in der experimentellen Bedingung (s,n) , d.h. Schwierigkeitsstufe s und Objektanzahl n . $E(RT_{s,n})$ ist der Erwartungswert der entsprechenden Reaktionszeit aus der Modellgleichung (*). Da die Modellgleichung nicht differenzierbar ist, wurde das Minimierungsproblem numerisch mit Hilfe des Algorithmus PRAXIS (BRENT 1973) gelöst, welcher den Vorteil hat, Funktionen zu minimieren, ohne deren Ableitungen zu benötigen. Die Modellanpassung wurde simultan für die neun Datensätze (drei perzeptuelle Dimensionen mit je drei Versuchspersonen) durchgeführt, so dass die geometrischen Parameter l_n über alle Datensätze hinweg identisch bestimmt werden konnten. Die Gesamtzahl der Datenpunkte betrug $3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 = 180$, die Zahl der Parameter $(2 \cdot 5 + 3) \cdot 3 \cdot 3 + 4 - 1 = 120$. Die notwendige Bedingung für die Lösbarkeit des Minimierungsproblems war also erfüllt (vgl. Abschnitt 4.2.3).

4.3.2 Ergebnisse

Deskriptive Ergebnisse

Fehlerraten. Die Fehlerrate betrug im Durchschnitt 10,4%, wobei die Rate der Auslassungen (Zielobjekt vorhanden und nicht gefunden) bei 14,1% und die Rate der falschen Alarme (Ziel-

reiz „gefunden“, obwohl nicht vorhanden) bei 6,6% lag. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Fehlerraten getrennt nach perzeptuellen Dimensionen und Schwierigkeitsstufen.

Schwierigkeit	1	2	3	4	5
Auslassungen (Vorhandenes Zielobjekt nicht gefunden)					
Helligkeit	5,4 - 13,3	9,7 - 14,1	11,3 - 28,6	12,2 - 26,4	22,9 - 47,8
Größe	2,2 - 4,4	3,9 - 10,4	5,6 - 10,4	11,0 - 18,2	31,2 - 52,6
Form	1,1 - 4,4	2,7 - 4,5	3,3 - 6,0	7,7 - 14,6	7,9 - 15,1
Falsche Alarme (Zielobjekt gefunden, obwohl nicht vorhanden)					
Helligkeit	2,2 - 6,5	2,2 - 6,0	11,7 - 17,0	6,1 - 15,6	28,7 - 39,4
Größe	0,0 - 6,5	1,6 - 3,8	0,0 - 3,3	1,0 - 4,4	12,3 - 14,6
Form	1,1 - 2,2	0,0 - 2,8	0,5 - 3,2	0,6 - 2,2	0,5 - 0,5

Tabelle 2: Minimale und maximale Fehlerraten von den drei Versuchspersonen für die fünf Schwierigkeitsstufen in den drei perzeptuellen Dimensionen, aufgeteilt nach Auslassungsfehlern und falschen Alarmen.

In allen drei Dimensionen war ein Anstieg der Fehlerraten mit ansteigender Schwierigkeit zu beobachten. Dies ist entweder ein Indikator für einen „Speed-Accuracy-Tradeoff“, d.h. die Versuchspersonen haben entgegen der Instruktion ihr internes Kriterium verschoben, wann sie im Fall subjektiver Unsicherheit die Suche beenden, oder reflektiert einfach die ansteigende Diskriminationsschwierigkeit. Eine Korrelation der Fehlerraten mit den mittleren Reaktionszeiten ergab $r = 0,79$ ($p < 0,001$), was die zweite Interpretation unterstützt. Für die Modellrechnungen (in denen lediglich positive Durchgänge modelliert werden) sind hohe Fehlerraten nur dann ein Problem, wenn sie anzeigen, dass sogenannte „Lucky Guesses“ stattgefunden haben. Ein „Lucky Guess“ ist ein Durchgang, in dem der Proband den vorhandenen Zielreiz nicht entdeckt, jedoch zufälligerweise richtig „ja“ rät. Diese würden dann als korrekte Zielreizentdeckungen in die Modellrechnung eingehen. Ein Indikator für die Rate der „Lucky Guesses“ ist die Rate der falschen Alarme, die die Neigung des Versuchspersonen widerspiegelt, im Falle subjektiver Unsicherheit „ja“ zu antworten. Die sehr hohe Rate falscher Alarme in der schwierigsten Stufe der Helligkeitsdimension lässt einen hohen Grad subjektiver Unsicherheit der Versuchspersonen vermuten mit einem vermutlich ähnlich hohen Anteil von „Lucky Guesses“. Deshalb wurde diese Stufe von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Reaktionszeiten. Abbildung 16 zeigt die Reaktionszeiten der positiven Durchgänge (Zielreiz vorhanden) einer Versuchsperson. Die Reaktionszeiten der beiden übrigen Versuchspersonen zeigten ähnliche Verläufe.

Um festzustellen, inwieweit das beabsichtigte Kontinuum von Sucheigenschaften erzielt worden war, wurden die Steigungen der Reaktionszeitkurven für die einzelnen Schwierigkeitsstufen durch lineare Regressionen der mittleren Reaktionszeiten auf die Objektanzahlen bestimmt. Tabelle 3 gibt die geschätzten Steigungen (in ms pro Objekt) für alle Versuchspersonen und alle Schwierigkeitsstufen in allen Dimensionen an, jeweils für positive und negative Durchgänge. In den meisten Fällen nimmt die Steigung mit zunehmender Schwierigkeit zu, die geplanten Kontinua von Sucheigenschaften sind also vorhanden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese Kontinua tatsächlich von der Pop-Out-Suche bis zur vollständig seriellen Suche reichen. Aus den in Kapitel 3 diskutierten Gründen gibt die Steigung nur begrenzt Auskunft über die

zugrunde liegenden Suchstrategien. Eine flache Steigung stellt aber zumindest eine notwendige Bedingung für eine Pop-Out-Suche dar, wenn auch keine hinreichende. Eine Steigung wurde als flach bezeichnet, wenn der lineare Koeffizient der Reaktionszeiten der positiven Durchgänge nicht signifikant von Null verschieden war, oder wenn die Steigung kleiner als 10 ms/Objekt war (d.h. 5 ms/Objekt für positive Durchgänge). Ebenso kann eine Steigung, die größer als 10 ms/Objekt ist und ein Steigungsverhältnis von 1:2 von positiven zu negativen Durchgängen aufweist, als notwendige, jedoch nicht als hinreichende Bedingung für eine vollständig serielle Suchstrategie dienen.

Schwierigkeitsstufe		5		4		3		2		1	
Dimension	Vp	pos	neg	pos	neg	pos	neg	pos	neg	pos	neg
Helligkeit	CG	aus-		9*	70**	18*	69**	3	26**	-4	-14**
	CH	geschlossen		112**	139**	89**	130**	45**	52**	23**	20*
	UM			73**	104**	57**	98**	5	27**	4	20**
Größe	CG	164**	221**	40**	125**	45**	58**	31**	30**	19**	-2
	CH	108*	114**	98**	162**	42**	55**	36**	36**	14**	16**
	UM	113**	189**	97**	187**	26**	79**	32**	61**	17**	43**
Form	CG	73**	145**	48**	104**	29**	62**	10*	34**	14**	6
	CH	75**	142**	76**	132**	26**	33**	10*	6	11**	15**
	UM	39*	146**	58**	124**	30**	57**	16**	40**	11**	18**
* p < 0,05, ** p < 0,001											

Tabelle 3: Steigungen und mögliche Strategieklassifikationen gemäß ihrer notwendigen Bedingung: Suchstrategien, die vollständig seriell sein können, sind weiß markiert, und mögliche Pop-Out-Suchen dunkelgrau. Hellgrau markierte Steigungen indizieren in jedem Fall teilserielle Suchstrategien, da sie keine der beiden notwendigen Bedingungen erfüllen. „pos“ und „neg“ bezeichnen Durchgänge mit und ohne Zielobjekt.

Entgegen der Erwartung traten in keiner der drei Dimensionen beide Pole des Kontinuums, d.h. sowohl die Pop-Out-Suche als auch die vollständig serielle Suche, auf. In der Helligkeitsdimension scheint das Fehlen einer vollständig seriellen Suche merkmalsbedingt zu sein, da die dargebotenen Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeiten bereits die Diskriminationsschwelle erreicht hatten und nicht weiter hätten gesteigert werden können. Das Fehlen von Pop-Out-Suchen in den Dimensionen *Größe* und *Form* sowie bei einer Versuchsperson auch *Helligkeit* ist wohl darauf zurückzuführen, dass die einfachste Stufe hier noch nicht einfach genug war, um Pop-Out-Suchen zu ermöglichen.

Ergebnisse der Modellrechnung

Güte der Modellanpassung. Die Modellanpassung an die Daten war gut. Abbildung 16 veranschaulicht dies für eine Versuchsperson. Der Modellanpassungsfehler $\sqrt{\epsilon}$ lag für die neun Datensätze zwischen 104 und 278, der Determinationskoeffizient¹⁰ R^2 zwischen 0,89 und 0,99.

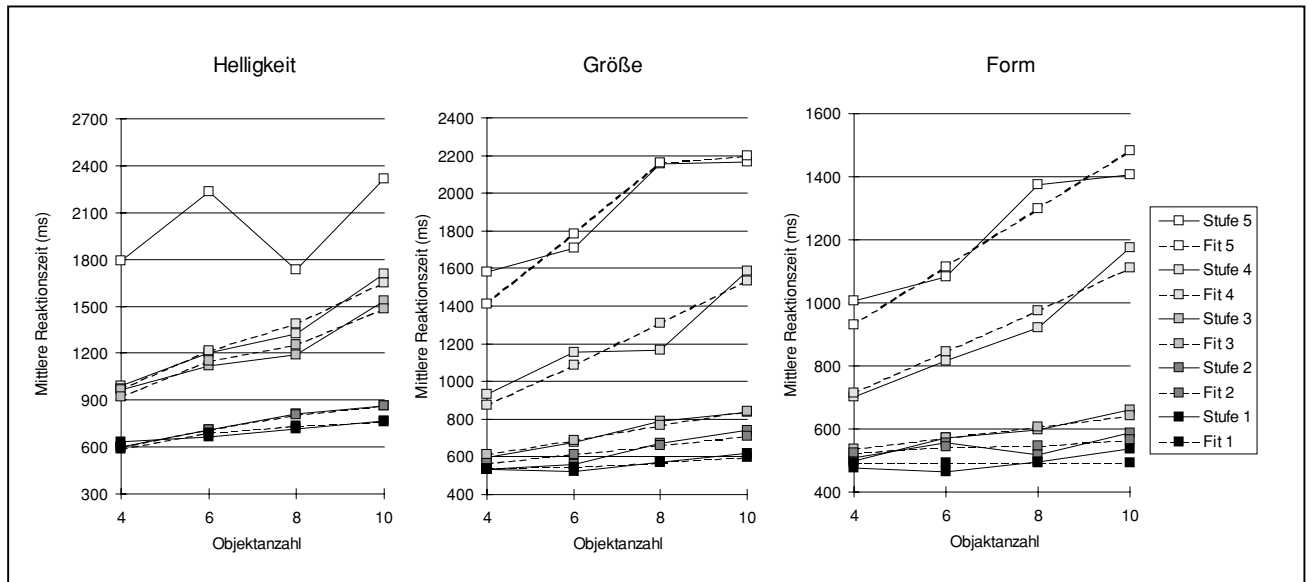


Abbildung 16: Empirische und modellierte Reaktionszeiten der positiven Suchdurchgänge der Versuchsperson CH in Experiment 1. In der Helligkeitsdimension wurde Schwierigkeitsstufe 5 aufgrund zu hoher Fehlerraten nicht modelliert.

Ein statistischer Test der Güte der Modellanpassung (χ^2 -Test) war hier nicht möglich, da das Modell in wesentlichen Parametern nicht linear ist. Darüber hinaus war die Zahl der Parameter nur unwesentlich geringer als die der Datenpunkte, so dass das Modell nahezu gesättigt war. Dies ist auch die Ursache für die ungewöhnlich hohen Werte des Determinationskoeffizienten R^2 , so dass dessen Werte nicht als zwingender Beleg für die Modellgüte interpretiert werden dürfen. Hierfür wurden als weitere Kriterien die Plausibilität der Parameterwerte und der Strategieklassifikationen beurteilt (zur Begründung der Kriterien vgl. Abschnitt 4.1.1).

Parameterwerte. Tabelle 4 zeigt die geschätzten Parameterwerte für die neun experimentellen Datensätze, d.h. die drei perzeptuellen Dimensionen mit je drei Versuchspersonen.

¹⁰ R^2 wurde berechnet als $R^2 = 1 - \frac{\text{Var}(RT - \hat{RT})}{\text{Var}(RT)}$,

wobei RT der empirische Mittelwert der Reaktionszeiten und \hat{RT} die modellierte mittlere Reaktionszeit war. R^2 wird üblicherweise als Anteil der aufgeklärten Varianz bezeichnet.

Dimension		Helligkeit			Größe			Form		
Parameter	V _p	CG	CH	UM	CG	CH	UM	CG	CH	UM
	Konstante Zeit	c [ms]	335	349	442	201	389	216	340	333
Verlagerungsdauer	x [ms]	124	157	105	132	74	147	33	72	35
Verweildauer Stufe 5	p ₅ [ms]	ausgeschlossen			266	258	183	116	126	169
Verweildauer Stufe 4	p ₄ [ms]	15	123	76	110	145	50	70	57	74
Verweildauer Stufe 3	p ₃ [ms]	58	93	65	41	37	0	44	9	32
Verweildauer Stufe 2	p ₂ [ms]	46	5	16	12	11	23	5	14	17
Verweildauer Stufe 1	p ₁ [ms]	0	0	26	0	0	4	0	0	0
Perz. Kontrast Stufe 5	d ₅	ausgeschlossen			69	41	53	36	40	75
Perz. Kontrast Stufe 4	d ₄	47	57	40	79	55	39	39	33	0
Perz. Kontrast Stufe 3	d ₃	79	55	69	75	69	43	68	54	0
Perz. Kontrast Stufe 2	d ₂	146	73	79	75	63	79	48	78	56
Perz. Kontrast Stufe 1	d ₁	108	77	132	79	75	79	54	78	54
Standardabweich. von r	σ(r)	0,10	4,27	0,00	0,58	1,12	0,43	0,63	1,34	18,81
Geometrische Konstante ... 4 Objekte	l ₄	1,00 (normierter Wert)								
... 6 Objekte	l ₆	0,99								
... 8 Objekte	l ₈	1,24								
... 10 Objekte	l ₁₀	1,35								

Tabelle 4: Geschätzte Parameterwerte für die neun Datensätze (drei perzeptuelle Dimensionen mit je drei Versuchspersonen) aus Experiment 1.

Für die Zeitkonstante c wurden Werte zwischen 201 und 442 ms geschätzt. Die Zeitdauer einer Aufmerksamkeitsverlagerung x ergab Schätzungen zwischen 33 und 157 ms. Bei beiden Parametern kann weder der Faktor *Dimension* noch der Faktor *Proband* die große Streuung erklären, wie eine genauere Betrachtung der Tabelle zeigt. Die Aufmerksamkeitsverweildauer p_s zeigte in den meisten Fällen den erwarteten monotonen Anstieg mit ansteigender Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit. Die einzigen deutlichen Ausnahmen sind bei Versuchsperson CG in der Helligkeitsdimension sowie bei UM in der Größendimension zu finden. Die Parameter d_s repräsentieren die Differenz zwischen der Merkmalsausprägung des Zielobjektes und der der Ablenker (auf einer „perzeptuellen“ Skala, vgl. Abschnitt 4.2.3) und sollten somit in umgekehrt monotoner Beziehung zur physikalischen Ähnlichkeit stehen. Dies war allerdings nur in einem der neun Datensätze der Fall, nämlich bei UM in der Helligkeitsdimension. Eine klare Abweichung von der erwarteten Monotonie ist hingegen bei mindestens vier Datensätzen zu beobachten.

Strategieklassifikationen. Die mittlere Suchstrategie der Versuchspersonen in den einzelnen Experimentalbedingungen wurde klassifiziert als Pop-Out-Suche, teilserielle Suche oder vollständig serielle Suche entsprechend der mittleren Reichweite der Aufmerksamkeit in der jeweiligen Bedingung (zur Klassifizierung vgl. Abbildung 13). Tabelle 5 zeigt diese Klassifika-

tionen und gibt bei teilserieller Suche den geschätzten Wert für die Fokusgröße f an, d.h. die mittlere Anzahl von Objekten innerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit¹¹.

Schwierigkeit		5				4				3				2				1			
Objektanzahl		4	6	8	10	4	6	8	10	4	6	8	10	4	6	8	10	4	6	8	10
Helligkeit	CG	ausgeschlossen				2	2	3	3	4	4	5	6	≥7	≥7	≥7	≥7	≥7	6	≥7	≥7
	CH	ausgeschlossen				2,8	2,7	3	3,6	2,6	2,6	3	3,4	3,3	3,2	4,3	5,1	3,6	3,5	4,8	5,6
	UM	ausgeschlossen				2	2	2	3	3	3	4	5	4	4	5	6	≥7	≥7	≥7	≥7
Größe	CG	3	3	4	4,8	4	4	5	6	3,1	3	4,8	5	3,1	3	4,8	5	4	4	5	6
	CH	2	2	2	3	2,9	2,8	3	3,1	3	3	4	4,7	3	3	4	4	3,3	3,1	4,7	5
	UM	2,1	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2,4	3	4	4	5	5,9	4	4	5	5,9
Form	CG	2	2	2	2	2	2	2	2,1	3	3	4	4,1	2	2	3	3	2,8	2,4	3	3
	CH	2	2	2	2,7	2	2	2	2	2,7	2,4	3	3	4	3,8	5	5,8	4	3,8	5	5,8
	UM	3,6	3,6	4,8	5,5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	2,7	2,6	3,3	3,7	2,6	2,5	3,2	3,5

Tabelle 5: Strategieklassifikationen der Versuchspersonen in allen Aufgabenbedingungen in Experiment 1 entsprechend der mittleren geschätzten Reichweite der Aufmerksamkeit: Pop-Out-Suchen sind dunkelgrau markiert, teilserielle Suchen hellgrau und vollständig serielle Suchen weiß. Die Zahlen geben die mittlere Fokusgröße, d.h. die Anzahl von Objekten innerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit, wieder.

Der Vergleich mit Tabelle 3 macht Übereinstimmungen und Unterschiede zwischen den Strategieklassifikationen des Modells und der traditionellen Methode der Steigungsanalyse deutlich. Bei einem guten Modell ist zu erwarten, dass seine Strategieklassifikationen in den Klassen *Pop-Out-Suche* und *vollständig serielle Suche* zu den notwendigen Bedingungen an die Steigung kompatibel sind. Das heißt,

- (1) wenn das Modell die Strategie in einer Schwierigkeitsstufe als Pop-Out klassifiziert, dann sollte die Reaktionszeitkurve flach sein, und
- (2) wenn das Modell die Strategie in einer Schwierigkeitsstufe als vollständig seriell klassifiziert, dann sollte die Steigung der Reaktionszeitkurve linear sein mit einer Relation von ca. 1:2 zwischen Durchgängen mit und ohne Zielobjekt.

Die umgekehrten Implikationen brauchen aufgrund der in Kapitel 3 dargestellten Kritikpunkte an der traditionellen Methode nicht zu gelten.

Von den insgesamt 45 ermittelten Suchstrategien (drei Dimensionen mit je fünf Schwierigkeitsstufen und je drei Versuchspersonen) klassifizierte das Modell¹² drei als Pop-Out-Suchen

¹¹ Bei der gegebenen geometrischen Anordnung der Objekte ist die Suche vollständig seriell, wenn f kleiner als 3 ist, teilseriell für ein f von mindestens 3 und kleiner als 7, und Pop-Out, wenn f mindestens 7 ist.

¹² Das Modell bestimmt sogar 140 Suchstrategien, da es für die verschiedenen Objektanzahlen getrennt die Strategie ermittelt. Für einen Vergleich mit der traditionellen Methode müssen jedoch die Strategien über die vier Objektanzahlen einer Schwierigkeitsstufe gemittelt werden, da Letztere nur eine Strategie pro Schwierigkeitsstufe liefert.

und 18 als vollständig serielle Suchen. Alle drei Pop-Out-Suchen (d.h. 100%) erfüllten Bedingung (1), wurden also durch die traditionelle Methode bestätigt, während nur zehn der vollständig seriellen Suchen (d.h. 56%) Bedingung (2) erfüllten.

Das Modell hat somit korrekt erkannt, dass Pop-Out-Suchen nur in der Helligkeitsdimension stattgefunden haben. Bei den vollständig seriellen Suchen klassifizierte es fast doppelt so viele Strategien als vollständig seriell wie die traditionelle Reaktionszeitanalyse. Ob dies eine Schwäche des Modells ist, oder ob das 1:2-Steigungsverhältnis keine geeignete Prüfbedingung darstellt, bleibt zu untersuchen.

4.3.3 Diskussion

Die Güte der Modellanpassung war sehr zufriedenstellend, jedoch ist die Relevanz dieses Maßes für eine Modellbewertung aufgrund der hohen Parameterzahl in Frage zu stellen.

Die Parameterwerte für die konstante Zeit c , die Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer x und die Aufmerksamkeitsverweildauer p_s erscheinen plausibel für die Aufgabe. Allerdings ist die Streuung der Werte für c und x recht groß. Wenn unterschiedliche Werte für c unterschiedliches Verhalten in den verschiedenen Aufgaben reflektieren, und wenn die unterschiedlichen Verlagerungszeiten auf Unterschiede in den Augenbewegungen zurückzuführen sind, würde man zumindest systematische Effekte der Faktoren *Dimension* oder *Versuchsperson* erwarten, welche nicht erkennbar sind. Ein weiteres Problem tritt bei den Werten für die Aufmerksamkeitsverweildauer p_s auf: Auffällig ist, dass p_1 in sieben der neun Datensätze als Null geschätzt wurde. Hier ist entweder die Modellierung des Suchprozesses unzulänglich, oder der numerische Anpassungsalgorithmus hat diesen Fehler produziert. Letzteres könnte insbesondere deshalb der Fall sein, da fast alle Suchschritte in der Modellgleichung „ $x + p_s$ “ lauten, hingegen nur einmal der Summand x allein auftritt. Es könnte sein, dass dieser eine separate Summand x zu „schwach“ ist, um x und p_s separat schätzen zu können. Die Modellanpassung wäre dann lediglich in der Lage, Differenzen der p_s -Werte zueinander zu spezifizieren, während sie den niedrigsten Wert, p_1 , nicht eindeutig bestimmen kann. Um dieses numerische Problem zu lösen, muss die experimentelle Aufgabe geändert werden: Sie muss eine Aufgabenbedingung enthalten, deren Modellierung die Schritte p_s (Aufmerksamkeitsverweildauer) ohne die Schritte x (Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer) enthält.

Im Falle einer Inadäquatheit des Modells könnte eine mögliche Erklärung sein, dass der separate Summand x in Wirklichkeit überhaupt nicht als Suchschritt auftritt, d.h. das Zielobjekt wird gefunden, ohne dass die Aufmerksamkeit am Ende der Suche explizit dorthin verlagert wird. Weiterhin ist es denkbar, dass die gesamte Abfolge von Suchschritten nicht richtig modelliert ist. Insbesondere könnte in diesem Fall eine Unterschätzung der Zeitdauer einzelner Schritte - wie die Schätzung von p_1 als Null - bedeuten, dass das Modell die Anzahl der Schritte überschätzt hat. Als dritte Möglichkeit könnten auch Annahmen über die Beschaffenheit der Suchschritte falsch sein, beispielsweise die Annahme, die Zeitdauer von Verlagerungen sei unabhängig von der Entfernung. Alle diese Möglichkeiten sollen bei der Formulierung alternativer Modellvarianten berücksichtigt werden.

Weiterhin zeigten die geschätzten Werte für d_s , die (perzeptuellen) Differenzen der Merkmalswerte von Zielobjekt und Ablenker, in vielen Fällen nicht die erwartete monotone Ab-

nahme mit abnehmendem physikalischen Unterschied. Dies kann wiederum entweder ein Artefakt der Modellanpassung oder die Folge einer unzureichenden Modellierung sein.

Für die Strategieklassifikationen war erwartet worden, dass sie mit den notwendigen Bedingungen an die Steigungen der Reaktionszeitkurven in der Pop-Out-Suche und der vollständig seriellen Suche übereinstimmen. Obwohl die Klassifikationen als *Pop-Out* alle mit der notwendigen Bedingung für die Reaktionszeitkurven kompatibel waren, war dies für beinahe die Hälfte der Klassifikationen als *vollständig serielle Suche* nicht der Fall. Das Modell hat vermutlich die Tendenz, mehr Suchen als vollständig seriell zu klassifizieren, als es in Wirklichkeit sind. Damit wird die Vermutung gestützt, dass das Modell die Anzahl der Suchschritte systematisch überschätzt. Möglicherweise sind insbesondere die Strategien in der Mitte des Kontinuums, die teilseriellen Suchen, nicht gut modelliert, so dass in Wirklichkeit teilserielle Suchen nicht als solche erkannt und fälschlicherweise als vollständig seriell klassifiziert werden. Somit zeigt sich wiederum die Notwendigkeit, alternative Modelle zu formulieren und zu testen.

Kapitel 5

Alternative Modellvarianten

5.1 Variationen der Modellannahmen und –gleichungen

Entsprechend den in Abschnitt 4.3.3 diskutierten Kritikpunkten am ersten Modell sollen speziell zu drei Modellannahmen Alternativen entwickelt werden.

Die erste betrifft WOLFES (1994) Vorstellung einer seriellen Zuweisung der Aufmerksamkeit (Annahme 3). WOLFE hatte selbst angesprochen, dass diese Vorstellung nicht unbedingt der Wirklichkeit entsprechen müsse, sondern dass auch eine „parallele Verarbeitungsstufe mit begrenzter Kapazität unschwer in den Rahmen seines Modells eingefügt“ werden könne (WOLFE 1994, Seite 209). Aufgrund der Ergebnisse der ersten Modelltests war vermutet worden, dass die erste Modellvariante die Anzahl der Suchschritte in der teilseriellen Suche überschätzt haben könnte. Dies lässt tatsächlich vermuten, dass WOLFES Annahme einer seriellen Aufmerksamkeitszuteilung falsch ist. Anstelle das Suchbild seriell Objekt für Objekt abzusuchen, bis das Zielobjekt in die Reichweite der Aufmerksamkeit fällt, könnte der Proband die Objekte gruppenweise absuchen. Dazu müsste er die Größe seines Aufmerksamkeitsfokus so einstellen, dass sie optimal der Reichweite der Aufmerksamkeit in der jeweiligen experimentellen Bedingung entspricht. „Optimal“ bedeutet, der Aufmerksamkeitsfokus enthält gerade so viele Objekte, dass, falls das Zielobjekt darunter ist, es mit hoher Wahrscheinlichkeit „ins Auge springt“, d.h. alle Objekte innerhalb des Fokus können parallel geprüft werden. Nachdem der Fokus auf einer Objektgruppe verweilt hat, wird er genau so weit verlagert, dass kein Objekt ausgelassen und keines doppelt geprüft wird. Dieses Konzept ist kompatibel mit einer Idee von THEEUWES (1993, Seite 115), in der er vorschlägt, dass Probanden die Größe und Position ihrer räumlichen Aufmerksamkeit auf die Aufgabenbedingungen abstimmen, dass jedoch innerhalb des beachteten Gebietes keine strategische Kontrolle möglich ist.

Damit lautet die alternative Modellannahme

Annahme 3':

Die Größe des Aufmerksamkeitsfokus wird auf die Reichweite der Aufmerksamkeit eingestellt. Alle Objekte innerhalb des Fokus werden parallel geprüft. Wenn sich das Zielobjekt nicht darunter befindet, wird der Fokus zur nächsten Gruppe von Objekten weiter bewegt.

Eine zweite Variation des ursprünglichen Modells betrifft den Zeitverlauf der Aufmerksamkeitsverlagerungen (Annahme 5). Wie dort (Abschnitt 4.2.1) bereits diskutiert, ist es auch denkbar, dass der Zeitbedarf für eine Aufmerksamkeitsverlagerung nicht konstant ist, sondern mit der Entfernung der Verlagerung proportional ansteigt. Dies wird formuliert in der alternativen Modellannahme

Annahme 5':

Jede Verlagerung der Aufmerksamkeit benötigt Zeit. Die Verlagerungen sind kontinuierlich, d.h. ihr Zeitbedarf steigt proportional mit der Länge der Verlagerung an.

Aus der alternativen Formulierung zweier Modellannahmen ergeben sich vier Modellvarianten. Abbildung 17 zeigt diese Varianten und ihre Reaktionszeitgleichungen im Überblick. Die genaue Herleitung der Gleichungen (Erwartungswerte der Reaktionszeiten) erfolgt analog zur ersten Modellvariante und soll hier nicht im Detail dargestellt werden.

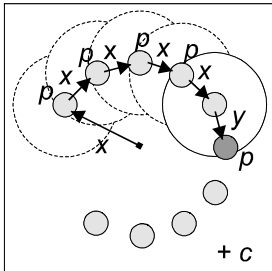
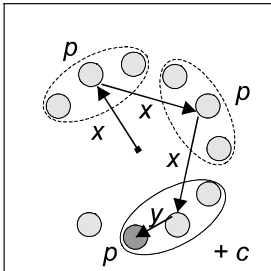
Aufmerksamkeitszuteilung auf Charakteristika der Verlagerungszeit	Einzelne Objekte (3) 	Gruppenweise (3') 
Konstante Zeitdauer (5)	$RT = x + \underbrace{(p+x) + \dots + (p+x)}_{\substack{0 \text{ oder } 1 \text{ mal} \\ 0 \text{ bis } n - \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor \text{ mal}}} + \underbrace{(y+p)}_{0 \text{ oder } 1 \text{ mal}} + c$	$RT = x + \underbrace{(p+x) + \dots + (p+x)}_{\substack{0 \text{ oder } 1 \text{ mal} \\ 0 \text{ bis } \lfloor \frac{n}{f} \rfloor \text{ mal}}} + \underbrace{(y+p)}_{0 \text{ oder } 1 \text{ mal}} + c$
Längenabhängige Zeitdauer (5')	$RT = \underbrace{\frac{\sum l_x}{v_x}}_{0 \text{ oder } 1 \text{ mal}} + \underbrace{p + \dots + p}_{\substack{0 \text{ bis } n - \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor \text{ mal} \\ 0 \text{ oder } 1 \text{ mal}}} + \underbrace{\left(\frac{l_y}{v_y} + p\right)}_{0 \text{ oder } 1 \text{ mal}} + c$	$RT = \underbrace{\frac{\sum l_x}{v_x}}_{0 \text{ oder } 1 \text{ mal}} + \underbrace{p + \dots + p}_{\substack{0 \text{ bis } \lfloor \frac{n}{f} \rfloor \text{ mal} \\ 0 \text{ oder } 1 \text{ mal}}} + \underbrace{\left(\frac{l_y}{v_y} + p\right)}_{0 \text{ oder } 1 \text{ mal}} + c$
x / v_x Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer / geschwindigkeit y / v_y ... im letzten Schritt p Aufmerksamkeitsverweildauer c Konstante Zeit (motorische Reaktion etc.)	f Fokusgröße (Anzahl Objekte) n Objektanzahl im Suchbild $\sum l_x$ Summe aller verlagerungslängen l_y Länge der letzten Verlagerung	

Abbildung 17: Übersicht der alternativen Modellvarianten: Abfolge der Suchschritte und Modellgleichungen

Die dritte Variation bezieht sich auf die diskutierte Frage, ob in der Pop-Out-Suche und der teilseriellen Suche möglicherweise ein Suchschritt weniger stattfindet als ursprünglich angenommen: Anstatt die Aufmerksamkeit explizit auf das Zielobjekt zu verlagern, sobald es innerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit liegt, könnte es auch „aus der Entfernung“ entdeckt werden. Diese Alternativen entsprechen der Diskussion in der Literatur (z.B. THEEUWES 1993, Seite 105), ob das Pop-Out-Phänomen eine weit verteilte Aufmerksamkeit widerspiegelt, die bei der Zielreizentdeckung keinerlei Verlagerung bedarf, oder ob das Zentrum der Aufmerksamkeit in jedem Fall auf das Zielobjekt verlagert wird. FOLK & EGETH (1989) behaupten beispielsweise, dass es für eine einfache „vorhanden / nicht vorhanden“-Entscheidung nicht erforderlich sei, die Aufmerksamkeit zur Zielreizposition zu verlagern. Die Aufgabe könne präattentiv gelöst werden. Eine Aufmerksamkeitsverlagerung müsse der Antwort nur dann vorausgehen, wenn Zielobjekte gezählt, ihre Position bestimmt oder sie anderweitig voll identifiziert werden sollen. Da in der hier vorliegenden Aufgabe solches nicht gefragt ist, erscheint eine präattentive Bearbeitung denkbar. Für diese Alternative werden keine neuen Modellannahmen formuliert, sondern sie soll durch eine geeignete Variation der Parameter in die Modellierung einbezogen werden: In allen Modellgleichungen in Abbildung 17 wurde der letzte Verlagerungsschritt bei der Pop-Out- und der teilseriellen Suche von x in y umbenannt. Mit Hilfe der Modellanpassung kann dann festgestellt werden, ob y als Null geschätzt wird, was bedeutet, dass keine explizite Verlagerung stattgefunden hätte, oder ob y gleich x geschätzt wird, was die ursprüngliche Variante bestätigen würde.

5.2 Modellvergleich: Experiment 2

Dieses Experiment wurde durchgeführt, um die Modellvarianten gegeneinander zu testen. Um selbst geringe Differenzen in der Modellanpassung feststellen zu können, war es wichtig, so reliable Daten wie möglich zu erhalten. Außerdem war beabsichtigt, die Fehlerrate gegenüber Experiment 1 möglichst zu reduzieren.

Der experimentelle Plan war größtenteils identisch mit dem in Experiment 1. Zusätzlich zu den Faktoren *Schwierigkeit* (d.h. physikalische Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit), *Objektanzahl* und *Vorhandensein des Zielobjektes* wurde jedoch ein weiterer Faktor ergänzt: Die *Aufgabenbedingung* mit den beiden Stufen *Suche* und *Vergleich*. In der Bedingung *Suche* sollte der Proband das Zielobjekt suchen wie bisher. In der Bedingung *Vergleich* wurde die Position des möglicherweise vorhandenen Zielobjektes vorher angekündigt. Der Proband konnte also seine Aufmerksamkeit im Voraus auf die angekündigte Position richten und hatte nur zu entscheiden, ob das Objekt an dieser Position das Zielobjekt war oder nicht. Dieser Faktor wurde hinzugefügt, um eine numerische Schätzung aller Modellparameter zu ermöglichen. Bereits in der Diskussion zu Experiment 1 (Kapitel 4) war als mögliche Fehlerquelle in der Schätzung der Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer x das Problem beschrieben worden, dass x mehrfach in der Summe „ $x + p_s$ “ in der Modellgleichung auftritt, nur einmal jedoch separat. Dass der separate Verlagerungsparameter jetzt y genannt wurde (vgl. Abschnitt 5.1 und Abbildung 17), hat dieses Problem weiter verschärft, so dass eine separate Schätzung von x aus den gegebenen Modellgleichungen prinzipiell nicht mehr möglich ist. Die neue Aufgabenbedingung *Vergleich* wird modelliert als

$$RT_s(\text{vergl}) = p_s + c \quad (*v)$$

für jede Modellvariante.

Zusammen mit der Modellgleichung für die Aufgabenbedingung *Suche*, wie sie für die vier Modellvarianten in Abbildung 17 wiedergegeben ist, sollte es möglich sein, alle Parameter separat zu schätzen. Weitere Änderungen gegenüber Experiment 1 bezüglich der Anzahl der Probanden, Anzahl der Durchgänge, Bedingungen der Reizpräsentation und Auswahl der Stimuli werden im Folgenden dargestellt.

5.2.1 Methode

Versuchspersonen

Fünf normalsichtige, rechtshändige Probanden (zwei männliche und drei weibliche) im Alter zwischen 21 und 28 Jahren nahmen freiwillig gegen Bezahlung am Experiment teil. Alle waren mit psychologischen Reaktionszeitexperimenten vertraut. Zwei von ihnen (CG und UM) hatten bereits an Experiment 1 teilgenommen.

Apparatur

Computer, Monitor und Antworttasten waren dieselben wie in Experiment 1. Die Monitorauflösung war durch Verwendung einer neuen Grafikkarte (Matrox Millennium) auf 1600 x 1200 Punkte verbessert worden. Die Sehbedingungen waren besser kontrolliert als in Experiment 1: Es wurde ein innen schwarz ausgekleideter Reduktionstunnel verwendet, in dessen Öffnungen hinten der Monitor und vorne eine Gesichtsmaske eingepasst worden waren, durch die die Versuchspersonen auf den Monitor blickten. Dadurch wurden Blickposition und Betrachtungsabstand fixiert und Umgebungslicht (Streulicht des Monitors) abgeschirmt. Der Sehabstand betrug 160 cm.

Reize

Anzahl und geometrische Anordnung der Stimuli waren dieselben wie in Experiment 1, wobei der Durchmesser des imaginären Kreisbogens, auf dem die Objekte positioniert waren, jetzt 8° visueller Winkel betrug. Die verbesserte Monitorauflösung erlaubte es nun, kreisförmige Gitter (Durchmesser: $1,3^\circ$ visueller Winkel) anstelle von Quadraten als Ziel- und Ablenkerobjekte zu verwenden, mit dem Vorteil, dass dadurch die Abstände zwischen benachbarten Objekten an allen Positionen gleich waren ($0,8^\circ$ visueller Winkel). Alle Objekte waren rot (CIE-xy: 0,605 / 0,369) auf grauem Hintergrund (CIE-xy: 0,263 / 0,299, Luminanz $17,5 \text{ cd/m}^2$). Die Ablenkerobjekte hatten eine Ortsfrequenz von $3,2 \text{ cpd}$ und eine Luminanz von $10,0 \text{ cd/m}^2$. Zielobjekte unterschieden sich von Ablenkerobjekten in einer der drei Dimensionen *Helligkeit* (Luminanz), *Ortsfrequenz* oder *Form*. Das Erscheinungsbild und die physikalischen Spezifikationen der Objekte sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Auswahl der Schwierigkeitsstufen basierte wiederum auf einem Vorexperiment mit drei Probanden, die nicht am endgültigen Experiment teilnahmen. Besondere Sorgfalt wurde auf die Auswahl der Extremstufen gelegt: Es wurde sichergestellt, dass das am einfachsten zu erkennende Zielobjekt tat-

sächlich zu einer flachen Reaktionszeitkurve führte, wohingegen das Objekt der schwierigsten Stufe den Ablenkern so ähnlich wie möglich bei noch geringen Fehlerraten sein sollte.



















Experiment	Ablenker	Zielobjekt in Schwierigkeitsstufe				
		5	4	3	2	1
Helligkeit cd/m ²	 10,0	 9,7	 9,2	 8,5	 5,8	 3,8
Ortsfrequenz cpd	 3,2	 3,5	 3,75	 4,0	 4,3	 8,6
Form Breite : Höhe	 1	 0,93	 0,88	 0,83	 0,75	 0,50

Abbildung 18: Erscheinungsbild und physikalische Werte von Ziel- und Ablenkerobjekten in Experiment 2.

Versuchsablauf

Für die Aufgabenbedingung *Suche* entsprach die Prozedur der aus Experiment 1. Lediglich die Anzahl der Durchgänge war erhöht und ihre Reihenfolge leicht verändert worden: Jeder Block (eine Schwierigkeitsstufe mit einer Objektanzahl kombiniert) bestand nun aus 48 Durchgängen. Eine Sitzung bestand aus je einem Block für jede Faktorstufenkombination *Schwierigkeit* × *Objektanzahl* einer perzeptuellen Dimension und dauerte ca. eine Stunde. Für jede perzeptuelle Dimension wurden vier Sitzungen durchgeführt. Um Übungs- und Ermüdungseffekte zu kontrollieren, wurden in jeder zweiten Sitzung die Blöcke in genau umgekehrter Reihenfolge präsentiert (sie begannen also mit zehn Objekten der schwierigsten Stufe statt mit vier Objekten der einfachsten). Die erste Sitzung jeder perzeptuellen Dimension diente als Übungssitzung und wurde nicht in die Auswertung einbezogen. Die Gesamtzahl aller ausgewerteten Durchgänge betrug somit $3 \cdot 48 = 144$ Durchgänge für jede Faktorstufenkombination *Dimension* × *Schwierigkeit* × *Objektanzahl*.

In der Aufgabenbedingung *Vergleich* begann jeder Durchgang mit einem Fixationskreuz an der Position, an der das folgende mögliche Zielobjekt erscheinen würde. Die Probanden wurden instruiert, nur auf diese Position zu achten und zu entscheiden, ob das dort erscheinende Objekt das Zielobjekt ist oder nicht. Da bei dieser Aufgabe eine geringere Streuung der Reaktionszeiten erwartet wurde als bei der Suche, in der die Zielreizposition im Verhältnis zur Position des Suchbeginns eine weitere Varianzquelle darstellt, wurde hier nur eine Sitzung (d.h. 48 Durchgänge) für jede perzeptuelle Dimension durchgeführt.

Insgesamt führte jeder Proband 15 einstündige Sitzungen (vier Such- und eine Vergleichsbedingung für jede der drei perzeptuellen Dimensionen) durch. Die Gesamtzahl der Datenpunkte (Reaktionszeitmittelwerte der einzelnen Faktorstufenkombinationen) betrug

$3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot (4 + 1) = 375^{13}$, die Gesamtzahl der Modellparameter $3 \cdot 5 \cdot (2 \cdot 5 + 4) + 4 - 1 = 213^{14}$. Somit waren die Parameter in diesem Experiment etwas strenger restringiert (1,76 mal so viele Datenpunkte wie Parameter) als in Experiment 1 (1,5 mal so viele Datenpunkte wie Parameter), obwohl der Parameter y für die letzte Aufmerksamkeitsverlagerung hinzugefügt worden war.

Datenanalyse

Die Datenauswertung glich der in Experiment 1, mit der einzigen Änderung, dass die neue Aufgabenbedingung *Vergleich* in die Modellanpassung einbezogen werden musste. Deshalb lautete der zu minimierende Term nun

$$\varepsilon = \sum_{s=1} \sum_{n=4,6,8,10} (E(RT_{s,n}) - M_{s,n}(t))^2 + \sum_{s=1} (E(RT_s(\text{vergl})) - M_s(\text{vergl})(t))^2$$

$E(RT_s(\text{vergl}))$ ist der Erwartungswert der Reaktionszeit in der Bedingung *Vergleich*, der identisch ist zu $RT_s(\text{vergl})$ (siehe Modellgleichung (v*)), da die Reaktionszeit in der Vergleichsbedingung als unabhängig von der Position des Zielobjektes angenommen wurde.

5.2.2 Ergebnisse

Deskriptive Ergebnisse

Fehlerraten. In der Bedingung *Suche* betrug die Fehlerrate insgesamt 2,9 %, wobei die Rate von Auslassungsfehlern 4,1 % und die der falschen Alarme 1,7 % betrug. In der Bedingung *Vergleich* wurden durchschnittlich 2,8 % Fehler gemacht, und zwar 3,5 % Auslassungsfehler und 2,1 % falsche Alarme. Tabelle 6 gibt eine Übersicht der Fehlerraten der Bedingung *Suche* aufgeschlüsselt nach perzeptuellen Dimensionen und Schwierigkeitsstufen. Da die Fehlerraten in der Vergleichsbedingung konsistent unterhalb denen der Suche lagen, werden sie hier nicht extra aufgelistet.

Schwierigkeit	1	2	3	4	5
Auslassungen (Vorhandenes Zielobjekt nicht gefunden)					
Helligkeit	0,7-3,3	0,4-4,0	0,4-3,6	1,4-5,0	3,7-16,6
Ortsfrequenz	1,1-3,9	0,4-4,2	0,4-4,7	1,1-6,7	1,5-13,8
Form	0,0-1,8	0,4-3,3	1,1-4,9	2,9-10,1	11,0-21,2
Falsche Alarme (Zielobjekt gefunden, obwohl nicht vorhanden)					
Helligkeit	0,4-2,9	0,4-1,8	0,0-1,8	0,7-1,1	1,8-5,7
Ortsfrequenz	0,7-2,8	0,0-2,2	1,1-2,1	1,8-4,7	1,5-6,3
Form	0,0-1,5	0,0-0,7	0,0-1,1	0,0-1,4	3,6-9,2

Tabelle 6: Minimale und maximale Fehlerraten in der Suchbedingung in Experiment 2 (für $n = 5$ Probanden).

¹³ 3 Dimensionen \times 5 Probanden \times 5 Schwierigkeitsstufen \times (4 Objektanzahlen *Suche* + *Vergleich*)

¹⁴ 3 Dimensionen \times 5 Probanden \times (5 (p_s) + 5 (d_s) + 1(x) + 1(y) + 1(c) + 1($\sigma(r)$) + 4(l_n)) - 1

Wie schon in Experiment 1 zu beobachten, stiegen die Fehlerraten mit ansteigender Schwierigkeit. Sie lagen jedoch deutlich niedriger als in Experiment 1, so dass dieser Anstieg erst in der höchsten Schwierigkeitsstufe sichtbar wird. Vermutlich reflektiert er wiederum die Diskriminationsschwierigkeit, da die Fehlerraten wiederum hoch ($r = 0,75$, $p < 0,001$) mit den Reaktionszeitmittelwerten korrelierten. Darüber hinaus hatte das Vorexperiment gezeigt, dass in allen drei Dimensionen eine weitere Steigerung der Schwierigkeit zu dramatischen Fehleranstiegen führen würde. Die Rate der falschen Alarme, die als Indikator für „modellsschädliche“ Fehler dient (vgl. Abschnitt 4.3.2), überschritt in keinem Fall 10%. Daher wurden alle Faktorstufen in die weitere Auswertung einbezogen.

Reaktionszeiten. Die Reaktionszeitmittelwerte der positiven Durchgänge eines Probanden sind in Abbildung 19 dargestellt. Für alle Schwierigkeitsstufen wurden wiederum die Steigungen der Reaktionszeitkurven berechnet, deren Ergebnisse in Tabelle 7 wiedergegeben sind (für eine Beschreibung der Methode vgl. Experiment 1).

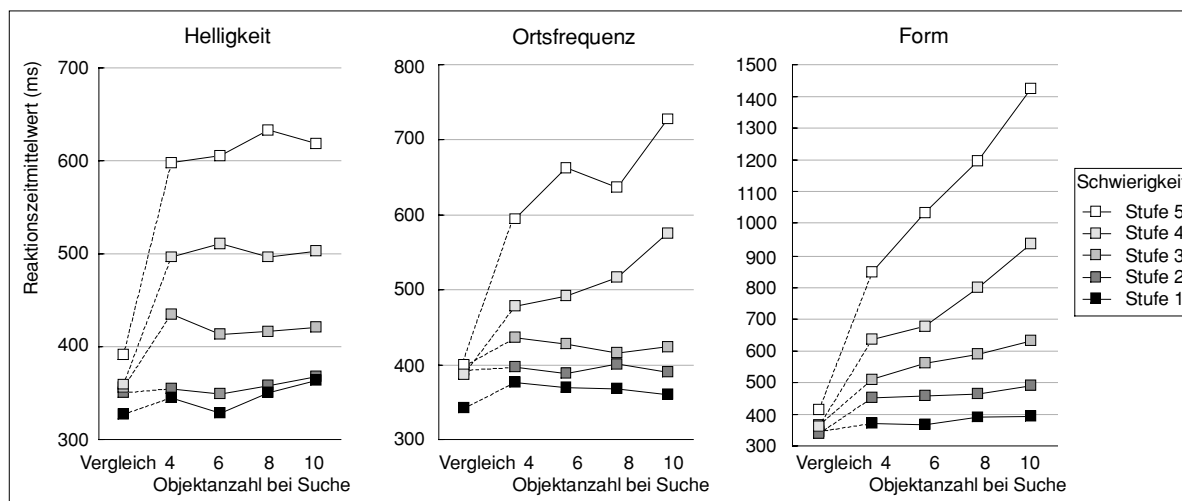


Abbildung 19: Reaktionszeitmittelwerte der positiven Durchgänge eines Probanden in Experiment 2.

In allen drei Dimensionen ist eine Abnahme der Sucheeffizienz mit zunehmender Schwierigkeit zu beobachten. Es gibt dabei allerdings bemerkenswerte Unterschiede zwischen den Dimensionen: In der Formdimension scheint die volle Bandbreite von Pop-Out-Suche bis zur vollständig seriellen Suche vorzukommen. In der Helligkeitsdimension sind vorwiegend flache Kurven zu finden, während keine Kurve das Kriterium für vollständig serielle Suche erfüllt. Die Ortsfrequenzdimension nimmt hier eine Zwischenstellung ein. Es gibt zwar mehr positive Steigungen als in der Helligkeitsdimension, jedoch ebenfalls offensichtlich keine vollständig seriellen Suchen. Das Fehlen vollständig serieller Suchen in der Helligkeits- und Ortsfrequenzdimension erscheint vernünftig, da in diesen Dimensionen ein Zielobjekt nur erkannt werden kann, in dem man es mit dem Nachbarobjekt kontrastiert. Eine effektive Suchstrategie wäre es demnach, die Aufmerksamkeit jeweils zwei Objekten gleichzeitig zuzuweisen, und nicht die Objekte einzeln zu prüfen. Der Form-Zielreiz hingegen (ein Oval unter Kreisen) unterscheidet sich kategoriell von den Ablenkern und kann somit auch entdeckt werden, wenn die Aufmerksamkeit den Objekten einzeln zugeteilt wird. So ist es in dieser Dimension im Gegensatz zu den anderen möglich, mit einer vollständig seriellen Suche die Suchleistung (i.e. Fehlerrate) zu optimieren.

Schwierigkeitsstufe		5		4		3		2		1	
Dimension	Vp	pos	neg	pos	neg	pos	neg	pos	neg	pos	neg
Helligkeit	EM	4	22**	0	20**	-2	-3	2	-4	4	0
	AH	15*	94**	5	6	1	0	1	-1	4	5*
	AK	9*	22**	-1	3	-1	7*	-4*	-5**	1	0
	UM	3	34**	4	5	-7*	2	-4*	-3	3*	2
	CG	6	53**	-4	4	-2	0	-3*	0	2	-1
Ortsfrequenz	EM	19**	77**	16**	28**	-3	-6*	0	2	-2	0
	AH	4	40**	9**	-8*	4*	-7*	1	1	3*	1
	AK	9*	29**	3	1	1	-1	0	0	1	1
	UM	33**	68**	4	23**	0	2	-1	1	0	0
	CG	14*	201**	7*	118**	1	27**	-1	1	-2	-2
Form	EM	95**	205**	51**	149**	19**	87**	6**	12**	4**	3*
	AH	106**	214**	45**	129**	8*	70**	9**	21**	0	7**
	AK	83**	141**	58**	133**	18**	90**	8**	53**	3*	3*
	UM	78**	117**	25**	61**	11**	26**	6*	8*	0	9**
	CG	105**	180**	56**	107**	27**	65**	18**	40**	5*	5*

* p < 0,05, ** p < 0,001

Tabelle 7: Steigungen und Strategieklassifikationen gemäß den notwendigen Bedingungen: Suchen, die vollständig seriell sein könnten, sind weiß markiert, mögliche Pop-Out-Suchen dunkelgrau, und Suchen, die beide notwendigen Bedingungen nicht erfüllen und somit teilseriell sein müssen, hellgrau.

„pos“ und „neg“ bezeichnet Durchgänge mit und ohne Zielobjekt.

Die Aufgabenbedingung *Vergleich* wurde separat ausgewertet. Für alle Probanden und alle Dimensionen wurde hier geprüft,

- (1) ob die Reaktionszeiten mit zunehmender Schwierigkeit monoton anstiegen, was als eine der ursprünglichen Modellannahmen formuliert worden war (Annahme 4) und hier nun explizit überprüft werden kann, und
- (2) ob die Objektanzahl einen Effekt auf die Reaktionszeit hatte, was nicht der Fall sein sollte (vgl. Modellgleichung (*v)).

Für jeden Probanden und jede Dimension wurde eine Varianzanalyse gerechnet mit den Faktoren *Schwierigkeit* und *Objektanzahl*. Die α -Fehler wurden für die Anzahl der Tests ($n = 15$) Bonferroni-korrigiert, und für signifikante Effekte ($p < 0,05$) wurde deren Größe berechnet.

Zu (1): Für alle Probanden und alle Dimensionen war der Haupteffekt des Faktors *Schwierigkeit* signifikant ($p < 0,001$) mit mittleren bis großen Effekten (Effektgrößen zwischen 0,12 und 0,42). Die Monotoniehypothese ($\mu_1 \leq \mu_2 \leq \mu_3 \leq \mu_4 \leq \mu_5$ mit mindestens einer

< - Relation) wurde mit dem T*-Test für monotone Trends geprüft (BERENSON 1976, 1982). Für alle Dimensionen und alle Probanden wurde die Hypothese bestätigt ($p < 0,001$).

Zu (2): In fünf der 15 geprüften Datensätze war der Haupteffekt des Faktors *Objektanzahl* signifikant ($p < 0,01$). In allen diesen Fällen waren die Effekte sehr klein (Effektgrößen zwischen 0,01 und 0,02) und zeigten keine systematische Richtung.

Da der Effekt der Schwierigkeit hochsignifikant und relativ groß war im Gegensatz zum nur teilweise signifikanten und insbesondere sehr kleinen Effekt der Objektanzahl, erscheint es gerechtfertigt, die betreffenden Modellannahmen beizubehalten. In der Modellrechnung wurde somit der Einfluss der Schwierigkeit modelliert, indem unterschiedliche Verweilzeiten p_s für die Schwierigkeitsstufen s angenommen wurden, während der Einfluss der Objektanzahl vernachlässigt wurde.

Ergebnisse der Modellrechnung

Güte der Modellanpassung. Für jede der vier Modellvarianten wurden wie in Experiment 1 die Determinationskoeffizienten R^2 für die 15 Modellanpassungen (drei Dimensionen mit je fünf Probanden) berechnet. Sie lagen in allen Fällen über 0,92. Zum Vergleich der Modelle wurde der Anpassungsfehler $\sqrt{\epsilon}$ herangezogen. Da alle Modellvarianten die gleiche Anzahl Parameter besitzen, können die „Least-Square“-Fehler $\sqrt{\epsilon}$ direkt verglichen werden. Abbildung 20 stellt die Ergebnisse dar.

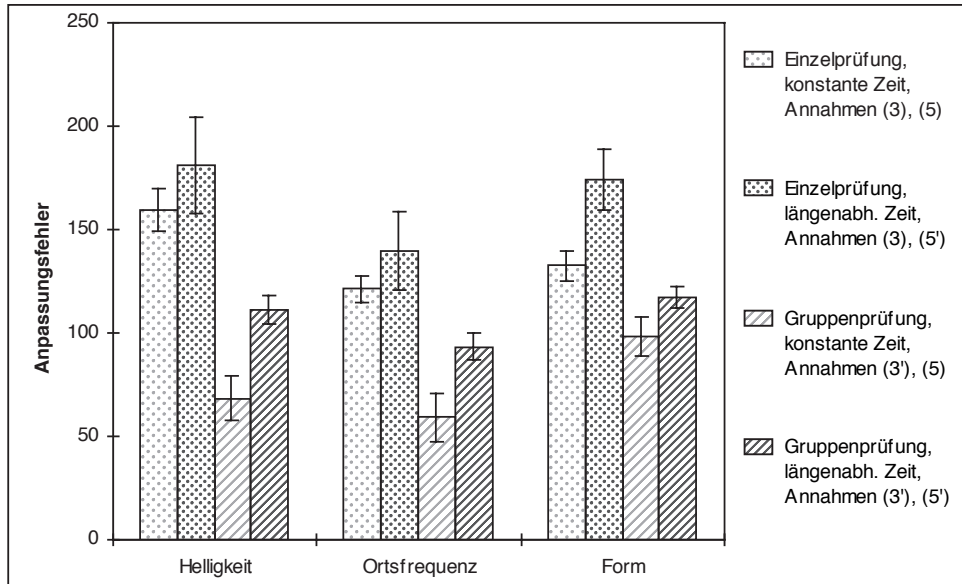


Abbildung 20: Mittlerer Anpassungsfehler ($n=5$) der vier Modellvarianten für die getesteten Reizdimensionen.

Parameterwerte. Tabelle 8 zeigt die Parameterwerte der vier Modellvarianten für die Versuchsperson UM in der Dimension *Form*.

Alle Modelle lieferten ähnliche Werte für die konstante Zeit c . Die Schätzungen für die Verlagerungsgeschwindigkeit v_x in Modellen mit längenabhängiger Verlagerungszeit variierten über die Experimentalbedingungen weitaus mehr als die der Verlagerungsdauer x in den Mo-

dellen mit konstanter Verlagerungszeit. Darüber hinaus traten Schätzwerte von $x = 0$ in den Modellen mit objektweiser Suche auf, nicht jedoch im Modell mit gruppenweiser Suche. Alle Modelle lieferten für den letzten Verlagerungsschritt (explizit auf das Zielobjekt) $y = 0$ bzw. $v_y = \infty$ für einige Datensätze, was bedeutet, dass der letzte Schritt in diesen Fällen nicht stattgefunden hat. Die größte Streuung der Werte für die Aufmerksamkeitsverweildauer p_s war im ersten Modell zu beobachten (objektweise Suche, konstante Verlagerungszeit). Hier traten auch die meisten Nullschätzungen für p_1 auf. Für die d_s -Werte (perzeptueller Zielreiz-Ablenker-Unterschied, der in direkter Beziehung zur Reichweite der Aufmerksamkeit steht) fanden sich größere Streuungen in den Modellen, die gruppenweise Suche annehmen. Grundsätzlich müssen große Streuungen jedoch nicht Indikatoren für ein schlechtes Modell sein, sondern könnten auch einfach Unterschiede in den Suchstrategien reflektieren. Dann sollte man allerdings systematische Einflüsse der Faktoren „Versuchsperson“ oder „Dimension“ erwarten, die hier nicht vorlagen.

Modellvariante		Einzelprüfung, konstante Zeit	Einzelprüfung, längenabh. Zeit	Gruppenprüfung, konstante Zeit	Gruppenprüfung, längenabh. Zeit
Modellannahmen		(3), (5)	(3), (5')	(3'), (5)	(3'), (5')
Konstante Zeit	c [ms]	414	400	376	393
Verlagerungsdauer bzw. -geschwindigkeit	x [ms] vx [°/s]	0	3,6	34	10,4
... im letzten Schritt	y [ms] vy [°/s]	12	4,2	24	11,8
Verweildauer Stufe 5	p ₅ [ms]	80	95	130	141
Verweildauer Stufe 4	p ₄ [ms]	19	146	119	102
Verweildauer Stufe 3	p ₃ [ms]	53	71	84	62
Verweildauer Stufe 2	p ₂ [ms]	13	18	36	41
Verweildauer Stufe 1	p ₁ [ms]	0	0	17	18
Perz. Kontrast Stufe 5	d ₅	1,3	1,7	1,0	< 0,8
Perz. Kontrast Stufe 4	d ₄	1,6	2,1	2,9	1,2
Perz. Kontrast Stufe 3	d ₃	≥ 4	2,5	≥ 4	1,3
Perz. Kontrast Stufe 2	d ₂	≥ 4	2,6	≥ 4	1,8
Perz. Kontrast Stufe 1	d ₁	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4
Geometrische Konstante ... 4 Objekte	l ₄	1,00 (normierter Wert)			
... 6 Objekte	l ₆	1,05	1,19	1,19	1,40
... 8 Objekte	l ₈	1,28	1,25	1,31	1,56
... 10 Objekte	l ₁₀	1,60	1,25	1,33	1,59

Tabelle 8: Parameterwerte der vier Modellvarianten für die Versuchsperson UM in der Dimension *Form*. Für die Parameter d_s („perzeptueller Kontrast“) und l_n („geometrische Konstante“) sind keine Maßeinheiten angegeben, da diese recht unanschaulich wären. Zur Veranschaulichung kann man sich vorstellen, dass das Produkt aus diesen beiden Werten die Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ in Grad visueller Winkel ergibt.

Als Kriterium für die Modellgüte wurde geprüft, inwieweit die geschätzten Parameterwerte der vier Modellvarianten psychologisch valide waren. Das Kriterium hierfür war, dass mit zunehmender physikalischer Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit s die perzeptuelle Differenz d_s , die in direktem Zusammenhang steht zur Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ und der Fokusgröße $f_{s,n}$, monoton abnehmen sollte, während die Aufmerksamkeitsverweildauer p_s monoton steigen sollte. Für jede Modellvariante wurde daher gezählt, in wie vielen der 15 Datensätze beide Punkte des Kriteriums erfüllt waren. Das Ergebnis ist in Tabelle 9 dargestellt.

Modellannahmen	Einzelprüfung der Objekte Annahme (3)	Gruppenprüfung der Objekte Annahme (3')
Konstante Zeit Annahme (5)	2	15
Längenabhängige Zeit Annahme (5')	4	12

Tabelle 9: Anzahl von Datensätzen ($n = 15$), deren Parameterwerte beide Monotoniekriterien und damit die Forderung nach psychologischer Validität erfüllen. Die größte Anzahl ist grau markiert.

Interessanterweise zeigt insbesondere die ursprüngliche Modellvariante (Einzelprüfung, konstante Zeit) eine systematische Abweichung von der Monotonie der p_s -Werte (Verweildauer): Von der schwierigsten ($s = 5$) zur einfachsten ($s = 1$) Stufe beginnen die p_s jeweils wie erwartet monoton zu sinken, „springen“ jedoch wieder auf einen höheren Wert, sobald die Aufgabe so einfach (und damit die Reichweite der Aufmerksamkeit so groß) wird, dass Pop-Out-Suche stattfindet. Dies deutet auf eine systematische Schwäche dieses Modells in der Modellierung der teilseriellen Suche hin, wie im vorangegangenen Kapitel bereits vermutet worden war.

Strategieklassifikationen. Aus den geschätzten mittleren Werten für die Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ ($= d_s \cdot l_n$) wurden die „durchschnittlichen“ Strategien der Probanden in den jeweiligen Aufgabenbedingungen bestimmt und klassifiziert als Pop-Out-Suche, teilserielle oder vollständig serielle Suche (vgl. Abbildung 13). Zur Bewertung der konkurrierenden Modellvarianten wurde gezählt¹⁵, in wie vielen Fällen diese Strategieklassifikationen von den notwendigen Bedingungen an den Reaktionszeitverlauf in der jeweiligen Strategiekategorie bestätigt wurden (für Einzelheiten vgl. Experiment 1, Abschnitt 4.3.2). Tabelle 10 zeigt die Prozentsätze bestätigter Pop-Out- und vollständig serieller Suchstrategien.

¹⁵ Die Zählung basierte auf einer Gesamtheit von 75 experimentellen Bedingungen (5 Probanden x 3 Dimensionen x 5 Schwierigkeitsstufen). Die Modelle liefern darüber hinaus separate Strategieklassifikationen für die verschiedenen Objektanzahlen. Um diese jedoch mit den Steigungen der Reaktionszeitkurven, die sich erst aus den Werten für die vier Objektanzahlen ergeben, vergleichen zu können, mussten die Strategien aus den Modellen über die vier Objektanzahlen gemittelt werden.

Modellannahmen	Einzelprüfung der Objekte Annahme (3)	Gruppenprüfung der Objekte Annahme (3')
Konstante Zeit Annahme (5)	97 / 45	100 / 100
Längenabhängige Zeit Annahme (5')	100 / 88	96 / 100

Tabelle 10: Prozentsatz von Strategieklassifikationen als Pop-Out- / als vollständig serielle Suche, die durch die notwendigen Bedingungen an die Reaktionszeitkurven der betreffenden Strategie bestätigt werden konnten. Die höchsten Prozentsätze sind grau unterlegt.

5.2.3 Diskussion

Im Wettbewerb der vier Modelle gab es einen „klaren Sieger“. In allen drei Bewertungskriterien (Modellanpassung, psychologische Validität der Parameterwerte und Kompatibilität der Strategieklassifikationen mit den Steigungen der Reaktionszeitkurve) erwies sich dasselbe Modell als überlegen, nämlich dasjenige, welches eine gruppenweise Aufmerksamkeitszuteilung sowie eine konstante Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer annimmt. Das zweitbeste Modell nach allen drei Kriterien war dasjenige, welches eine gruppenweise Aufmerksamkeitszuteilung und eine längenabhängige Verlagerungsdauer annimmt. Da es nur unwesentlich schlechter bewertet wurde als das Modell mit der konstanten Verlagerungszeit, soll es nicht von vornherein verworfen werden. Die Modelle hingegen, die eine objektweise Aufmerksamkeitszuteilung beschreiben, zeigten deutliche systematische Schwächen. Neben ihrer schlechteren Modellanpassung zeigte sich ihr Problem am deutlichsten bei den Parameterwerten: Die Aufmerksamkeitsverweilzeiten wurden sehr kurz geschätzt (vgl. Tabelle 8) und zeigten meist nicht die erwartete Monotonie in Bezug auf die Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit. In Anbetracht der Beobachtung, dass es bei den schwierigeren Stufen eine anfängliche Monotonie gab, die jedoch jeweils am Übergang zur Pop-Out-Suche unterbrochen wurde, deutet alles darauf hin, dass diese Modelle in der teilseriellen Suche die Anzahl der Suchschritte überschätzen, wie es bereits in der Diskussion zu Experiment 1 vermutet worden war. Diese Vermutung findet zusätzliche Bestätigung im Fehlen von Strategiebestätigungen insbesondere für die vollständig serielle Suche (vgl. Tabelle 10). Dies lässt eine Tendenz dieser Modelle vermuten, Strategien als vollständig seriell zu klassifizieren, die in Wirklichkeit nur teilseriell waren - d.h. die Anzahl der Suchschritte zu überschätzen.

Eine weitere Frage war, ob die Aufmerksamkeit am Ende des Suchprozesses explizit zum Zielobjekt bewegt wird oder ob das Zielobjekt „aus der Entfernung“ erkannt wird, wenn es sich irgendwo innerhalb des Aufmerksamkeitsfokus befindet. Zu diesem Zweck war der separate Parameter y bzw. v_y eingeführt worden für die Zeitdauer bzw. Geschwindigkeit dieses in Frage stehenden letzten Schrittes. Alle vier Modellvarianten ergaben diesbezüglich dasselbe Ergebnis, nämlich dass sie in einigen Datensätzen y als Null (bzw. v_y als unendlich) schätzen, während sie in anderen y mit einem positiven (bzw. v_y mit einem endlichen) Wert belegen. Dies lässt vermuten, dass in einigen Fällen Probanden ihre Aufmerksamkeit explizit auf das Zielobjekt lenkten, in anderen hingegen nicht. Das beste Modell (gruppenweise Suche, konstante Verlagerungszeit) ergab beispielsweise, dass der letzte Schritt in fünf Datensätzen fehlte (vorwiegend bei Ortsfrequenz-Zielreizen), während er in zehn Datensätzen stattfand. Hier stellt sich die Frage, ob dieser letzte Aufmerksamkeitsverlagerungsschritt dieselbe Zeit-

charakteristik hat wie die vorhergegangenen, d.h. ob y (wenn es ungleich Null ist) gleich oder kleiner als x ist. Die statistische Power ist zu gering, um diese Frage auf der Basis der vorliegenden Daten entscheiden zu können ($M(x) = 40$ ms, $M(y) = 31$ ms, $t(23) = 1,43$, $p = 0,167$).

Reichweite der Aufmerksamkeit und Gruppierung

In Bezug auf den parallelen Verarbeitungsschritt, in dem eine *Aktivierungskarte* berechnet wird, erwies sich WOLFES (1994) *Guided Search*-Modell als gute Basis für die Modellierung von Reaktionszeiten. Das hier bevorzugte Modell, nach dem Objekte in Gruppen abgesucht werden, deren Größe von der Suchschwierigkeit abhängt, stimmt nicht mit WOLFES bevorzugter Idee einer seriellen Aufmerksamkeitszuteilung überein. Es ist jedoch kompatibel mit seinen Bemerkungen über mögliche Modifikationen von *Guided Search*, und es passt zu verschiedenen Befunden anderer Autoren. LEE, KOCH & BROWN (1997) fanden beispielsweise mit einem Doppelaufgabenparadigma, dass, wenn die Aufmerksamkeit auf eine Aufgabe im visuellen Feld zentriert ist, die Diskriminationsschwelle für bestimmte „einfache Merkmale“ außerhalb dieses Aufmerksamkeitszentrums erhöht ist. Dies unterstützt das Konzept einer begrenzten und von der Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit *abhängigen Reichweite der Aufmerksamkeit*: Je schwieriger es ist, das Zielobjekt von den Ablenkern zu unterscheiden, desto näher muss es am Zentrum der Aufmerksamkeit liegen, um entdeckt werden zu können. SAGI & JULESZ (1985) behaupten sogar explizit, um ein Zielobjekt präattentiv entdecken zu können, müsse es innerhalb einer kritischen Entfernung zum Zentrum der Aufmerksamkeit liegen. Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit, dass alle Objekte innerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit simultan geprüft werden, wird auch gestützt durch Arbeiten von PASHLER (1987), TREISMAN & GORMICAN (1988), DUNCAN & HUMPHREYS (1989) und COHEN & IVRY (1991), die alle zu dem Schluss kamen, dass Probanden die Objekte in „Gruppen“ oder „Klumpen“ absuchen und dass innerhalb einer Gruppe die Objekte parallel verarbeitet werden. TREISMAN & GORMICAN ebenso wie DUNCAN & HUMPHREYS nehmen explizit an, dass die Gruppengröße von der Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit abhängt. Im Gegensatz zur Vorstellung von DUNCAN & HUMPHREYS, dem SERR-Modell (HUMPHREYS & MÜLLER 1993, vgl. Abschnitt 2.1.4) sowie auch dem SOS-Modell (GROSSBERG, MINGOLLA & ROSS 1994, vgl. Abschnitt 2.1.5) wurden im hier favorisierten Modell Objekte jedoch nicht aufgrund von Ähnlichkeiten in den Merkmalen, sondern aufgrund räumlicher Nähe zusammengruppiert. Ein expliziter Widerspruch zu den genannten Modellen aus der Literatur ist damit zunächst noch nicht verbunden, da in der vorliegenden Arbeit alle Ablenkerobjekte homogen waren, eine Gruppierung nach Merkmalen also gar nicht zuließen. Allerdings hätten gemäß SERR alle Ablenker eine Gruppe und das Zielobjekt die andere Gruppe bilden müssen, und gemäß SOS wären vermutlich in den meisten Durchgängen drei Gruppen zu erwarten gewesen: das Zielobjekt sowie die Ablenker zu dessen beiden Seiten. Um zum hier entwickelten Modell kompatibel zu sein, in dem die Gruppengröße von der Ziel-Ablenker-Ähnlichkeit anhängt, müsste auch SERR so etwas wie eine Reichweite der Aufmerksamkeit implementieren, d.h. eine maximale Größe der Karten, auf der das Modell effektiv arbeitet, in Abhängigkeit vom Ziel-Ablenker-Kontrast. Dann könnte jede Prüfung einer Objektgruppe (auch in aufeinander folgenden Fixationen) von einem neuen SERR-Prozess beschrieben werden. Das vorliegende Modell würde dann den Ablauf der Suche auf Suchschritzebene beschreiben, und SERR das Geschehen innerhalb jedes Suchschrittes (wofür der Auflösungsgrad des vorliegenden Modells nicht ausreicht). Ob dies den Intentionen der Autoren von SERR entsprechen würde, ist jedoch fraglich, da mit der aufgabenabhängigen Größenbeschränkung der Karten ein impliziter Aufmerksamkeitsfokus in

SERR eingeführt würde. GROSSBERG's SOS wäre mit dem hier favorisierten Modell kompatibel, wenn nicht nur der Kontrast der Objekte zum Hintergrund (Parameter C) die Gruppierung beeinflussen würde, sondern auch der Kontrast der Objekte untereinander.

Das hier beschriebene Modell ist weiterhin kompatibel mit Ergebnissen aus *offenen* Suchaufgaben: ZELINSKY, RAO, HAYHOE & BALLARD (1997) untersuchten die Abfolge von Suchschritten mit Hilfe von Augenbewegungsmessungen und fanden, dass die Probanden die Objekte in Gruppen absuchten, deren Größe sukzessive reduziert wurde, bis das Zielobjekt gefunden war. Der Unterschied zwischen ihrem Experiment und den hier verwendeten war, dass ihre Probanden das Zielobjekt nicht im Voraus kannten. Die beiden Konzepte, dass zum einen Probanden ihre Fokusgröße schrittweise anpassen, wenn das Zielobjekt nicht bekannt ist, den Fokus andererseits bei geblockten Präsentationen bekannter Zielobjekte auf eine konstante Größe adjustieren, könnte zu einem umfassenderen Modell integriert werden.

Eigenschaften und Zeitdauer von Aufmerksamkeitsverlagerungen

Ein zweites Ergebnis war, dass Aufmerksamkeit nicht analog, sondern in diskreten Schritten durch den Raum bewegt wird, d.h. die Zeitdauer einer Verlagerung scheint ein konstanter Wert, unabhängig von der Länge der Verlagerung, zu sein. Dies stimmt mit dem Ergebnis überein, zu dem EGETH & YANTIS in ihrem Überblicksartikel (1997) kommen, und beispielsweise mit Ergebnissen von KWAK, DAGENBACH & EGETH (1991). Die gegenteiligen Arbeiten von SHULMAN, REMINGTON & MCLEAN (1979) sowie von TSAL (1983) wurden von zahlreichen Autoren (vgl. EGETH & YANTIS) aufgrund methodischer Schwächen kritisiert. Es muss allerdings erwähnt werden, dass in der vorliegenden Arbeit die Entscheidung zugunsten des Modells, das eine abrupte Aufmerksamkeitsverlagerung annimmt, nicht sehr klar ausgefallen ist. Die Ursache mag darin liegen, dass in den vorliegenden Experimenten 1 und 2 die Probanden ihre Augen frei bewegen durften. Es ist bekannt, dass Sakkaden über eine längere Entfernung länger dauern als kurze Sakkaden (z.B. ROBINSON 1964). Da der Zusammenhang zwischen Sakkadendauer und -länge ein linearer und kein proportionaler ist, und da die Probanden möglicherweise nicht jede Aufmerksamkeitsverlagerung mit einer Sakkade begleitet haben, ist es nicht auszuschließen, dass das Modell mit der „analogen Verlagerung“ zwar schlechter abgeschnitten hat als das mit der „konstanten Verlagerung“, dass jedoch keines von beiden den Suchprozess wirklichkeitstreu beschreibt. Zusammengefasst gibt es einige Evidenz, dass Aufmerksamkeitsverlagerungen ohne Augenbewegungen (sogenannte *verdeckte* Verlagerungen) abrupt vollzogen werden mit einer konstanten Zeitdauer, während Aufmerksamkeitsverlagerungen mit Augenbewegungen einen linearen Zeitverlauf aufweisen. Ob die Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer auf andere Werte geschätzt wird, wenn die Probanden die Augen nicht bewegen im Vergleich zu freien Augenbewegungen, soll in einem weiteren Experiment (vgl. Kapitel 7) untersucht werden.

Die hier geschätzten Zeiten für eine Verlagerung der Aufmerksamkeit betragen zwischen 17 ms und 69 ms, mit einem Mittelwert von 40 ms. In der Literatur hingegen wurde meist die „auf einem Objekt verbrachte Zeit“ untersucht, eine Größe, in der die Verweildauer auf dem Objekt und die Verlagerungsdauer zum nächsten Objekt zusammengefasst sind und deren Schätzung darüber hinaus häufig mit fehlerhaften Annahmen über serielle Suchprozesse behaftet ist. Solche Schätzungen weisen eine große Bandbreite auf, die von 17 ms bis zu 500 ms reicht (EGETH & YANTIS 1997). Die große Streuung ist möglicherweise auch auf große Unterschiede in den tatsächlichen Verweilzeiten der Aufmerksamkeit zurückzuführen (vgl. den

folgenden Abschnitt). In Arbeiten, die die Verlagerung der Aufmerksamkeit direkt untersucht haben, führten die Probanden meist nur eine einzige Verlagerung durch. Dabei wurden deutlich längere Zeiten gefunden als hier, beispielsweise 200 ms in den frühen Experimenten von ERIKSON & COLLINS (1966), oder 500 ms bei WARD & DUNCAN (1996). MÜLLER & RABBITT (1989) fanden einen Unterschied zwischen exogen (175 ms) und endogen (400 ms) ausgelösten Verlagerungen. Die Abweichung all dieser Werte von den hier geschätzten kann erklärt werden, wenn man annimmt, dass die initiale Verlagerung der Aufmerksamkeit auf einen Hinweisreiz hin wesentlich längere Zeit benötigt (Latenz) als die folgenden Verlagerungen in einer Suchaufgabe. Wenn nämlich tatsächlich jede Aufmerksamkeitsverlagerung 200 ms oder 500 ms dauern würde, wären Reaktionszeiten in seriellen Suchaufgaben um ein Vielfaches länger als üblicherweise in der betreffenden Literatur zu finden. Wenn hingegen nur die initiale Verlagerung eine längere Latenz hat, ist diese im vorliegenden Modell in der konstanten Zeit c enthalten. Eine alternative Erklärung wäre, dass die Verlagerung der Aufmerksamkeit und ihr Verweilen auf den Objekten in Wirklichkeit überlappende Prozesse sind. Die Additivitätsannahme des Modells würde dann dazu führen, dass die Parameterschätzungen nur den nicht überlappenden Teil der Verlagerung wiedergeben, woraus eine Unterschätzung der tatsächlichen Dauer resultieren würde.

Weiterhin wurde die Frage gestellt, ob im letzten Schritt der visuellen Suche die Aufmerksamkeit direkt zum Zielobjekt bewegt wird (die y genannte Zeitdauer), oder ob das Zielobjekt aus der Entfernung gefunden wird. Für beide Alternativen gab es Evidenz: Während in einem Drittel der Suchaufgaben y auf Null geschätzt worden war, was darauf hindeutet, dass der letzte Schritt nicht ausgeführt wurde (zumindest nicht vor der Antwort), wurde in zwei Dritteln der Suchaufgaben y auf eine ähnliche Zeitdauer wie x , die übrigen Verlagerungsschritte, geschätzt. Dieser qualitative Unterschied zwischen den Suchaufgaben stimmt mit einem Ergebnis von ZELINSKY & SHEINBERG (1997) überein. Sie untersuchten Sakkaden bei visuellen Suchaufgaben und fanden, dass bei Pop-Out-Suchen die Probanden im Mittel 0,79 Sakkaden ausführten (was bedeutet, dass in 79 % der Aufgaben eine Sakkade ausgeführt wurde und in 21 % nicht). Vermutlich wechseln Probanden ihre diesbezügliche Strategie nicht nur zwischen Aufgabentypen, sondern von Durchgang zu Durchgang, was mit dem vorliegende Modell aufgrund mangelnder Auflösung nicht erkannt werden kann. Im Mittel stimmten die Ergebnisse jedoch insoweit überein, dass in der Mehrzahl der Fälle der letzte Verlagerungsschritt ausgeführt wird. NOTHDURFT (1998) fand in einem verdeckten Aufmerksamkeitsparadigma ebenfalls, dass bei der Pop-Out-Suche die Aufmerksamkeit gewöhnlich explizit zum Zielobjekt hin bewegt wird. Zusammengefasst scheint es wachsende Evidenz zu geben, mit der die vorliegenden Ergebnisse übereinstimmen, dass die sogenannte „parallele“ oder „präattentive“ Suche sich qualitativ nicht von der „seriellen“ oder „attentiven“ Suche unterscheidet, insofern, dass die parallele Suche als serielle Suche mit einem einzigen Schritt angesehen werden kann.

Es konnte nicht entschieden werden, ob dieser letzte Verlagerungsschritt (der in der Pop-Out-Suche der einzige ist), kürzere oder gleiche Zeit benötigt wie die vorangegangenen Schritte. Eine kürzer geschätzte Zeit könnte auf die eben erwähnte Möglichkeit zurückzuführen sein, dass dieser letzte Schritt in Wirklichkeit zwar die gleiche Zeit benötigt, jedoch nicht in allen Suchdurchgängen vollzogen wird. Es ist jedoch auch denkbar, dass der letzte Schritt tatsächlich kürzer dauert, da er exogen veranlasst wird (die Aufmerksamkeit wird vom Zielobjekt angezogen), während die übrigen Verlagerungen endogen gesteuert werden. Es gibt qualitative Unterschiede zwischen endogen und exogen gesteuerten Aufmerksamkeitsverlagerungen

(THEEUWES 1993), für die auch unterschiedliche Zeitcharakteristika gefunden wurden (MÜLLER & RABBITT 1989). Die Frage bedarf der weiteren Aufklärung.

Aufmerksamkeitsverweildauer

Die Ergebnisse, wie lange die Aufmerksamkeit auf den einzelnen (Gruppen von) Objekten verweilt, sind eindeutig und stimmen mit der Literatur überein. Nicht nur in den Modellrechnungen, sondern auch in den Reaktionszeitdaten der Aufgabenbedingung *Vergleich* zeigte sich ein monotoner Anstieg der Verweildauer mit zunehmender Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit. Ähnliche Ergebnisse wurden beispielsweise von DEHAENE (1989) oder HOOGE & ERKELENS (1996) berichtet, und die Schlussfolgerung, dass die Verweildauer oder Fixationszeit von der Aufgabenschwierigkeit abhängt, findet sich in verschiedenen Überblicksartikeln zur visuellen Aufmerksamkeit (z.B. EGETH & YANTIS 1997).

Kapitel 6

Validität des Modells und der Parameterwerte

6.1 Allgemeine Überlegungen

Es ist gezeigt worden, dass es durch die Modellierung der Reaktionszeiten in unterschiedlich effizienten Suchen möglich ist, zwischen verschiedenen theoretischen Konzepten des Suchprozesses zu unterscheiden, und zwar insbesondere bezüglich Konzepten über die serielle Verarbeitungsstufe. Das Anpassen von Modellen an empirische Reaktionszeiten erlaubt eine detailliertere Bestimmung der Beschaffenheit der Suchschritte, ihrer Abfolge, ihrer Anzahl und ihrer Zeitdauer als die traditionelle Methode der Steigungsanalyse.

Die wesentliche Frage, die sich an diesem Punkt stellt, ist die nach der Validität der Modelle und ihrer geschätzten Parameterwerte, d.h. ob und unter welchen Bedingungen ein Modell, das alle hier verwendeten Evaluationskriterien erfüllt, die tatsächliche Abfolge von Suchschritten beschreibt, und ob die Parameterwerte tatsächlich die entsprechenden Zeiten bzw. Größen der angenommenen Subprozesse wiedergeben. Der zweite Teil der Frage ist relativ leicht zu beantworten: Wenn das Modell selbst valide ist, dann sind auch alle Parameterwerte valide, insofern sie eindeutig durch die Modellgleichungen bestimmt sind. Angenommen, das beste der hier getesteten Modelle (gruppenweise Verarbeitung der Objekte, konstante Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer, überwiegend explizite Verlagerung der Aufmerksamkeit auf das Zielobjekt) beschreibt den tatsächlichen Suchprozess in Experiment 2: Welche Parameterwerte sind dann eindeutig bestimmt? Eine genaue Betrachtung der Modellgleichungen (vgl. Abbildung 17) für die verschiedenen experimentellen Bedingungen – Aufgabe *Suche / Vergleich*, *Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit* und *Objektanzahl* – lässt erkennen, dass die Eindeutigkeit eines Parameters wesentlich von den Werten der anderen Parameter abhängt. Sind beispielsweise die meisten Suchstrategien eines Datensatzes effizient (hohe Werte für $r_{s,n}$), dann ist die Anzahl der Schritte „ $p_s + x$ “ Null für alle s und folglich der niedrigste p_s -Wert, nämlich p_1 , nicht eindeutig bestimmt, sondern konfundiert mit dem Wert für die konstante Zeit c . Ebenso ist es nicht möglich, die Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer x oder y eindeutig zu bestimmen, wenn alle Suchstrategien in einem Datensatz sehr effizient (Pop Out) oder sehr ineffizient (vollständig seriell) sind. Letzteres kam in Experiment 2 nicht vor, der erstgenannte Fall scheint jedoch in zwei der 15 Datensätze aufgetreten zu sein: Hier war in keiner der Schwierigkeitsstufen die Suche ineffizient genug, um eine valide Schätzung der Verweildauer p_1 zu ermöglichen, so dass p_1 in diesen Fällen auf Null geschätzt wurde. Insgesamt hängt die Validität der Parameterschätzung entscheidend von einer ausreichenden Ver-

schiedenheit von Sucheffizienzen im zugrundeliegenden Experiment ab. Mit einer Simulationsstudie könnte geprüft werden, wie robust die einzelnen Parameter gegenüber Abweichungen von optimalen Mustern in den empirischen Daten sind.

Die andere Frage – die Validität des Modells an sich – kann aufgrund der bisher präsentierten Daten nicht beantwortet werden. Die Tatsache, dass das Modell alle Evaluationskriterien erfüllte (sehr gute Modellanpassung, bestmögliche psychologische Validität der Parameter und Kompatibilität der Strategieschätzungen mit den Steigungen der Reaktionszeitkurven), deutet zwar darauf hin, dass es tatsächlich den Suchprozess richtig beschreibt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass dasselbe Ergebnis auch mit anderen Reaktionszeitgleichungen produziert werden könnte, oder dass dieselben Reaktionszeitgleichungen auch aus anderen theoretischen Annahmen hervorgehen könnten. Im letzteren Fall würden die Werte der Modellparameter nicht die tatsächlichen Zeiten bzw. Größen der postulierten Subprozesse wiedergeben. Um diese Möglichkeit auszuschließen und damit das Modell zu validieren, wurden die Werte wesentlicher Modellparameter experimentell überprüft.

6.2 Validierung der Reichweite der Aufmerksamkeit: Experiment 3

Der zentrale Parameter im Modell, der sowohl das zugrundeliegende theoretische Konzept begründet als auch die einzelnen Suchstrategien bestimmt, ist *die Reichweite der Aufmerksamkeit*. Bei der bisherigen Datenlage wären insbesondere zwei Möglichkeiten vorstellbar, bei denen ein tatsächlich anderer Suchprozess zu den gegebenen Werten für den Parameter *Reichweite der Aufmerksamkeit* (und damit der Fokusgröße) führen könnte. Es ist denkbar, dass Versuchspersonen in Wirklichkeit eine weniger optimale Suchstrategie anwenden, indem sie bei der Verlagerung des Aufmerksamkeitsfokus einzelne Elemente mehrfach prüfen. Zum einen wäre dies der Fall, wenn sie mit einem größeren als dem geschätzten Fokus suchen, die Fokusse sich dabei jedoch überlappen, d.h. nicht um die optimale Länge verlagert werden (vgl. Abbildung 21a). Zum anderen könnte ihre Suche vollkommen unsystematisch sein, d.h. die Annahme, dass die Objekte in der Reihenfolge ihrer Anordnung auf dem Kreis abgesucht werden, unzutreffend sein (vgl. Abbildung 21b).

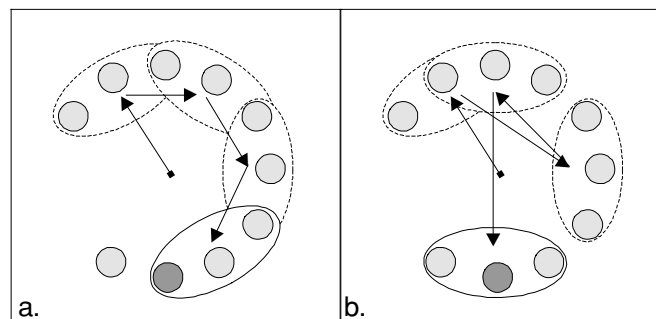


Abbildung 21: Zwei Möglichkeiten einer Suche mit unvollkommenem Gedächtnis: systematische Suche mit unvollkommenen Verlagerungen (a) und unsystematische Suche (b).

Beide Möglichkeiten entsprechen der Vorstellung einer Suche ohne Gedächtnis bzw. mit unvollkommenem Gedächtnis. Die Frage, ob die visuelle Suche über ein Gedächtnis verfügt, so dass Objekte niemals mehrfach geprüft werden, oder ob sie mehr oder weniger gedächtnislos

ist, wurde bereits in den 60er Jahren diskutiert (z.B. WILLIAMS 1966), und ist in der neuesten Literatur wieder aufgeworfen worden (HOROWITZ & WOLFE 1998).

In den hier formulierten und getesteten Modellen war bisher immer ein vollkommenes Gedächtnis der Suche angenommen worden. Sollte diese Vermutung nicht zutreffen, wäre die Größe des Aufmerksamkeitsfokus von den Modellen unterschätzt worden. (Beispielsweise hätten die Versuchspersonen in Experiment 2 in Wirklichkeit mit einem größeren Fokus als mit dem im Modell errechneten gesucht, wenn sie ihn unvollkommen verlagert hätten). Daher soll im folgenden Experiment die errechnete Fokusgröße empirisch überprüft werden. Dazu wurde die bisherige Aufgabe in folgender Form abgewandelt: Vor jedem Suchdurchgang wurde eine zusammenhängende Teilmenge von Positionen angekündigt, auf denen das Zielobjekt erscheinen konnte, indem diese Positionen durch Hinweisreize markiert wurden (vgl. Abbildung 22).

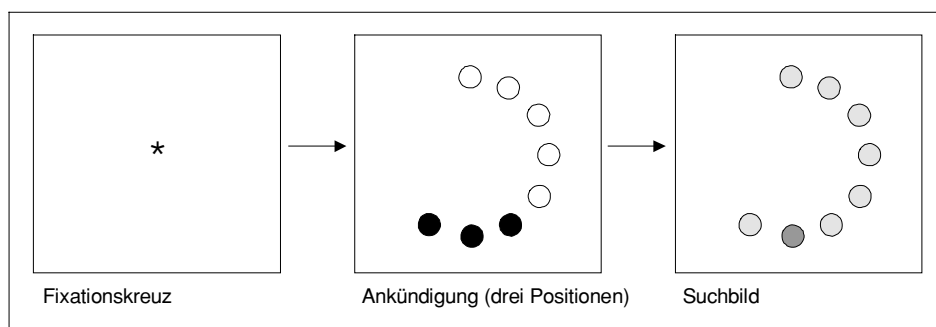


Abbildung 22: Beispiel eines Suchdurchganges in Experiment 3: Eine zusammenhängende Teilmenge von Positionen wird angekündigt, in der das Zielobjekt zu suchen ist.

Die Anzahl von Hinweisreizen wurde zunehmend gesteigert. Die Extremfälle „eine Position angekündigt“ und „alle Positionen angekündigt“ entsprechen den bisherigen Aufgabenbedingungen *Vergleich* und *Suche*. Die Reaktionszeiten aus diesen Bedingungen wurden als Datenbasis für die Modellierung verwendet. Für die sich daraus ergebenden Werte für die Reichweite der Aufmerksamkeit (d.h. die Anzahl von Objekten im Aufmerksamkeitsfokus) wurde anhand der übrigen Daten die folgende Hypothese geprüft: Werden weniger Positionen angekündigt als der Aufmerksamkeitsfokus umfasst, ist die Suche effizient (Pop-Out-Suche). Übersteigt die Zahl der Hinweisreize jedoch die errechnete Größe des Aufmerksamkeitsfokus, wird die Suche ineffizient.

6.2.1 Methode

Versuchspersonen

Das Experiment wurde von drei Versuchspersonen durchgeführt, die schon an Experiment 2 teilgenommen hatten: AH (männlich, 25 Jahre), CG (weiblich, 27 Jahre) und EM (weiblich, 22 Jahre).

Apparatur und Reize

Der Versuchsaufbau entsprach in technischer Hinsicht dem von Experiment 2. Die Suchbilder und das experimentelle Design wurden ebenfalls Experiment 2 entnommen. Die Anzahl von Faktorstufen wurde jedoch reduziert: Es wurden nur die perzeptuellen Dimensionen *Ortsfrequenz* und *Form* mit den Schwierigkeitsstufen 1, 3, 4 und 5 (vgl. Abbildung 18) sowie den Objektanzahlen 4, 6 und 8 verwendet. Als zusätzlicher Faktor wurde die Anzahl von Hinweisreizen variiert, und zwar in allen Stufen von einem Hinweisreiz bis zur jeweiligen Objektanzahl. Als Hinweisreize dienten schwarz ausgefüllte Kreise in der Größe der Suchobjekte.

Versuchsablauf

Jeder Durchgang begann mit einem Fixationskreuz in Bildschirmmitte. Nach einer Sekunde erschienen die Hinweisreize, die nach einer weiteren Sekunde vom Suchbild gefolgt wurden. Es blieb sichtbar, bis die Versuchsperson eine der beiden Antworttasten drückte. In der Hälfte der Durchgänge war das Zielobjekt vorhanden, in der anderen Hälfte nicht. Durchgänge mit und ohne Zielobjekt erschienen in randomisierter Reihenfolge. Die Position des Kreisbogens von Objekten innerhalb des imaginären Kreises, die Position der Gruppe von Hinweisreizen innerhalb des Kreisbogens sowie die Position des Zielobjektes innerhalb der angekündigten Teilmenge waren ebenfalls randomisiert.

Die Durchgänge waren zu Blöcken gleicher Schwierigkeit, Anzahl von Hinweisreizen und Objektanzahl zusammengefasst (pro Block 24 Durchgänge), um es den Probanden zu ermöglichen, für jede experimentelle Bedingung (*Schwierigkeit / Anzahl der Hinweisreize / Objektanzahl*) die optimale Suchstrategie zu finden und anzuwenden. Fehlerhaft beantwortete Durchgänge wurden innerhalb desselben Blockes erneut präsentiert. Zusätzliche 24 Durchgänge zu Beginn jeder Sitzung und 4 Durchgänge zu Beginn jedes Blockes waren Übungsdurchgänge ohne Wertung. Nach jedem Block konnten die Probanden eine Pause machen, während der sie den abgedunkelten Raum nicht verlassen durften. Die Blöcke wurden in ansteigender Schwierigkeit dargeboten, innerhalb jeder Schwierigkeitsstufe mit ansteigender Zahl von Hinweisreizen und innerhalb einer Anzahl von Hinweisreizen mit ansteigender Objektanzahl. Eine Sitzung enthielt alle Blöcke einer perzeptuellen Dimension und dauerte ungefähr 1,5 Stunden. In jeder zweiten Sitzung wurden die Blöcke in genau umgekehrter Reihenfolge präsentiert, um Übungs- und Ermüdungseffekte zu kontrollieren. Insgesamt bestand ein Teilerperiment (d.h. eine perzeptuelle Dimension) aus acht Sitzungen, so dass jede Faktorstufenkombination (*Dimension / Schwierigkeitsstufe / Objektanzahl / Anzahl Hinweisreize / Zielobjekt vorhanden bzw. nicht vorhanden*) 96 Durchgänge enthielt. Aus Zeitgründen führte die Versuchsperson AH nur das Ortsfrequenzexperiment und EM nur das Formexperiment durch.

Datenanalyse und Hypothesen

Nach Bestimmung der Fehlerraten wurden nur die positiven Durchgänge (Zielobjekt vorhanden und erkannt) weiter ausgewertet. Zur Ausreißerkontrolle wurden wie bisher alle Reaktionszeiten eliminiert, die außerhalb eines Intervalls von zwei Standardabweichungen um den Mittelwert der jeweiligen Faktorstufenkombination lagen. Insgesamt betraf dies 4,98 % aller Durchgänge. Die Reaktionszeiten wurden auf zwei Weisen ausgewertet:

Zum einen wurden aus den Reaktionszeitmittelwerten der Bedingungen *eine Position angekündigt* (ein Hinweisreiz) und *alle Positionen angekündigt* (Hinweisreiz- gleich Objektanzahl)

wie bisher die Suchstrategien bestimmt, da Ersteres der Bedingung *Vergleich* und Letzteres der Bedingung *Suche* in Experiment 2 entsprach. Hier wurde zunächst geprüft, ob die Reaktionszeitkurven der Bedingung *alle Positionen angekündigt* auf eine ausreichende Bandbreite von Sucheigenschaften schließen ließen, um reliabel die Modellparameter schätzen zu können (vgl. Abschnitt 6.1). Anschließend wurde das beste Modell aus Kapitel 5, welches eine gruppenweise Verarbeitung der Objekte und eine konstante Verlagerungsdauer postuliert, an diese Daten angepasst. Die Datenanpassung erfolgte wie in Experiment 2.

In einem zweiten Auswertungsteil wurden dann die Reaktionszeiten der übrigen Anzahlen von Hinweisreizen verwendet, um die geschätzten Werte für die Größen des Aufmerksamkeitsfokus zu validieren. Dazu wurden für jede Schwierigkeitsstufe folgende Hypothesen geprüft:

Sei f die geschätzte Fokusgröße, d.h. die Anzahl von Objekten innerhalb der geschätzten Reichweite der Aufmerksamkeit. Sei $RT(h)$ die mittlere Reaktionszeit bei h dargebotenen Hinweisreizen ($h = 2, \dots, 7$). Dann lautet die Hypothese:

$$(i) RT(2) = \dots = RT(f) < RT(f+1)$$

Es wird also erwartet, dass die Anzahl von Hinweisreizen keinen Effekt auf die Reaktionszeit hat, wenn weniger oder gleich viele Positionen angekündigt werden als der Aufmerksamkeitsfokus umfassen kann, und dass die Reaktionszeit ansteigt, sobald die Anzahl angekündigter Positionen die Kapazität des Aufmerksamkeitsfokus überschreitet. Leider lässt sich eine geschätzte Fokusgröße $f = 1$ hiermit nicht validieren¹⁶. Deshalb wird folgende erweiterte Hypothese geprüft:

$$(ii) \text{ Falls } f = 1, \text{ dann } RT(2) < RT(3) < RT(4)$$

Um die Vorhersage für $f = 1$ (nach (ii)) von der für $f = 2$ (nach (i)) unterscheiden zu können, wird die Hypothese für die Fokusgröße $f = 2$ ebenfalls erweitert:

$$(iii) \text{ Falls } f = 2, \text{ dann } RT(2) < RT(3) = RT(4)$$

Es wird also erwartet, wenn das Suchbild in Gruppen zu je zwei Objekten abgesucht wird, dass dann der Übergang zwischen zwei und drei angekündigten Positionen zu einer Verlängerung der Reaktionszeit führt, nicht jedoch der zwischen drei und vier angekündigten Objekten. Diese Logik ließe sich prinzipiell auch auf höhere Fokusgrößen und auf mehr Hinweisreize ausdehnen. Aus statistischen Gründen soll die Anzahl der Vergleiche jedoch auf das absolut nötige Maß beschränkt bleiben, da jeder zusätzliche Vergleich aufgrund der zusätzlichen α -Fehler-Korrektur zu einem Verlust an statistischer Teststärke führen würde. Insgesamt wurde also für $f = 1$ Hypothese (ii), für $f = 2$ Hypothese (iii) und für $f \geq 3$ Hypothese (i) geprüft.

¹⁶ Man könnte für $f = 1$ erwarten, dass $RT(1) < RT(2)$ ist. Abgesehen davon, dass $RT(1)$ für die Hypothesenprüfung nicht verwendet werden sollte, da es bereits in die Parameterschätzung eingegangen ist, würde die angegebene Differenz auch keine Rückschlüsse auf die Fokusgröße erlauben, da für *alle* geschätzten Fokusgrößen $RT(1) < RT(2)$ zu erwarten ist: Wenn tatsächlich, wie es Experiment 2 ergeben hat, im letzten Suchschritt die Aufmerksamkeit explizit auf das Zielobjekt verlagert wird, enthält die Bedingung $h = 2$ immer einen zusätzlichen Schritt gegenüber $h = 1$, so dass hier eine längere Reaktionszeit zu erwarten ist.

6.2.2 Ergebnisse

Deskriptive Ergebnisse

Fehlerraten. Die Fehlerrate betrug für Versuchsperson AH im Ortsfrequenzexperiment 2,6 %, für CG im Ortsfrequenzexperiment 1,3 %, für CG im Formexperiment 2,2 % und für EM im Formexperiment 5,8 %. Damit lagen alle Fehlerraten so niedrig, dass sie keiner weiteren Betrachtung unterzogen wurden.

Reaktionszeiten. Die Auswertung der Reaktionszeiten der Bedingung „Anzahl Hinweisreize = Objektanzahl“ (d.h. $h = n$) ergab in allen vier Datensätzen ein Kontinuum von Sucheffizienzen (vgl. Abbildung 23), wie es für eine reliable Parameterschätzung erforderlich ist. Es erscheint allerdings fraglich, ob die leichteste Stufe tatsächlich in allen Fällen zu einer Pop-Out-Suche geführt hat. Diese Frage ist jedoch nicht kritisch für die Schätzung der Modellparameter.

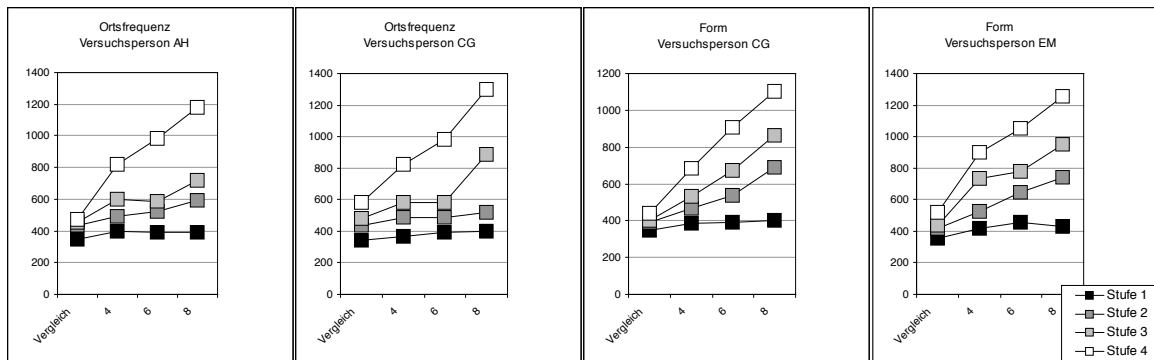


Abbildung 23: Sucheffizienzen in Experiment 3. Ausgewertet wurden hierfür die Durchgänge, in denen alle Positionen angekündigt wurden, die Anzahl der Hinweisreize also gleich der Objektanzahl war.

Ergebnisse der Modellrechnung

Tabelle 11 zeigt die Parameterschätzungen für die vier Datensätze. Da es aus statistischen Gründen nicht sinnvoll wäre, in jedem Datensatz alle 24 Reichweiten der Aufmerksamkeit (vier Schwierigkeitsstufen mal drei Objektanzahlen) separat validieren zu wollen, und da insbesondere aufgrund der Modellannahmen die Reichweiten der drei Objektanzahlen in einer festen Relation zueinander stehen (vgl. Abschnitt 4.2.2, Gleichung 2.2), wurden die Reichweiten der Aufmerksamkeit jeweils über die drei Objektanzahlen einer Schwierigkeitsstufe gemittelt und daraus die „mittlere Anzahl der Objekte im Fokus“ f_s für jede Schwierigkeitsstufe s berechnet.

Parameter		Ortsfrequenz, AH	Ortsfrequenz, CG	Form, CG	Form, EM
Konstante Zeit c [ms]	c	296	333	271	334
Verlagerungsdauer [ms]	x	23	35	35	36
... im letzten Schritt [ms]	y	24	32	14	1
Verweildauer Stufe 4 [ms]	p ₄	179	169	147	172
Verweildauer Stufe 3 [ms]	p ₃	176	198	88	101
Verweildauer Stufe 2 [ms]	p ₂	120	128	110	116
Verweildauer Stufe 1 [ms]	p ₁	68	18	103	20
Fokusgröße Stufe 4 [Objekte]	f ₄	1	1	1	1
Fokusgröße Stufe 3 [Objekte]	f ₃	3	4	1	1
Fokusgröße Stufe 2 [Objekte]	f ₂	3	≥ 7	2	2
Fokusgröße Stufe 1 [Objekte]	f ₁	≥ 7	≥ 7	≥ 7	2

Tabelle 11: Parameterwerte für die vier Datensätze aus Experiment 3

Nach den Parameterwerten sieht es so aus, dass in der schwierigsten Stufe in allen Fällen eine vollständig serielle Suche angewendet wurde. Die einfachste Stufe hat in drei Fällen zu einer Pop-Out-Suche geführt, während in einem Telexperiment (Versuchsperson EM, Form) hier recht ineffizient (in Gruppen zu je zwei Objekten) gesucht wurde. Die Zeitparameter entsprechen in der Größenordnung denen aus Experiment 2.

Hypothesenprüfung

Aufgrund der geschätzten Werte für die Fokusgröße (Tabelle 11) können die oben formulierten Hypothesen nun für die einzelnen Datensätze spezifiziert werden. Tabelle 12 gibt eine Übersicht über die aus den Fokusgrößen abgeleiteten Hypothesen.

Stufe	AH, Ortsfrequenz	CG, Ortsfrequenz	CG, Form	EM, Form
1	Fokusgröße $f > 7$ $RT(2) = \dots = RT(7)$	Fokusgröße $f > 7$ $RT(2) = \dots = RT(7)$	Fokusgröße $f > 7$ $RT(2) = \dots = RT(7)$	Fokusgröße $f = 2$ $RT(2) < RT(3) = RT(4)$
2	Fokusgröße $f = 3$ $RT(2) = RT(3) < RT(4)$	Fokusgröße $f > 7$ $RT(2) = \dots = RT(7)$	Fokusgröße $f = 2$ $RT(2) < RT(3) = RT(4)$	Fokusgröße $f = 2$ $RT(2) < RT(3) = RT(4)$
3	Fokusgröße $f = 3$ $RT(2) = RT(3) < RT(4)$	Fokusgröße $f = 4$ $RT(2) = \dots = RT(4) < RT(5)$	Fokusgröße $f = 1$ $RT(2) < RT(3) < RT(4)$	Fokusgröße $f = 1$ $RT(2) < RT(3) < RT(4)$
4	Fokusgröße $f = 1$ $RT(2) < RT(3) < RT(4)$	Fokusgröße $f = 1$ $RT(2) < RT(3) < RT(4)$	Fokusgröße $f = 1$ $RT(2) < RT(3) < RT(4)$	Fokusgröße $f = 1$ $RT(2) < RT(3) < RT(4)$

Tabelle 12: Geschätzte Fokusgröße und daraus abgeleitete konkrete Hypothesen für die vier Telexperimente und die vier Schwierigkeitsstufen

Die Hypothesen wurden jeweils mit einfaktoriellen Varianzanalysen mit sechs Stufen getestet, an die sich (außer im Falle der Hypothese $RT(2) = \dots RT(7)$) die in der Hypothese spezifizierten Einzelvergleiche anschlossen. Das Niveau des α -Fehlers wurde um die jeweils erforderli-

che Zahl von Einzelvergleichen korrigiert. Abbildung 24 zeigt die der Analyse zugrunde liegenden Reaktionszeiten am Beispiel eines Telexperimentes, Tabelle 13 die Ergebnisse der statistischen Hypothesenprüfung.

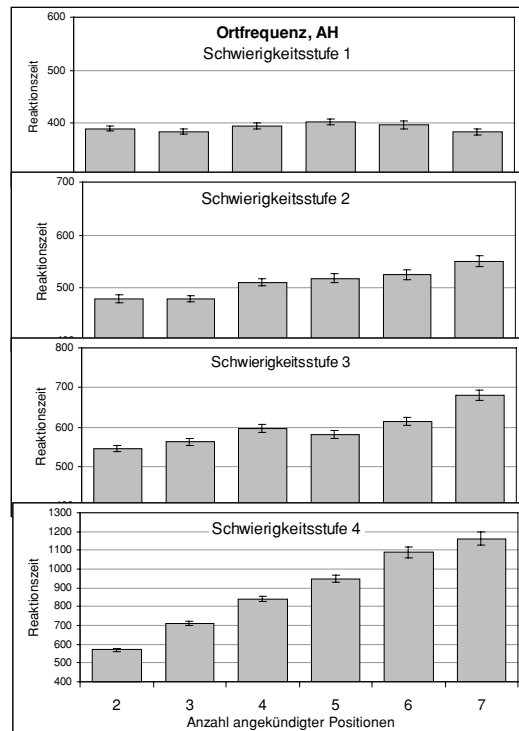


Abbildung 24: Reaktionszeiten für zwei bis sieben Hinweisreize in den vier Schwierigkeitsstufen für Versuchsperson AH im Ortsfrequenzexperiment

Experiment	AH, Ortsfrequenz		CG, Ortsfrequenz		CG, Form		EM, Form	
	Test	Ergebnis	Test	Ergebnis	Test	Ergebnis	Test	Ergebnis
1	ANOVA	0,182	ANOVA	0,473	ANOVA	0,458	ANOVA	0,000*
							EV(2,3)	0,004*
							EV(3,4)	0,550
2	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,0567	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*
	EV(2,3)	0,984			EV(2,3)	0,000*	EV(2,3)	0,000*
	EV(3,4)	0,000*			EV(3,4)	0,060	EV(3,4)	0,040
3	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*
	EV(2,3)	0,216	EV(2,3)	0,937	EV(2,3)	0,000*	EV(2,3)	0,000*
	EV(3,4)	0,013*	EV(3,4)	0,418	EV(3,4)	0,003*	EV(3,4)	0,000*
			EV(4,5)	0,001*				
4	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*	ANOVA	0,000*
	EV(2,3)	0,000*	EV(2,3)	0,001*	EV(2,3)	0,000*	EV(2,3)	0,000*
	EV(3,4)	0,000*	EV(3,4)	0,004*	EV(3,4)	0,001*	EV(3,4)	0,020*

Tabelle 13: Signifikanzniveaus (p -Werte) der Varianzanalysen und der durchgeführten Einzelvergleiche zur Überprüfung der Hypothesen aus Tabelle 12. Für jeden Einzelvergleich (EV) sind die Hinweisreizstufen angegeben, für die er durchgeführt wurde. Grau unterlegt sind die Vergleiche, bei denen ein Unterschied erwartet

wurde. (*) markiert Unterschiede, die (nach Korrektur) auf dem 5%-Niveau signifikant waren. 0,000 ist angegeben für $p < 0,0005$.

Auf einem α -Fehler-Niveau von 5% konnten ausnahmslos alle Unterschiedshypothesen bestätigt und keine der Gleichheitshypothesen widerlegt werden. Setzt man als Kriterium für eine Bestätigung der Gleichheitshypothesen $p > 0,20$, dann wurden sieben Gleichheitshypothesen bestätigt, während vier unentscheidbar bleiben. Insgesamt ist die Hypothesenbestätigung als sehr gut zu bewerten.

6.2.3 Diskussion

Die Ergebnisse von Experiment 3 sind dazu geeignet, das Modell in Bezug auf den Parameter *Reichweite der Aufmerksamkeit* (bzw. *Fokusgröße*) zu validieren. Vergleicht man die Reaktionszeiten für die verschiedenen Anzahlen angekündigter Positionen, so weisen sie tatsächlich immer genau dort einen Sprung auf, wo man ihn aufgrund der geschätzten *Fokusgrößen* erwarten würde. Ein solches Ergebnis ist nicht kompatibel mit einer Suche ohne oder mit unvollkommenem Gedächtnis. Hätten sich die gleichzeitig geprüften Gruppen von Objekten überlagert (Abbildung 21a), so hätten sich die gemessenen Reaktionszeitsprünge an anderen Übergängen als den geschätzten Fokusgrößen ergeben müssen, da dann das Modell die wahre Fokusgröße unterschätzt hätte. Ähnliches gilt für eine unsystematische Suche mit unvollkommenem Gedächtnis (Abbildung 21b), da hier das Modell die Gesamtzahl der Suchschritte und damit die Fokusgröße unterschätzt hätte. Wie ist das vorliegende Ergebnis nun vor dem Hintergrund der Literatur zu interpretieren, die Evidenz für Suchen ohne vollkommenes Gedächtnis gefunden hat? In den 60er- und 70er-Jahren wurde versucht, aus der kumulativen Verteilung der Reaktionszeiten Schlüsse auf den Suchprozess zu ziehen: Eine lineare Verteilung wurde als Indiz für eine systematische Suche ohne Mehrfachprüfung von Objekten interpretiert (ENGEL 1977), aus einer exponentiellen Verteilung wurde auf eine zufällige, d.h. gedächtnislose, Suche geschlossen (KRENDEL & WODINSKY 1960). Insgesamt ergab sich, dass die Daten meist zwischen den beiden Funktionen lagen, weshalb MORAWSKI, DRURY & KARWAN (1980) annahmen, dass das tatsächliche Suchverhalten zwischen den beiden Reinformen liegt. Es gibt jedoch ernst zu nehmende methodische Einwände, weshalb aus kumulativen Reaktionszeitverteilungen nicht ohne Weiteres auf zugrundeliegende Suchstrategien geschlossen werden könne (MACKWOTH, KAPLAN & METLAY 1964; WILLIAMS 1966), und die Kontroverse wurde zunächst nicht weitergeführt. Vor Kurzem ist sie jedoch von HOROWITZ & WOLFE (1998) wiederbelebt worden, die mit einer neuen Methode zu zeigen versucht haben, dass die visuelle Suche gedächtnislos ist. Nach einigen Einwänden und Kritikpunkten (SCHEIER u.a. 1999, BÄCKER & PERAL 1999) scheinen neuere Daten von HOROWITZ (persönliche Kommunikation 1999) nun auch eher auf ein gemischtes Modell hinzudeuten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass ein Modell, welches der Suche ein vorhandenes, aber unvollkommenes Gedächtnis unterstellt, die Suchstrategie in den meisten Fällen wohl am besten beschreibt. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass verschiedene Faktoren beeinflussen, wie nahe die Suchstrategie einer optimalen systematischen Strategie kommt. Insbesondere Augenbewegungen bei der Suche, eine geordnete geometrische Anordnung der Objekte und ein hoher Grad von Training in der Aufgabe tragen vermutlich dazu bei, dass die Suchstrategie im vorliegenden Fall optimiert werden konnte.

Nachdem der Parameterwert *Reichweite der Aufmerksamkeit* erfolgreich validiert wurde, stellt sich die Frage, welche Bedeutung dies für die Validität des gesamten Modells hat. Es kann nun wohl davon ausgegangen werden, dass die Versuchspersonen in der vorliegenden Suchaufgabe tatsächlich das Suchbild in der vom Modell angenommenen Weise, d.h. in Gruppen von Objekten, durchmustern. Experiment 3 liefert darüber hinaus weitere Evidenz für die Existenz des letzten Verlagerungsschrittes direkt auf das Zielobjekt (Schritt y in der Modellgleichung): In allen Fällen ist ein Anstieg der Reaktionszeit zwischen einer und zwei angekündigten Positionen zu erkennen. Bei Fokusgrößen über $f = 1$ ist für diese Reaktionszeitdifferenz vermutlich der zusätzliche Verlagerungsschritt verantwortlich, der bei zwei Hinweisen zum Zielobjekt hin ausgeführt wird. Nicht geeignet war das vorliegende Experiment jedoch zur Validierung der Zeitparameter für die konstante Zeit c und die Verweilzeiten p_s . Die in der Einleitung zu diesem Kapitel diskutierte Problematik besteht also weiter. Darüber hinaus ist es möglich, dass die Annahme eines konstanten Wertes für c die tatsächlichen Verhältnisse stark vereinfacht. Es ist denkbar, dass Prozesse, die in der Aufgabe nur einmal auftreten, wie initiale Wahrnehmung oder Drücken der Antworttaste, in ihrer Zeitdauer mit der Aufgabenschwierigkeit variieren. Beispielsweise haben ZINGALE & KOWLER (1987) gezeigt, dass die Zeitdauer zur Planung einer Sakkadenfolge mit der Anzahl zu planender Sakkaden zunimmt. Obwohl in der vorliegenden Aufgabe nicht unbedingt von einer Vorausplanung aller Sakkaden ausgegangen werden kann, da die Entscheidung für weitere Sakkaden wohl vom Ergebnis der einzelnen Objektprüfungen abhängig gemacht wird (JACOBS 1987), könnten doch auch hier initiale Planungs- oder Wahrnehmungsprozesse unterschiedlich lange dauern. Falls dies zutrifft, schätzt das Modell in vereinfachender Weise eine „mittlere“ Zeitdauer für solche Prozesse. Es besteht jedoch die Gefahr, wenn nicht genügend ineffiziente Suchen im Datensatz vorhanden sind, dass dann schwierigkeitsabhängige Unterschiede in der Zeitdauer solcher einmaliger Prozesse fälschlich den Aufmerksamkeitsverweilzeiten p_s zugeschlagen werden, da diese ja schwierigkeitsabhängige Unterschiede erfassen. Diese Gefahr ist um so größer, je weniger Schritte p_s in der Reaktionszeitgleichung enthalten sind, je mehr sie also der Form $RT = p_s + y + c$ (Gleichung für die Pop-Out-Suche mit nur einem Schritt p_s) nahe kommt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Modell vermutlich nur dann valide Schätzungen der Parameter liefert, wenn die Bandbreite von Sucheffizienzen im zugrunde liegenden Datensatz ausreichend groß ist.

Kapitel 7

Der Einfluss von Augenbewegungen auf die Gültigkeit des Modells

7.1 Fragestellung und Hypothesen

In den bisherigen Suchaufgaben konnten die Versuchspersonen ihre Augen frei bewegen, da natürliches Suchverhalten untersucht werden sollte. Vielfach wird in der Aufmerksamkeitsforschung jedoch das Paradigma der *verdeckten Aufmerksamkeit* angewendet, um Eigenschaften des Aufmerksamkeitssystems nicht mit denen des Augenbewegungssystems zu konfundieren. Daher soll in diesem Teil der Arbeit der Frage nachgegangen werden, inwieweit das bisher favorisierte Modell auch das Verhalten verdeckter Aufmerksamkeit beschreibt, und ob die Parameter ähnliche Werte annehmen. Die Frage des Zusammenhanges von Aufmerksamkeits- und Augenbewegungen war zu Beginn der Arbeit bereits angesprochen worden. Ein aktueller Standpunkt in dieser Frage ist, dass Aufmerksamkeits- und Augenbewegungen meist einher gehen, dass sie jedoch auch getrennt werden können, wenn es die Aufgabe erfordert (z.B. GOTTLIEB, POWELL & GOLDBERG 1999). Insbesondere sind Aufmerksamkeitsverlagerungen ohne Augenbewegungen möglich, nicht jedoch umgekehrt (DEUBEL & SCHNEIDER 1996). In der visuellen Suche ist es vermutlich dann sinnvoll, Augenbewegungen zu machen, wenn das Suchbild so groß und die Zielreiz-Ablenker-Unterschiede so gering sind, dass sie aufgrund des Sehschärfeverlustes im extrafovealen Bereich nicht mehr erkannt werden können. Hingegen sollte man Augenbewegungen, die nicht unbedingt nötig sind, unterlassen, da sie die Suchgeschwindigkeit verlangsamen. Es ist daher möglich, dass die vorliegende Suchaufgabe ohne Augenbewegungen ausgeführt wurde, so dass sich keine Unterschiede in den Ergebnissen ergeben, wenn man das Experiment 2 mit dem Paradigma der verdeckten Aufmerksamkeit wiederholt. Waren bei der bisherigen Aufgabe jedoch Augenbewegungen nötig, so kann man davon ausgehen, dass diese von Aufmerksamkeitsverlagerungen begleitet wurden. Wenn nun im Paradigma der verdeckten Aufmerksamkeit die natürlichen Augenbewegungen unterdrückt werden, verhält sich die Aufmerksamkeit möglicherweise wie vorher, d.h. sie steigert die Wahrnehmung nacheinander in den Bereichen des visuellen Feldes, zu denen normalerweise die Augenbewegungen erfolgen würden. Das Modell müsste dann die Suchstrategien ohne Augenbewegungen ebenso gut beschreiben wie die mit Augenbewegungen, die Abfolge von Suchschritten müsste dieselbe sein, nur der Zeitparameter für Aufmerksamkeitsverlagerungen würde vermutlich kürzere Werte ergeben. Eine andere Möglichkeit ist die, dass das Aufmerksamkeitssystem im verdeckten Paradigma seine

Strategie ändert, da die reine Aufmerksamkeitszuwendung (ohne Fixationsverlagerung) die visuelle Verarbeitung in „abgelegeneren“ Bereichen des visuellen Feldes nicht mehr so weit verbessert, dass die gleiche Anzahl von Verlagerungen noch effektiv wäre. In diesem Fall wäre entweder die Strategie noch „prinzipiell“ dieselbe, d.h. das bisherige Modell würde auch die Suchstrategien bei verdeckter Aufmerksamkeit beschreiben, nur dass in diesem Fall nicht nur die Zeitparameter, sondern auch der Parameter *Reichweite der Aufmerksamkeit* andere Werte erhielten (z.B. würden größere Suchschritte gemacht). Es könnte aber auch die Strategie vollkommen verändert werden, d.h. die Modellannahmen würden nicht mehr zutreffen (z.B. würde jetzt unsystematisch gesucht). Die Literatur liefert keine eindeutig interpretierbaren Hinweise auf eine der insgesamt vier Möglichkeiten. Vermutlich hängt es auch von den jeweiligen Charakteristika der Suchaufgabe ab, inwieweit sich die Strategien bei freien Augenbewegungen und ohne Augenbewegungen unterscheiden: KLEIN & FARRELL (1989) fanden beispielsweise überhaupt keine Unterschiede in den Steigungen von Reaktionszeitkurven zwischen visueller Suche mit freien und ohne Augenbewegungen und schlossen daraus, dass die Wahl des Paradigmas wenig Auswirkung auf die Strategie hat. Der Radius ihres Suchbildes betrug jedoch nur 2° visueller Winkel, so dass die Versuchspersonen möglicherweise in keiner der beiden Bedingungen Augenbewegungen gemacht haben und die Generalisierung der Ergebnisse auf größere Suchbilder fraglich ist. ZELINSKY & SHEINBERG (1997) verglichen visuelle Suchleistungen mit und ohne Augenbewegungen in einem Suchbild mit $4,5^\circ$ Radius und stellten eine effizientere Suche in der Bedingung ohne Augenbewegungen fest. Ob die Abfolge der Suchschritte jedoch verändert war oder nur ihr Zeitbedarf, lässt sich hieraus nicht schließen. Mit dem folgenden Experiment 4 soll versucht werden, für die vorliegende Suchaufgabe zwischen den vier Möglichkeiten zu entscheiden. In diesem Experiment führten zwei Gruppen von Versuchspersonen in der Schwierigkeit abgestufte Suchaufgaben wie in Experiment 2 durch. Eine Gruppe durfte ihre Augen dabei frei bewegen, während die andere während der gesamten Suche den Mittelpunkt des Suchbildes fixierte. Das beste Modell aus Kapitel 5 (gruppenweise Suche, konstante Verlagerungsdauer) wurde an die individuellen Reaktionszeiten angepasst. Die Güte der Modellanpassung sowie die Werte der Modellparameter wurden zwischen den beiden Gruppen verglichen. Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die Hypothesen in den drei oben diskutierten Fällen.

Hypothetische Änderung der Suchstrategien	Hypothesen für Experiment 4		
	Güte der Modellanpassung	Werte der Zeitparameter	Übrige Parameterwerte
Keine	Gleich gut mit und ohne Augenbewegungen	Keine Unterschiede mit und ohne Augenbewegungen	
Gleiche Anzahl und Abfolge von Suchschritten, aber kürzerer Zeitbedarf für Verlagerungen	Gleich gut mit und ohne Augenbewegungen	Kürzere Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer ohne Augenbewegungen, die anderen Zeitparameter unterscheiden sich nicht	Gleiche Größe des Aufmerksamkeitsfokus mit und ohne Augenbewegungen
Qualitativ gleiche Abfolge von Suchschritten, aber veränderte Anzahl und veränderter Zeitbedarf	Gleich gut mit und ohne Augenbewegungen	Kürzere Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer ohne Augenbewegungen, auch andere Zeitparameter evtl. unterschiedlich	Unterschiedliche Größe des Aufmerksamkeitsfokus mit und ohne Augenbewegungen
Qualitativ veränderte Abfolge der Suchschritte	Ohne Augenbewegungen schlechter als mit Augenbewegungen	Nicht näher spezifizierte Unterschiede	

Tabelle 14: Übersicht über die möglichen Strategieänderungen bei Suchen ohne Augenbewegungen gegenüber der freien Suche und die entsprechenden Hypothesen für Experiment 4.

7.2 Experiment 4

Das experimentelle Design war dasselbe wie in den Experimenten 2 und 3. Zur Hypothesenprüfung wurde allerdings ein Gruppenvergleich an Stelle einer Einzelauswertung durchgeführt. Da hierbei weniger hohe Anforderungen an die Reliabilität der Einzeldaten bestehen, wurde die Anzahl von Durchgängen pro Versuchsperson reduziert.

7.2.1 Methode

Versuchspersonen

16 Versuchspersonen (sechs Männer und zehn Frauen im Alter zwischen 20 und 29 Jahren) nahmen gegen Bezahlung am Experiment teil. Alle waren vertraut mit Reaktionszeitexperimenten, und keiner von ihnen hatte an einem der ersten drei Experimente teilgenommen. Alle waren Rechtshänder und normalsichtig bzw. mit Sehhilfe normalsichtig. Sie wurden zufällig in zwei Gruppen zu je acht Personen eingeteilt.

Apparatur, Reize und Versuchsablauf

Computer, Monitor und Antworttasten entsprachen denen aus Experiment 2. Die Augenbewegungen wurden zur Kontrolle mit einer Videokamera aufgezeichnet. Aus diesem Grund konnte der Restriktionstunnel aus Experiment 2 nicht verwendet werden, und der Raum wurde schwach beleuchtet. Kopfposition und Sehabstand (160 cm) wurden durch eine Kinnstütze kontrolliert.

Die Reize entsprachen denen in Experiment 2. Um den Zeitaufwand pro Versuchsperson zu reduzieren, wurden jedoch nicht alle Faktorstufen verwendet: Wie in Experiment 3 wurden die perzeptuellen Dimensionen *Ortsfrequenz* und *Form*, die Schwierigkeitsstufen 1, 3, 4 und 5 und die Objektanzahlen 4, 6 und 8 dargeboten. Die Aufgabenbedingung *Vergleich* wurde immer mit der Objektanzahl 6 durchgeführt.

Der Versuch lief wie in Experiment 2 ab, mit dem einzigen Unterschied, dass während jedes Suchdurchgangs das Fixationskreuz in der Bildschirmmitte stehen blieb. Versuchspersonen in der Gruppe ohne Augenbewegungen erhielten die zusätzliche Instruktion, das Kreuz während der gesamten Suche zu fixieren, und wurden informiert, dass dies über Video kontrolliert würde und dass ihre Daten nicht verwendbar wären, wenn sie die Fixation nicht beibehielten. Die Anzahl der Durchgänge und ihre Zusammenfassung zu Blöcken war wie folgt: Ein Block konstanter *Aufgabe* (*Vergleich/Suche*), *Schwierigkeit* und *Objektanzahl* bestand jeweils aus 26 Durchgängen. In der ersten Hälfte des Experimentes wurden die Blöcke in ansteigender Schwierigkeit und innerhalb jeder Schwierigkeitsstufe erst die Vergleichsaufgabe und dann die Suchaufgabe mit ansteigender Objektanzahl dargeboten. In der zweiten Hälfte wurden die gleichen Blöcke noch einmal in umgekehrter Reihenfolge präsentiert. Zu Beginn jeder Sitzung fand außerdem ein Übungsblock statt, der zehn Durchgänge jeder experimentellen Bedingung enthielt. Zusätzlich waren die ersten beiden Durchgänge jedes Blocks Übungsdurchgänge, die nicht aufgezeichnet wurden. Insgesamt führte jede Versuchsperson zwei Sitzungen von je 1,5 Stunden Dauer durch, eine für jede perzeptuelle Dimension.

Datenanalyse

Die individuelle Datenauswertung erfolgte wie in Experiment 2. Daran schloss sich der Gruppenvergleich an. Hierzu wurden die Gruppenmittelwerte der Fehlerraten, der mittleren Reaktionszeiten insgesamt und pro experimenteller Bedingung, der Modellanpassungsfehler $\sqrt{\epsilon}$ sowie der Modellparameter gebildet und zwischen den beiden Gruppen verglichen.

7.2.2 Ergebnisse

Fehlerraten. Abbildung 25 (oben) zeigt die Fehlerraten der beiden Gruppen in den beiden Telexperimenten. Sie lagen in der Gruppe ohne Augenbewegungen höher, und zwar sowohl im *Ortsfrequenz-Experiment* ($t(14) = 4,11$, $p < 0,001$) als auch im *Formexperiment* ($t(14) = 3,71$, $p < 0,002$).

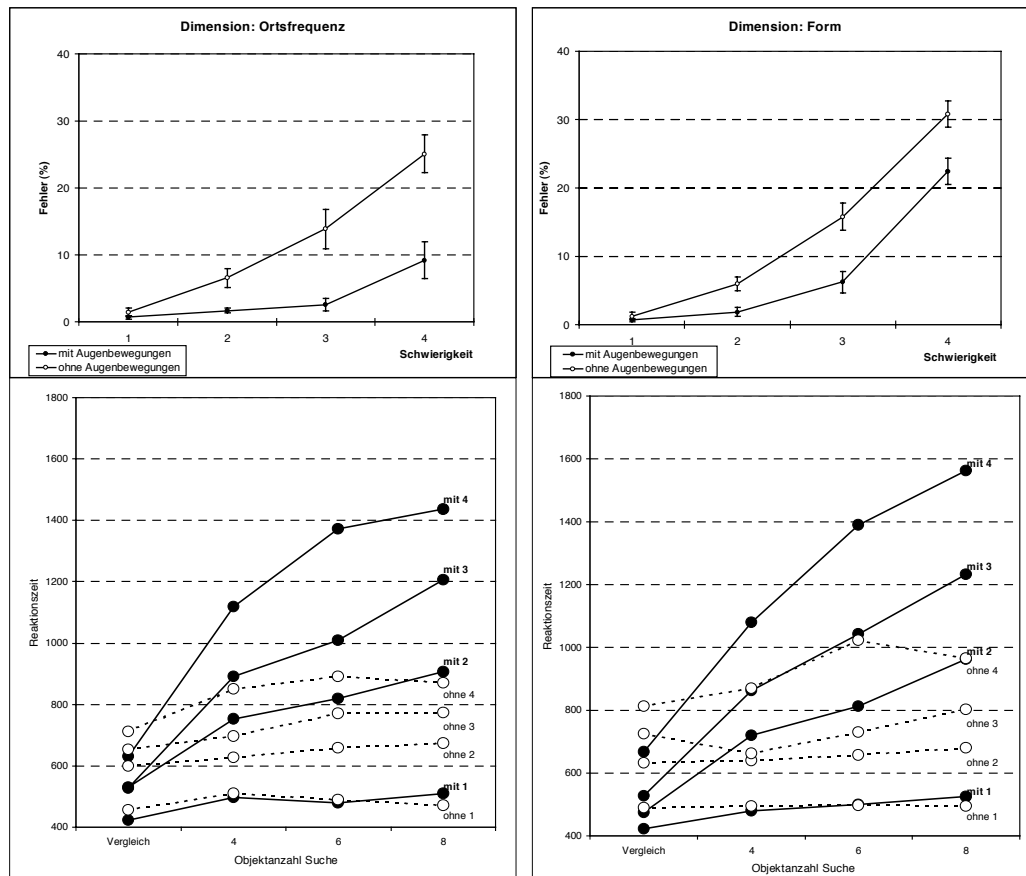


Abbildung 25. Mittlere Fehlerraten (oben) und Reaktionszeiten (unten) der beiden Gruppen in den beiden Telexperimenten. „Mit“ bzw. „Ohne“ bezeichnet die beiden Gruppen mit und ohne Augenbewegungen, die Ziffer gibt die Schwierigkeitsstufe an.

Reaktionszeiten. Abbildung 25 (unten) zeigt die mittleren Reaktionszeiten der beiden Gruppen in den beiden Telexperimenten. Hierfür wurden nur die positiven Durchgänge (d.h. Zielobjekt vorhanden und erkannt) ausgewertet. In beiden Dimensionen waren die Reaktionszeiten der Gruppe ohne Augenbewegungen kürzer als mit Augenbewegungen (Ortsfrequenz: $t(14) = 2,15$, $p < 0,05$; Form: $t(14) = 6,14$, $p < 0,001$). In beiden Gruppen nahm wie in den vorangegangenen Experimenten die Effizienz der Suche mit zunehmender Schwierigkeit ab. Diese Abnahme fiel jedoch in der Gruppe mit Augenbewegungen deutlicher aus als in der ohne Augenbewegungen: Dreifach-Varianzanalysen für die Reaktionszeiten der Aufgabe *Suche* mit den Faktoren *Gruppe*, „Schwierigkeit“ und „Objektanzahl“ (die letzteren beiden waren Messwiederholungsfaktoren) fanden eine signifikante Interaktion der drei Faktoren sowohl in der Ortsfrequenzdimension ($p = 0,043$) als auch in der Formdimension ($p = 0,023$).

Ergebnisse der Modellrechnung

Güte der Modellanpassung. Das beste Modell aus Experiment 2 (Gruppenweise Suche mit konstanter Verlagerungsdauer) wurde an die mittleren Reaktionszeiten der einzelnen Versuchspersonen angepasst und der mittlere Anpassungsfehler $\sqrt{\epsilon}$ zwischen den beiden Gruppen verglichen (vgl. Abbildung 26). T-Tests zeigten, dass die Modellanpassung für beide Gruppen gleich gut war (Form: $t(14) = 0,02$, $p = 0,987$; Ortsfrequenz: $t(14) = 0,66$, $p = 0,52$).

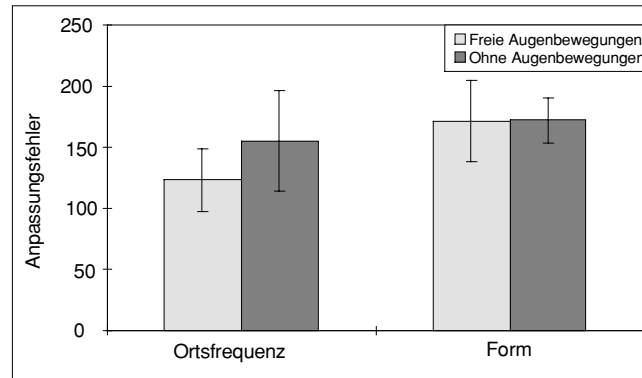


Abbildung 26: Mittlere Anpassungsfehler des Modells an die Daten der beiden Gruppen in den beiden Telexperimenten.

Parameterwerte. Die Gruppenmittelwerte der individuellen Modellparameter sind Tabelle 15 zu entnehmen.

		Ortsfrequenz-Aufgabe				Form-Aufgabe			
Augenbewegungen		frei	ohne	Vergleich		frei	ohne	Vergleich	
Parameter		M_{frei}	M_{ohne}	t(14)	p	M_{frei}	M_{ohne}	t(14)	p
Konstante Zeit	c [ms]	308	396	1,90	0,078	237	372	3,94	0,001*
Verlagerungsdauer	x [ms]	68	26	4,25	0,001*	44	23	2,54	0,024
... im letzten Schritt	y [ms]	57	7			39	7		
Verweildauer Stufe 1	p_1 [ms]	118	72			302	110		
Verweildauer Stufe 2	p_2 [ms]	214	196			235	110		
Verweildauer Stufe 3	p_3 [ms]	216	232			296	287		
Verweildauer Stufe 4	p_4 [ms]	332	291			419	407		
Mittlere Verweildauer	p [ms]	220	198	0,51	0,617	288	260	0,96	0,355
Reichweite Stufe 1	r_1 [°]	4,6	4,4			4,6	4,7		
Reichweite Stufe 2	r_2 [°]	2,4	3,3			1,5	3,7		
Reichweite Stufe 3	r_3 [°]	1,3	3,0			1,5	3,5		
Reichweite Stufe 4	r_4 [°]	1,3	2,5			1,3	2,8		
Mittlere Reichweite	r [°]	2,4	3,3	3,33	0,005*	2,3	3,7	6,32	0,000*

Tabelle 15: Gruppenmittelwerte der Modellparameter der Gruppe mit freien Augenbewegungen (M_{frei}) und ohne Augenbewegungen (M_{ohne}). Angegeben ist weiterhin der t-Wert und das Signifikanzniveau der t-Tests für einen Gruppenvergleich von vier ausgewählten Parametern (siehe Text).

*) Auf dem 5%-Niveau signifikanter Unterschied (nach Bonferroni-Korrektur für 4 Tests).

Um zu viele statistische Tests zu vermeiden, wurde die Anzahl zu vergleichender Parameter auf vier reduziert: Die konstante Zeit c , die Verlagerungsdauer x , die mittlere Verweildauer p und die mittlere Reichweite der Aufmerksamkeit r . p wurde für jede Versuchsperson als Mittelwert der Verweildauern p_s in den vier Schwierigkeitsstufen $s = 1, \dots, 4$ gebildet und r als

Mittelwert der Reichweiten¹⁷ $r_{s,n}$ über die Schwierigkeitsstufen $s = 1, \dots, 4$ und die Objektanzahlen $n = 4, 6, 8$. Die Parametermittelwerte der beiden Gruppen wurden mit t-Tests verglichen, wobei das α -Fehler-Niveau Bonferroni-korrigiert wurde um den Faktor vier, die Anzahl simultan verglichener Parameter. Die Ergebnisse sind Tabelle 15 zu entnehmen. In beiden Suchaufgaben (Ortsfrequenz- und Form-Zielreiz) zeigen die Parameter der beiden Gruppen ähnliche Muster: In der Gruppe mit Augenbewegungen war die konstante Zeit c länger, die Verlagerungsdauer x kürzer und die Reichweite der Aufmerksamkeit r größer als in der Gruppe ohne Augenbewegungen. Die Verweildauer p wies keine Gruppenunterschiede auf.

7.2.3 Diskussion

Der Vergleich der Fehlerraten zeigt, dass die vorliegenden Suchaufgaben ohne Augenbewegungen nicht so gut ausgeführt werden konnten. Das lässt darauf schließen, dass in der freien Bedingung Augenbewegungen gemacht wurden. Weiterhin zeigen Unterschiede sowohl in den Reaktionszeiten als auch in den Modellparametern, dass die Suchstrategien ohne Augenbewegungen anders sind als mit Augenbewegungen. Die Modellanpassung war in beiden Bedingungen zwar gleich gut, die Parameter unterschieden sich jedoch insoweit, dass ohne Augenbewegungen die konstante Zeit länger, die Verlagerungsdauer kürzer und der Fokus, mit dem gesucht wurde, größer war. Vergleicht man diese mit den in Tabelle 14 formulierten Hypothesen, so spricht Alles für die dritte der dort genannten Hypothesen: Die Versuchspersonen im Paradigma ohne Augenbewegungen scheinen prinzipiell die gleiche Abfolge von Suchschritten ausgeführt zu haben, jedoch in veränderter Anzahl und veränderter Zeitdauer. Bei den Parametern ist die kürzere Verlagerungsdauer hypothesenkonform. Da Augenbewegungen recht langsam sind, ist die Verlagerungsdauer hier länger. Vergleicht man jedoch die Verlagerungszeiten im vorliegenden Experiment 4 (im Mittel 44 bzw. 68 ms) mit Sakkadenlatenzen, wie sie üblicherweise in der Literatur berichtet werden, dann muss man annehmen, dass im vorliegenden Experiment nicht jeder Verlagerungsschritt von einer Blickbewegung begleitet wurde: Übliche Sakkadenlatenzen liegen bei ca. 200 ms. THEEUWES, KRAMER & ATCHLEY (199) fanden bei zwei parallel programmierten Sakkaden für die zweite Sakkade zwar Latenzen von ca. 70 ms, jedoch wird dieses Phänomen auf die simultane Verwendung zweier unterschiedlicher Sakkadensysteme zurückgeführt, so dass nach dieser Erklärung nicht mehr als zwei Sakkaden in dieser Weise parallel programmiert werden könnten. Die in diesem Experiment (und den Experimenten 1-3) berechneten Verlagerungszeiten stellen vermutlich Mittelwerte dar zwischen Verlagerungszeiten mit und ohne Augenbewegungen. Dass die durchschnittliche Verlagerungszeit in Experiment 2 mit 40 ms etwas kürzer war als im vorliegenden Experiment, könnte auf den Übungseffekt bei der wesentlich größeren Anzahl von Suchdurchgängen in Experiment 2 zurückzuführen sein: Es gelang den Versuchspersonen dort, mit weniger Augenbewegungen eine ebenso große Genauigkeit zu erzielen und dadurch Zeit einzusparen.

Weiterhin ergab sich in der Gruppe ohne Augenbewegungen eine verlängerte konstante Zeit gegenüber der frei suchenden Gruppe. Dass dies kein Modellartefakt darstellt, erkennt man an den Reaktionszeiten: In den einfachen Vergleichsaufgaben (bekannte Zielreizposition) waren

¹⁷ Es wurde die Reichweite $r_{s,n}$ gemittelt und verglichen und nicht die (anschaulichere) Fokusgröße $f_{s,n}$, da letztere nicht intervallskaliert ist.

die Reaktionszeiten ohne Augenbewegungen tendenziell länger als mit. Über die Ursache kann nur spekuliert werden. Eine Idee ist, dass das Aufrechterhalten der Fixation kognitive Ressourcen bindet (die Versuchspersonen müssen entgegen ihrer natürlichen Verhaltenstendenz daran denken, immer auf das Kreuz zu blicken) und damit andere Prozesse verlangsamt. Da das Aufrechterhalten der Fixation in allen Aufgabenbedingungen vorkommt, wird der Zeitverlust in der Modellrechnung der konstanten Zeit „zugeschlagen“.

Der dritte wesentliche Unterschied in den Modellparametern der beiden Gruppen war die Fokusgröße: In der Gruppe ohne Augenbewegungen war der Fokus größer und damit die Anzahl der Schritte geringer, die Suche also effizienter. Dies ist auch in den Reaktionszeiten zu erkennen. Bei der Interpretation muss man jedoch die erhöhte Fehlerrate in dieser Bedingung im Auge behalten. Möglicherweise haben die Versuchspersonen im Paradigma der verdeckten Aufmerksamkeit ihre Suchstrategien nicht optimiert und hätten bei einer Suche mit kleinerem Fokus ihre Fehlerrate verringern können, d.h. sie haben mit einem größeren Fokus gesucht, als er der tatsächlichen Reichweite ihrer Aufmerksamkeit entsprochen hätte. Das Training zu Beginn des Experimentes war möglicherweise ausreichend für die einfachere Aufgabe, die Suche mit Augenbewegungen, nicht jedoch für die schwierigere Aufgabe, der Suche mit Beibehaltung der Fixation. Es wäre zu prüfen, ob mehr Training zu einer Verbesserung der Trefferquote und zu einer Angleichung der Reaktionszeiten führt. Es könnte jedoch auch sein, dass Ziel- und Ablenkerobjekte in den schwierigeren Stufen tatsächlich nur im fovealen Bereich oder dessen unmittelbarer Nähe reliabel diskriminiert werden können. Dann wären die unterschiedlichen Fokusgrößen im Rahmen der Entscheidungstheorie zu erklären: Sind Augenbewegungen erlaubt, dann „lohnt es sich“, mehr Zeit für mehr Fixationen aufzuwenden, um die Fehlerrate zu minimieren. Ohne Augenbewegungen bringt eine Verkleinerung des Fokus keine zusätzliche Verbesserung der Genauigkeit, so dass mit größerem Fokus gesucht und eine geringere Trefferquote in Kauf genommen wird. Bezogen auf das in dieser Arbeit aufgestellte Konzept der *Reichweite der Aufmerksamkeit* ergibt sich aus einer solchen Interpretation folgendes: Die Modellrechnung unterscheidet nicht zwischen Fokusgröße und *Reichweite der Aufmerksamkeit*. In den theoretischen Konzepten besteht jedoch insoweit ein Unterschied, dass die Reichweite der Aufmerksamkeit sich automatisch aus der *Aktivierungskarte* ergibt, nach deren Berechnung also keiner weiteren intentionalen Kontrolle mehr zugänglich ist. Die Fokusgröße stellt jedoch ein Handlungskonstrukt dar, d.h. die Versuchsperson stellt sie mehr oder weniger optimal auf die jeweilige Reichweite der Aufmerksamkeit ein. Bei der Modellformulierung wurde eine solche optimale Abstimmung angenommen. Von der berechneten Fokusgröße kann also nur dann auf die tatsächliche Reichweite der Aufmerksamkeit zurückgeschlossen werden, wenn diese Annahme zutrifft. Das Experiment war zunächst so geplant worden (Experimente 1 – 3), dass es der Versuchsperson eine solche optimale Abstimmung ermöglichte (z.B. durch bekannte Suchanordnungen und vorhersehbare Zielreiz-Ablenker-Unterschiede). Das Unterbinden von Augenbewegungen verhindert jedoch möglicherweise eine solche Optimierung: Die erhöhten Fehlerraten lassen darauf schließen, dass in den schwierigeren Stufen die Objekte außerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit lagen und auch durch Verlagerungen des Zentrums der Aufmerksamkeit nicht vollständig in die Reichweite hinein gebracht werden konnten. Die Versuchsperson hatte dann keine andere Wahl, als mit einem „zu großen“ Fokus zu suchen, um die Objekte überhaupt prüfen zu können. Aus einer solchen Betrachtungsweise folgt der Schluss, dass die Reichweite der Aufmerksamkeit mit zunehmender Entfernung von der Fixation abnimmt. Die Reichweite ist damit sowohl eine Funktion der Sehschärfe als auch der Aufmerksamkeitszuwendung (wobei

mit Letzterem der Merkmalsaspekt der Aufmerksamkeit gemeint ist, der als intentionale Setzung von Gewichten in die Berechnung der *Aktivierungskarte* eingeht). Um das Konzept als reine Funktion des Aufmerksamkeitssystems zu untersuchen, müsste die Aufgabe entweder eine gleichbleibende Sehschärfe über das gesamte Suchbild ermöglichen, oder die Metrik der Aktivierungskarte müsste an die Eigenschaften des Sehsystems angepasst werden. Daher stellt sich die Frage, ob das übliche experimentelle Paradigma der verdeckten Aufmerksamkeit nicht doch zu Artefakten in den Suchstrategien führt, die dann als natürliche Funktionen des Aufmerksamkeitssystems fehlinterpretiert werden.

Kapitel 8

Zur Lokalisation von Hirnfunktionen bei visuellen Suchstrategien: Ein Experiment mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT)

In den bisherigen Kapiteln sind computationale Modelle der visuellen Suche formuliert und an Verhaltensexperimenten überprüft worden. Es hatte sich gezeigt, dass besonders ein Modell gut mit den gemessenen Verhaltensergebnissen in Einklang steht: Es beschreibt den Suchvorgang als gruppenweises Prüfen der Objekte, wobei die Gruppengröße (Fokusgröße) und auch die Prüfzeit vom physikalischen Kontrast zwischen Ziel- und Ablenkerobjekten sowie der Anzahl und Anordnung der Objekte im Suchbild abhängt. Die Verlagerungsdauer der Aufmerksamkeit ist konstant, unabhängig von der Entfernung. Zudem wird meist in einem letzten Suchschritt, wenn sich das Zielobjekt in der gerade überprüften Objektgruppe befindet, die Aufmerksamkeit explizit auf das Zielobjekt zentriert.

Ein solches Modell kann nur dann als ernst zu nehmender Kandidat für die tatsächlichen Abläufe im menschlichen Informationsverarbeitungssystem, dem Gehirn, angesehen werden, wenn es mit den neuroanatomischen und neurophysiologischen Gegebenheiten vereinbar ist. Daher soll in diesem Teil der Arbeit das Reaktionszeitmodell¹⁸ in einem Bildgebungsexperiment Anwendung finden. Ziel ist es, Hirnareale zu spezifizieren, die an einzelnen Teilprozessen der visuellen Suche beteiligt sind. Dazu sollen mit Hilfe des Reaktionszeitmodells Teilprozesse der visuellen Suche (Größe des Aufmerksamkeitsfokus, Verlagerungen des Fokus, Prüfen der Objekte, übrige Prozesse wie Reaktionsauswahl und motorische Antwort) parametrisch beschrieben werden. In einem Experiment mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) soll dann versucht werden, Hirngebiete zu finden, deren neuronale Aktivität – vermittelt über die vaskuläre Reaktion - während der Suchaufgabe mit den Werten einzelner Modellparameter kovariiert. Von solchen Zusammenhängen soll auf die Beteiligung dieser Hirngebiete an den jeweiligen Teilprozessen der Suche geschlossen werden.

¹⁸ Mit „das Reaktionszeitmodell“ ist hier und im Folgenden immer das Beste der vier getesteten Modelle gemeint, nämlich das, welches die Suche in Gruppen von Objekten mit konstanter Verlagerungsdauer beschreibt.

8.1 Grundlagen der funktionellen Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRT) wird bereits seit längerer Zeit angewendet, um anatomische Strukturen abzubilden. Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) stellt hingegen ein relativ neues Verfahren zur Lokalisation stimulusbedingter regionaler Blutflusänderungen dar. Die hier verwendete fMRT produziert Bilder von aktivierten Hirnarealen, indem sie Änderungen der regionalen Sauerstoffsättigung (Oxygenierung) des Blutes abbildet.

8.1.1 Physikalische Grundlagen

Alle Atome im menschlichen Körper, die eine ungerade Anzahl von Protonen und Neutronen enthalten, sind durch einen Kernspin und einen Drehimpuls charakterisiert. Jedes dieser Teilchen erzeugt selbst ein kleines Magnetfeld, welches sich normalerweise aber durch die unterschiedlichen Ausrichtungen der einzelnen Dipole nicht bemerkbar macht. Bei der fMRT wirkt ein starkes Referenzmagnetfeld auf den Körper ein, welches die Spins der Atome parallel zum Magnetfeld ausrichtet. Dabei rotieren sie mit einer bestimmten Frequenz, der Larmor-Frequenz¹⁹, um ihre eigene Achse. Entlang einer anderen Achse wird dann ein Hochfrequenzpuls aufgeschaltet. Er pulsiert mit einer Frequenz, welche diejenigen Atome mit Energie auflädt, die in der gleichen Frequenz schwingen. Wenn der Puls wieder abgeschaltet wird, geben diese Atome die Energie, mit denen sie aufgeladen wurden, wieder ab (Relaxation). Diese elektromagnetische Welle wird von einer Spule aufgenommen und in elektrischen Strom umgewandelt. Die Ströme werden verstärkt und dann verwendet, um das Bild zu konstruieren. Die Relaxation kann durch zwei Zeitkonstanten beschrieben werden: die longitudinale (T1) und die transversale (T2) Relaxationszeit. Die transversale Magnetisierung zerfällt dabei exponentiell mit einer als T2* bezeichneten Zeitkonstante. Das Ausmaß, in dem die Atome eines Moleküls mit einer gegebenen Frequenz mitschwingen, und damit die Relaxationseigenschaften (T1 und T2), hängt davon ab, welche anderen Atome im Molekül vorhanden sind, so dass durch die Messung von T1 und T2 das Vorhandensein bestimmter Moleküle an bestimmten Orten festgestellt werden kann. In der fMRT wird auf diese Weise bestimmt, wohin im Gehirn zusätzlicher Sauerstoff transportiert worden ist, indem die Effekte des Eisens im oxygenierten und deoxygenierten Hämoglobin auf die Schwingung der Wasserstoffprotonen gemessen wird. Damit kann der Blutfluss verfolgt werden. Zusätzlich werden anatomische Bilder aufgenommen, in denen sich die weiße und die graue Substanz aufgrund ihrer unterschiedlichen Gewebszusammensetzung voneinander abheben.

Die Vorteile der fMRT gegenüber anderen bildgebenden Verfahren liegt zum einen in seiner ausgezeichneten räumlichen Auflösung (bis zu 1 mm), zum anderen ist es nicht invasiv und belastet den Körper nicht mit radioaktiven Substanzen.

¹⁹ Die Larmor-Kreisfrequenz berechnet sich als $\omega_L = eB/2m$, mit e = Elementarladung, B = magnetische Flussdichte, m = Masse des Teilchens.

8.1.2 Physiologische Grundlagen

Wenn im Gehirn Nervenzellen aktiv werden, entstehen messbare elektrische und magnetische Veränderungen. Diese können mit der fMRT jedoch nicht direkt erfasst werden. Statt dessen werden Änderungen im Blutfluss gemessen und von ihnen auf neuronale Aktivität zurückgeschlossen. Es wird angenommen, dass Blutflussänderungen eng mit neuronalen Aktivitätsänderungen zusammenhängen („neurovaskuläre Kopplung“; ROLAND 1993): Ein aktives Neuron hat einen erhöhten Sauerstoffverbrauch. Zur Energieversorgung einer aktivierten Neuronenpopulation wird das kapilläre Blutgefäß erweitert, und es kommt zu einer Erhöhung des regionalen zerebralen Blutvolumens (CBV), des regionalen zerebralen Blutflusses (CBF) und der Zufuhr an sauerstoffreichem (oxygeniertem) Blut (CBO). Gleichzeitig wird im aktivierten Areal Hämoglobin zu Desoxyhämoglobin reduziert. Da der Sauerstoffverbrauch jedoch geringer ist als die Sauerstoffzufuhr, steigt im aktivierten Gebiet die Konzentration an oxygeniertem Blut an und die Konzentration an deoxygeniertem Blut sinkt. Desoxyhämoglobin verhält sich im Gegensatz zu Hämoglobin paramagnetisch und erzeugt somit eine magnetisch inhomogene Umgebung, deren Signal abgeschwächt ist. Dieser Effekt wird BOLD (Blood Oxygen Level Dependent) - Kontrast genannt (OGAWA & LEE 1990) und zur Messung regionaler Blutoxydationsänderungen herangezogen. Die mit der BOLD-Technik gemessenen Signaländerungen sind klein, nehmen aber bei höheren magnetischen Feldstärken stark zu. Signalintensitätsänderungen sind bereits kurz nach Beginn der Stimulation messbar. Die BOLD-Signaländerung beginnt beispielsweise im primären visuellen Kortex innerhalb von zwei bis drei Sekunden nach Beginn der Stimulation und erreicht nach vier bis sechs Sekunden die maximale Signalstärke. Ca. neun Sekunden nach Beendigung der Stimulation ist das Signal wieder bis auf 10% über der Ausgangsstärke abgesunken (KWONG u.a. 1992, DEYOE u.a. 1994). Da in dieser Arbeit ausschließlich die BOLD-Kontrast-Technik verwendet wurde, soll hier auf andere Techniken der MRT, die beispielsweise Blutfluss- oder Blutvolumenänderungen registrieren, nicht eingegangen werden.

8.1.3 Zur Frage des Zusammenhanges von neuronaler Aktivität und BOLD-Signal

Da mit der fMRT nur Änderungen im Blutfluss, -volumen und der regionalen Sauerstoffsättigung (BOLD), nicht jedoch die Aktivität der Neuronen direkt gemessen werden kann, stellt sich die Frage, inwieweit tatsächlich Rückschlüsse vom BOLD-Signal auf die Aktivität einzelner Neuronenpopulationen möglich sind. Folgende Probleme sind dabei zu berücksichtigen:

- Neurovaskuläre Kopplung: Sensitivität und Spezifität des BOLD-Signals

Mit dem Prinzip der neurovaskulären Kopplung wurde oben erklärt, wie neuronale Aktivität zu Änderungen im BOLD-Signal führt. Das Prinzip ist jedoch bisher nicht in allen Schritten verstanden. Bei der Frage der *Sensitivität* ist vor Allem der Zusammenhang zwischen neuronaler Aktivität und Blutoxygenierung (CBO) zu hinterfragen. Das wesentliche Problem liegt hier im unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Verlauf (KLEINSCHMIDT & FRAHM 1997): Funktionseinheiten von Neuronen sind vermutlich wesentlich kleiner als die Gebiete, in denen die CBO-Änderung stattfindet. Sie können mit

der fMRT nicht differenziert werden. Außerdem vollziehen sich neuronale Aktivitäten im Millisekundenbereich, während die assoziierte hämodynamische Modulation über Sekunden anhält. Daher integriert ein BOLD-Signal notwendigerweise sowohl räumlich als auch zeitlich eine große Anzahl neuronaler Aktivitäten. Bei der Interpretation von fMRT-Bildern ist also zu berücksichtigen, dass funktionelle Spezialisierungen einzelner Hirngebiete nur auf makroskopischer Ebene lokalisiert werden können, und dass Aktivierungszustände nur erkannt werden, wenn sie über eine gewisse Zeit aufrechterhalten werden. Bei der Frage nach der *Spezifität* des BOLD-Signals muss gefragt werden, ob ein BOLD-Signal auch durch andere Einflussfaktoren als durch Neuronenaktivität zustande kommen kann. Auch diese Frage ist bisher nicht abschließend geklärt (VILLRINGER & DIRNAGEL 1997). Allgemein beeinträchtigen andere Einflüsse nur dann den Wert eines Experiments entscheidend, wenn sie systematisch auftreten, d.h. beispielsweise immer gekoppelt mit bestimmten Aufgaben. Solche systematischen Einflüsse können vor Allem von den großen Blutgefäßen im Hirn ausgehen, in denen ebenfalls Blutfluss- und Oxygenierungsänderungen stattfinden. Es werden zur Zeit verschiedene Mess- und/oder Auswertungstechniken entwickelt, um den Einfluss der großen Blutgefäße auszuschalten.

- Zusammenhangsmodell

In den meisten Arbeiten zur fMRT wird (explizit oder implizit) davon ausgegangen, dass ein einfacher und direkter Zusammenhang zwischen neuronaler Aktivität und BOLD-Signal besteht, obwohl die Art des Zusammenhanges bisher nicht geklärt ist (s.o.). Um Berechnungen auf der Grundlage des BOLD-Signals (z.B. Subtraktionen oder statistische Tests) sinnvoll interpretieren zu können, wäre es besonders günstig, wenn der Zusammenhang zwischen der Stärke der neuronalen Aktivität und der Höhe des BOLD-Signals linear wäre. Nach KOSSLYN (1994) kann dies nicht der Fall sein, da die Blutzufuhr durch die Dehnfähigkeit (Dilatierbarkeit) der Blutgefäße begrenzt ist. BOYNTON u.a. (1996) argumentieren jedoch für ein lineares Transformationsmodell. Sie nehmen an, dass der Zusammenhang dann linear ist, wenn man die neuronale Aktivität über eine gewisse Hirnregion und über eine gewisse Zeitperiode mittelt. Obwohl sie einräumen, dass die Entstehung des BOLD-Signals aus der neuronalen Aktivität komplex und somit ein exakt linearer Zusammenhang unwahrscheinlich ist, vermuten sie, dass das lineare Transformationsmodell eine gute Annäherung der tatsächlichen Verhältnisse darstellt. Um das Modell zu testen, verglichen sie den Verlauf des BOLD-Signals im primären visuellen Kortex des Menschen bei abgestuften Reizkontrasten und -dauern mit den Kurven von Einzelzellableitungen bei Affen unter ähnlichen Reizmanipulationen. Die Ergebnisse waren mit einem linearen Transformationsmodell verträglich. FRISTON u.a. (1998) schlagen hingegen ein nichtlineares Transformationsmodell vor. Insbesondere fanden sie, dass die hämodynamische Reaktion bei hoher Reizdarbietungsrate eine Sättigung und in einigen Fällen sogar eine umgekehrte U-Form zeigte. Tatsächlich bestätigt werden können solche Modelle jedoch erst mit Hilfe von fMRT an Affen, bei der Einzelzellaktivität und BOLD-Signal gleichzeitig erhoben werden müssten. Aber selbst wenn sich ein lineares oder nichtlineares Transformationsmodell bestätigt, erlaubt es nur lokale Vergleiche von Aktivierungsstärken unter verschiedenen Reizbedingungen, nicht jedoch quantitative Vergleiche zwischen Arealen.

- Subtraktionsmethode

Das Gehirn ist niemals „ausgeschaltet“ - es ist immer in irgendeiner Weise aktiv. Daher werden in bildgebenden Experimenten die Aktivierungsmuster von zwei oder mehr Aufgaben miteinander kontrastiert, die so geplant sind, dass sie sich in den zu untersuchenden psychologischen Anforderungen unterscheiden sollen. So wird in visuellen Aufgaben häufig vom Aktivierungsmuster während der visuellen Aufgabe das während der Fixation eines stationären Reizes subtrahiert. Die Verwendung der Subtraktionsmethode setzt jedoch einige Annahmen über die Funktionsweise kognitiver Prozesse voraus, die durchaus als kritisch zu betrachten sind: Zum einen wird implizit angenommen, dass kognitive Prozesse aus seriell aneinandergereihten Subprozessen bestehen, so dass die Subtraktion eines Teilprozesses von einem komplexen Prozess die übrigen Teilprozesse ergibt. Im Bereich der kognitiven Psychologie ist das Problem dieser Annahme seit Langem unter dem Begriff „fallacy of pure insertion“ bekannt. In der Subtraktionsmethode, die auf DONDERS (1868) zurück geht, war versucht worden, den Zeitbedarf für einen kognitiven Teilprozess dadurch zu ermitteln, dass Reaktionszeiten für zwei Prozesse voneinander subtrahiert wurden, die sich nur durch den interessierenden Teilprozess unterscheiden sollten. Die Annahme, dass der einfachere einfach ein additiver Bestandteil des komplexeren Prozesses sei, trifft jedoch nicht unbedingt zu: Häufig verwenden Versuchspersonen unterschiedliche Strategien für die beiden Aufgaben. Die selbe Kritik gilt für die Annahmen über die Additivität von neuronalen Prozessen im Gehirn. Zum anderen ist es möglich, dass die interessierende, auf die Basisaufgabe aufgeschaltete Komponente ein Feedback auf neuronale Prozesse der Basisaufgabe ausübt und diese dadurch verändert. Auch dies beeinflusst die Vergleichbarkeit.

Die Interpretation der Ergebnisse hängt somit entscheidend von der Gültigkeit der Annahmen ab, die man über die psychologischen Prozesse in den verglichenen Aufgaben macht. Zudem ist nicht kontrollierbar, was die Versuchspersonen tatsächlich während der Aufgaben tun, v.a. während der Kontrollaufgabe. Da man nur relative Bilder erhält, kann insbesondere das Fehlen einer Aktivierung nicht eindeutig interpretiert werden: Sie kann in beiden Aufgaben oder in keiner vorhanden sein. Ersteres trifft vermutlich auf viele Aktivierungen zu, die mit automatischen Prozessen in Verbindung stehen.

- Interpretation von Aktivierungsmustern

Es ist unklar, wie Aktivierungen an einzelnen anatomischen Orten zu interpretieren sind. Man kann nicht unterscheiden, ob die Aktivierung einen exzitatorischen oder inhibitorischen neuronalen Prozess anzeigt. Ebenso wenig kann man sagen, ob der bezeichnete Ort den Ursprung der Aktivierung darstellt, oder die indirekte Folge von Prozessen an einem anderen Ort ist, an dem beispielsweise eine Inhibition aufgehoben wurde (KOSSLYN 1994).

Trotz aller Interpretationsprobleme ist zu betonen, dass die fMRT als ein für die Neurowissenschaften sehr brauchbares bildgebendes Verfahren anzusehen ist. Ihre räumliche Auflösung (auf Millimeterebene) wird von keinem anderen Verfahren erreicht, und auch die zeitliche Auflösung ist zufriedenstellend (im Millisekundenbereich, z.B. DYMOND u.a. 1999; MENON, LUKNOWSKY & GATI 1998). Zudem erlaubt fMRT (im Gegensatz zu PET) die individuelle Auswertung einzelner Versuchspersonen, wodurch Mittelungsprobleme (z.B. auf-

grund der anatomischen Variabilität von Gehirnen) vermieden werden können. Inzwischen sprechen auch empirische Belege für die Verwendbarkeit der Methode zumindest in einigen Bereichen, insbesondere in der visuellen Wahrnehmung: In den letzten Jahren ist es gelungen, im visuellen Kortex des Menschen die Homologe der visuellen Areale V1 – V5 des Affen zu lokalisieren (z.B. DEYOE u.a. 1996) und darüber hinaus den Einfluss von Aufmerksamkeit auf diese Areale nachzuweisen (TOOTTELL u.a. 1998; BREFZCINSKI & DeYoe 1999). Hingegen existieren über Zusammenhänge zwischen höheren kognitiven Funktionen und fMRT-Aktivierungsmustern zur Zeit recht viele „Ad-hoc“-Erklärungsversuche, die teilweise den Anschein erwecken, von einer auf die andere Arbeit übernommen worden zu sein, wobei es auch zu den zu Grunde gelegten psychologischen Konzepten (z.B. „Steuerung“, „Kontrolle“) bisher keine ausgereiften computationalen Theorien gibt. Die Fragestellung dieser Arbeit liegt an der Schnittstelle zwischen Wahrnehmung und Kognition. Es soll im vorliegenden Abschnitt der Versuch unternommen werden, mit Hilfe der fMRT neuronale Korrelate für Teilprozesse der visuellen Aufmerksamkeit zu spezifizieren. Vor dem eben dargestellten Hintergrund muss allerdings vorangestellt werden, dass die Interpretation der Aktivierungsmuster auf einer (zumindest teilweise) recht spekulativen Ebene erfolgt.

8.2 Neuroanatomische Korrelate visueller Suchstrategien: Literaturüberblick

In einer Reihe von Studien ist bisher untersucht worden, welche anatomischen Areale im Einzelnen an einem oder mehreren Netzwerken der visuellen Aufmerksamkeit beteiligt sind. Zur Lokalisierung von Aufmerksamkeitssystemen liegen Ergebnisse aus tierexperimentellen, neuropsychologischen sowie zunehmend auch aus bildgebenden Verfahren am Menschen vor. Wenn man einen Überblick über diese Ergebnisse geben will, stellt sich das Problem, dass die einzelnen Autoren ihre Arbeiten jeweils vor dem Hintergrund der von ihnen favorisierten theoretischen Konzepte der Aufmerksamkeit interpretiert haben. Je nach zu Grunde gelegtem theoretischen Modell finden sich in den Interpretationen Begriffe wie „selective vs. divided attention“ (CORBETTA 1991), „spatial vs. nonspatial attention“ (COULL & FRITH 1998), „object-based vs. space-based attention“ (FINK u.a. 1997), „sustained vs. selective attention“ (COULL, FRACKOWIAK & FRITH 1998) oder „directed attention“ (MESULAM 1981). Weder sind all diese Begriffe direkt miteinander vergleichbar noch leicht in ein gemeinsames theoretisches Konzept zu integrieren. Für die vorliegende Fragestellung ist es allerdings auch nicht nötig, alle Arbeiten vor ihrem jeweiligen theoretischen Hintergrund zu diskutieren. Statt dessen soll als theoretisches Konzept das hier entwickelte Reaktionszeitmodell der visuellen Suche zugrunde gelegt und die Bedeutungen der einzelnen Befunde in Bezug auf dieses Konzept referiert werden. Hierbei ist anzumerken, dass nicht alle im Folgenden referierten Autoren mit den Annahmen des Modells übereinstimmen (beispielsweise wenden sich DESIMONE & DUNCAN (1995) gegen das Konzept eines den Raum absuchenden Aufmerksamkeitsfokus - vgl. hierzu auch Kapitel 2).

Bei den hier verwendeten visuellen Suchaufgaben spielen im Wesentlichen zwei Arten von Aufmerksamkeit eine Rolle: Zum einen moduliert Aufmerksamkeit die Wahrnehmung von Objektmerkmalen, zum anderen geschieht dies an verschiedenen Stellen im Raum. Die erste Funktion ist für die Merkmalsdiskriminierung wesentlich, auf der die Zielreizentdeckung beruht. Daher wird diese Funktion im Folgenden *Merkmalsaufmerksamkeit* genannt. Die zweite

Funktion entspricht der Verlagerung des Aufmerksamkeitsfokus und soll mit *räumlicher Aufmerksamkeit* bezeichnet werden. Bei der Lokalisierung der an diesen Funktionen beteiligten neuroanatomischen Strukturen ist es sinnvoll, zwischen solchen Strukturen zu unterscheiden, die die Aufmerksamkeitsfunktionen *initiieren*, und solche, auf die die Aufmerksamkeit *wirkt*, die also durch Aufmerksamkeit moduliert werden. Das Initiieren umfasst für die Merkmalsaufmerksamkeit die Selektion von zu beachtenden Merkmalen und perzeptuellen Dimensionen, für die räumliche Aufmerksamkeit die Selektion einer geeigneten Fokusgröße sowie von Orten, auf die der Fokus verlagert wird. Wirkorte der Aufmerksamkeit sind vermutlich solche, an denen die Wahrnehmungsprozesse stattfinden. Neben Wahrnehmungsprozessen und ihrer Modulation durch Aufmerksamkeit sind noch weitere kognitive Prozesse an der visuellen Suche beteiligt. Im Wesentlichen sind dies Entscheidungen (ob die Suche fortgesetzt oder abgebrochen werden soll) und motorische Handlungen (Augenbewegungen und Drücken der Antworttaste).

Im Folgenden werden kurz Ergebnisse von Studien referiert, die diese Funktionen neuroanatomisch und neurophysiologisch untersucht haben.

Grundlegende Wahrnehmungsprozesse

Die bewusste Wahrnehmung von Objektmerkmalen und -positionen beruht auf der Verarbeitung der Information aus der Retina in den visuellen Arealen des Kortex. Mit Hilfe von Einzelzelleitungen aus dem Gehirn höherer Säugetiere sind viele dieser Areale inzwischen recht gut lokalisiert (vgl. den Überblicksartikel von FELLEMAN & VAN ESSEN 1991). Der primäre visuelle Kortex V1 liegt im Sulcus calcarinus im Okzipitallappen und unterscheidet sich von den angrenzenden Kortexarealen durch den GENNARISCHEN Streifen, der die Bezeichnung *striärer Kortex* (Area striata) bedingt. Er erhält die Signale von der Retina über den Corpus geniculatum laterale des Thalamus und leitet die verarbeiteten Signale weiter in zahlreiche *extrastriäre visuelle Areale*. Diese werden eingeteilt nach Kriterien wie retinotopischer Organisation, Zellarchitektur, synaptische Konnektionsmuster und physiologische Eigenschaften und mit V2, V3, usw., aber auch mit anderen und z.T. uneinheitlichen Abkürzungen bezeichnet. Die diesbezügliche Forschung ist noch nicht abgeschlossen. Zur Zeit sind ca. 30 visuelle Areale beim Makakenaffen bekannt (TOOTELL, DALE, SERENO & MALACH 1996), ihre Funktionen sind jedoch z.T. umstritten. Im visuellen Kortex von Makakenaffen ist eine Unterteilung in zwei Subsysteme propagiert und diskutiert worden, die auf UNGERLEIDER & MISHKIN (1982) zurückgeht: Im ventralen, okzipito-temporalen *What*-System sollen visuelle Objekteigenschaften wie Farbe oder Form verarbeitet werden, im dorsalen, okzipito-parietalen *Where*-System hingegen Bewegung und die Position von Objekten im Raum (Abbildung 27). Viele der visuellen Areale sind retinotop organisiert, wobei die Größe der rezeptiven Felder sowie die Komplexität des Reaktionsmusters mit der Entfernung von V1 zunimmt.

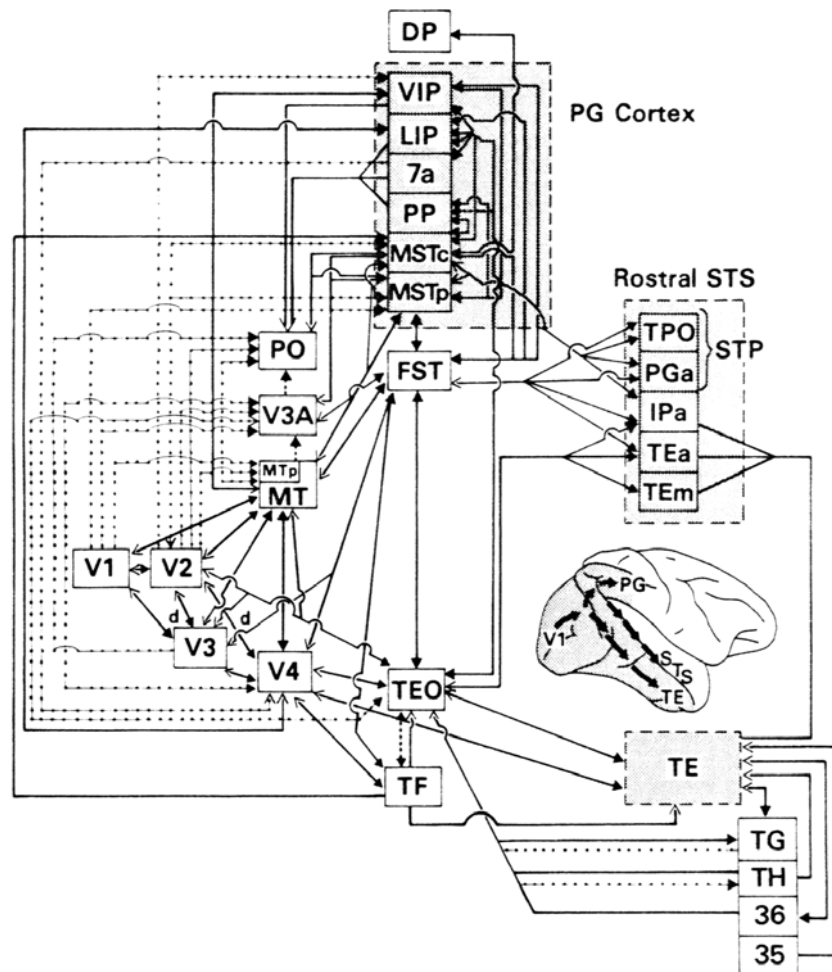


Abbildung 27: Darstellung des *What-* und *Where-*Systems für die visuelle Verarbeitung im Primatengehirn. Aus: DISTLER, BOUSSAOD, DESIMONE & UNGERLEIDER 1993.

Aufgrund von neuropsychologischen Beobachtungen war schon länger vermutet worden, dass topographisch homologe Areale im menschlichen Kortex existieren, die ähnliche Funktionen erfüllen. Mit Hilfe bildgebender Verfahren wie PET (Positronen-Emissions-Tomographie) und fMRT ist es in den letzten Jahren gelungen, solche Annahmen besser zu fundieren. Im Anschluss an die Arbeiten von SERENO u.a. (1995) identifizierten beispielsweise DEYOE u.a. (1996) mit fMRT sieben unterschiedliche visuelle Areale und argumentierten für deren topographische Homologie zu entsprechenden Arealen im Kortex von Makaken: Im Anschluss an V1 spezifizierten sie die dorsal und ventral gelegenen, jeweils das untere bzw. obere visuelle Halbfeld repräsentierenden Anteile von V2 und V3. Im ventralen System identifizierten sie topographisch homologe Areale zu Teilen von V4, im dorsalen System zu Teilen von V3A und dem MT/MST-Komplex. Darüber hinaus fanden sie bisher unbekannte parietale visuelle Areale. Mit verschiedenen PET- und fMRT-Studien konnte gezeigt werden, dass auch das menschliche visuelle System die funktionale Unterteilung in ein dorsales *Where-* und ein ventrales *What-*System aufweist. (UNGERLEIDER & HAXBY 1994; UNGERLEIDER, COURTNEY & HAXBY 1998). Die Verarbeitung objektidentifizierender Merkmale führte meist zu Aktivierungen im ventralen System. So wurden bei der Wahrnehmung von Farbe regelmäßig Aktivierungen des posterioren Sulcus collateralis und des angrenzenden Gyrus lingualis gefunden

(z.B. SAKAI u.a. 1995). Im inferotemporalen Kortex (posteriorer Anteil des Gyrus fusiformis) traten Aktivierungen auf, die mit Ortsfrequenz- (z.B. HEINZE u.a. 1998) und Formdiskriminierung (z.B. KAWASHIMA u.a. 1998) in Verbindung gebracht wurden. Ein bestimmter Bereich des Gyrus fusiformis scheint dabei auf Gesichtererkennung spezialisiert zu sein („Fusiform Face Area“, KANWISHER, MCDERMOTT & CHUN 1997). Bei der Betrachtung geordneter Texturen (mit Kanten und Flächen) fanden BEASON-HELD u.a. (1998) eine stärkere Aktivierung in striären und extrastriären visuellen Arealen (Gyrus occipitalis medius, Gyrus lingualis und Gyrus fusiformis) als bei Zufallstexturen. MALACH u.a. (1995) verglichen Aktivierungen bei Objektbetrachtung mit der bei Texturbetrachtung und beschrieben die Funktion eines sogenannten *LO-Komplexes* („lateral-occipital complex“) für die Objektverarbeitung: Er beginnt im lateralen Teil des Gyrus fusiformis, verzweigt sich dann und geht bis zur vorderen Grenze der Brodman-Areale 19 bzw. 37, enthält also Teile der Gyri occipitales, des Gyrus fusiformis und Gyrus lingualis.

Bei all diesen Studien ist zu bemerken, dass der Einfluss von Aufmerksamkeit auf bestimmte Merkmale zwar nicht geplant variiert und kontrolliert wurde, vermutlich aber trotzdem eine Rolle gespielt hat.

Merkmalsaufmerksamkeit

Wenn bestimmte Objektmerkmale bedeutsam für eine Handlung sind, wird ihre Verarbeitung durch Aufmerksamkeitszuwendung auf diese Merkmale verbessert. Bei Einzelzellregistrierungen an Affen fand man Aufmerksamkeitseffekte auf bestimmte Objektmerkmale in Zellen des extrastriären Areals V4 (z.B. SPITZER u.a. 1988) sowie im inferotemporalen Kortex (IT; RICHMOND & SATO 1987). CORBETTA u.a. (1991) lokalisierten Einflüsse der Merkmalsaufmerksamkeit am Menschen mit Hilfe von PET mit folgendem Paradigma: In einer Aufgabenbedingung (selektive Aufmerksamkeit) sollten die Versuchspersonen auf die Veränderung eines bestimmten Merkmals dargebotener identischer Objekte reagieren (Farbe, Form oder Geschwindigkeit), in einer zweiten Bedingung (verteilte Aufmerksamkeit) waren alle Merkmale relevant und auf eine Veränderung hin zu beobachten. Kontrollbedingungen waren die passive Betrachtung der gleichen Objekte sowie die Fixation eines zentralen Punktes. Es wurden die Aktivierungsmuster aus allen paarweisen Subtraktionen der vier Bedingungen ermittelt. Zusammengefasst ergab sich, dass für die selektive Beachtung einzelner Merkmale sowohl visuelle als auch nicht-visuelle Areale eine Rolle spielen: Bei den visuellen Arealen war in der selektiven Geschwindigkeitsbeachtung besonders der linke inferiore Parietallappen aktiviert, bei der selektiven Farbbeachtung der Sulcus collateralis (der das vermutliche Homolog zum V4 des Affen darstellt, vgl. MCKEEFRY & ZEKI 1997) sowie der dorsolaterale okzipitale Kortex und bei der selektiven Aufmerksamkeit auf die Form der Sulcus collateralis, der Gyrus fusiformis, der Gyrus parahippocampalis und der obere Teil des Sulcus temporalis. (Letztere Areale entsprechen ungefähr dem oben beschriebenen *LO-Komplex* von MALACH u.a. (1995)). Weitere in den selektiven Bedingungen aktivierte Areale waren die Basalganglien, der posteriore Anteil des Thalamus sowie der laterale orbitofrontale Kortex und insuläre und prämotorische Areale. In der Bedingung mit verteilter Aufmerksamkeit zeigten sich Aktivierungen des Gyrus cinguli anterior und des dorsolateralen präfrontalen Kortex. Die nicht-visuellen Areale könnten für die Initiierung und Modulation der Aufmerksamkeit zuständig sein, die visuellen Areale dagegen die Wirkorte der Aufmerksamkeit darstellen.

Auch in anderen Experimenten mit bildgebenden Verfahren wurden Effekte der Merkmalsaufmerksamkeit in verschiedenen extrastriären Arealen des ventralen Systems gefunden. Eine Aufgabe, in der zwei Objekte miteinander verglichen werden sollten, aktivierte (unabhängig von der Position der Objekte) den unteren Sulcus temporalis der linken Hemisphäre (KAWASHIMA u.a. 1998). LE, PARDO & HU (1998) fanden bei der selektiven Beachtung von Farbe oder Form bilaterale Aktivierungen okzipitaler und inferotemporaler Regionen, beim Wechsel zwischen Form- und Farbbeachtung hingegen Aktivierungen im posterioren oberen Parietallappen, Cuneus und Präcuneus. Letztere Orte sind damit Kandidaten für Stellen im Netzwerk, an denen Aufmerksamkeit zwischen verschiedenen Dimensionen „ausgewählt“ oder „umgeschaltet“ wird, was von POLLMANN u.a. (eingereicht) gezielt untersucht und bestätigt wurde. MANGUN u.a. (1997) verglichen perzeptuell schwierige und einfache Objektvergleiche in einer kombinierten PET- und ERP-Studie und fanden in der schwierigen Bedingung eine stärkere Aktivierung im Gyrus fusiformis und im Gyrus occipitalis medius. Bei einer Farbunterscheidung in Gesichtern gegenüber einer Gesichtsidentifikation fanden CLARK u.a. (1997) Aktivierungen im Sulcus collateralis sowie in angrenzenden Regionen des Gyrus lingualis und Gyrus fusiformis. COULL, FRACKOWIAK & FRITH (1998) schließlich konnten in einer PET-Studie ein ganzes Netzwerk der selektiven, nicht-räumlichen Aufmerksamkeit (d.h. Merkmalsaufmerksamkeit) aktivieren. Die Aufgabe war, zu beobachten, ob unter nacheinander an einer zentralen Position präsentierten Objekten ein definiertes Zielobjekt auftaucht. Das hierbei identifizierte anatomische Netzwerk bestand aus den Gyri fusiformes und linguales, dem dorsolateralen präfrontalen Kortex (der bilateral, rechts allerdings stärker aktiviert war) sowie dem rechten Gyrus cinguli anterior.

Zusammengefasst deutet vieles darauf hin, dass der Wirkort der Merkmalsaufmerksamkeit in ventralen extrastriären visuellen Arealen lokalisiert werden kann. Je nach Aufgabe und zu beachtenden Merkmalen sind Gyrus fusiformis, Gyrus lingualis, Sulcus collateralis, Sulcus temporalis (v.a. der untere Teil) und Gyrus occipitalis medius beteiligt. Ob auch Aktivierungen des primären visuellen Kortex (V1) durch Aufmerksamkeit moduliert werden, war lange umstritten (vgl. GRATTON 1997 gegenüber WATANABE u.a. 1998). SOMERS u.a. (1999) konnten die Debatte mit der Beobachtung entscheiden, dass es dort Aufmerksamkeitseffekte gibt, diese aber sehr klein zu sein scheinen. Bei der Initiierung und Weiterleitung der Objektaufmerksamkeit könnten der dorsolaterale präfrontale Kortex, der Gyrus cinguli anterior sowie subkortikale Areale eine Rolle spielen. Um die tatsächliche Funktion dieser Areale in den untersuchten Aufgaben zu bestimmen, liegen jedoch bisher noch nicht genügend Ergebnisse vor.

Räumliche Aufmerksamkeit

Das Konzept eines Aufmerksamkeitsfokus variabler Größe (und Form), der durch den Raum bewegt wird, legt die Vorstellung einer oder mehrerer spatiotop organisierter Areale nahe. In solchen Arealen könnten Merkmale und/oder auch Handlungen in Bezug auf den Raum repräsentiert sein. Es liegen zahlreiche Ergebnisse von Einzelzelleableitungen am Makakenaffen vor, die die räumliche Verlagerung von Aufmerksamkeit untersucht haben. Bei verdeckter Aufmerksamkeitsverlagerung auf eine bestimmte Position zeigten Neuronen im posterioren parietalen Kortex (BUSHNELL u.a. 1981) und im lateralen Pulvinar des Thalamus (PETERSEN u.a. 1985) eine erhöhte Aktivität. Neuronen im frontalen Augenfeld (BUSHNELL u.a. 1981, BRUCE & GOLDBERG 1985), im dorsolateralen präfrontalen Kortex (BOCH & GOLDBERG 1989) sowie subkortikal im Nucleus caudatus (HIKOSAKA u.a. 1989) und Colliculus superior

(WURTZ & GOLDBERG 1972) feuerten hingegen nur unmittelbar vor einer Augenbewegung zu der betreffenden Reizposition. Gegenwärtig wird die Bedeutung dieser Gebiete und eine Differenzierung in funktionell unterschiedliche Teilgebiete weiter untersucht (z.B. ANDERSEN 1995). SNYDER, BATISTA & ANDERSEN (1997) interpretieren den posterioren parietalen Kortex als eine Schnittstelle zwischen sensorischen und motorischen Strukturen: In ihm sei einerseits der Raum repräsentiert, andererseits die Planung motorischer Handlungen in diesem Raum. Hier soll speziell für die Sakkadensteuerung das Areal LIP („lateral intraparietal area“), für Greifhandlungen hingegen das Areal PRR („parietal reach region“) zuständig sein (ANDERSEN 1999).

Beim Menschen wurden Lokalisationen räumlicher Aufmerksamkeitsfunktionen zunächst auf der Basis neuropsychologischer Befunde diskutiert. Die beiden bedeutendsten diesbezüglichen Ansätze stammen wohl von MESULAM (1981, 1990) sowie POSNER & PETERSEN (1990). Beide beruhen vorwiegend auf der Untersuchung von Patienten mit *Neglect*²⁰, einem Syndrom, das vor Allem bei Läsionen des rechten Parietallappens auftritt, sowie der Interpretation dieser Befunde im Zusammenhang mit tierexperimentellen Studien.

Nach dem Modell von MESULAM (1981, 1990) besteht ein Netzwerk für die räumlich-visuelle Aufmerksamkeit aus vier Komponenten: (1) Im dorsolateralen posterioren parietalen Kortex ist eine sensorische Karte des extrapersonalen Raumes lokalisiert. (2) Der dorsolaterale präfrontale Kortex (frontales Augenfeld) stellt einen Bezug von dieser Karte zu Bewegungshandlungen (Augenbewegungen und Greifhandlungen) her. Weiterhin gehören zum Netzwerk (3) eine limbische Komponente, die im Gyrus cinguli lokalisiert ist und eine „motivationale Karte“ enthält, sowie (4) eine retikuläre Komponente, die das Erregungs- / Vigilanzniveau steuert. Das Netzwerk weist eine Lateralisierung auf: Während im rechten Parietallappen Informationen aus beiden visuellen Halbfeldern verarbeitet werden sollen, repräsentiere der linke Parietallappen nur das kontralaterale, also rechte, Halbfeld. Mit Hilfe von PET (NOBRE u.a. 1997) und fMRT (KIM u.a. 1999) konnten Arbeitsgruppen um MESULAM später die postulierten Komponenten des Netzwerkes beim Menschen lokalisieren. Die Aufgabe bestand in verdeckten Aufmerksamkeitsverlagerungen nach rechts und links, um dort angekündigte Zielreize zu entdecken. Folgende Komponenten des Netzwerkes konnten dabei identifiziert werden: Das frontale Augenfeld, der posteriore parietale Kortex (hier insbesondere der rechte Sulcus intraparietalis), der Gyrus cinguli anterior und der Thalamus (möglicherweise Pulvinar). Neben diesen erwarteten Arealen wurden allerdings auch Aktivierungen in anderen Arealen wie der anterioren Insel, des temporo-okzipitalen Kortex und des SMA (supplementärmotorisches Areal) gefunden.

Das Aufmerksamkeitsmodell von POSNER & PETERSEN (1990) unterscheidet drei Subsysteme der Aufmerksamkeit: (1) Das *hintere Aufmerksamkeitssystem* ist für die Aufmerksamkeitsverlagerung zu bestimmten Positionen zuständig und besteht aus dem posterioren parietalen Kortex, dem Pulvinar und dem Colliculus superior. Es ist im dorsalen visuellen System lokalisiert und hat seinen Wirkort im ventralen System, wo es die Objektverarbeitung an den ausgewählten Positionen moduliert. Zusätzlich weist es eine Lateralisierung auf, indem ein großer Aufmerksamkeitsfokus stärker rechts und ein kleiner links repräsentiert ist. (2) Das *vorde-*

²⁰ Patienten mit Neglect haben Schwierigkeiten, ihre Aufmerksamkeit auf das kontraläsionale, also linke, visuelle Halbfeld zu richten

re Aufmerksamkeitssystem ist für die bewusste Zielreizerkennung zuständig. Diese Funktion umfasst auch die Vorbereitung von Handlungen, die mit der Zielreizerdeckung verbunden sind. Als anatomische Lokationen dieses Systems vermuten POSNER & PETERSEN Teilgebiete des lateralen und medialen frontalen Kortex, da diese ausgeprägte Verbindungen mit dem hinteren Aufmerksamkeitssystem aufweisen. Auch der Gyrus cinguli anterior spielt in dieser Verbindung vermutlich eine Rolle. (3) Wachsamkeit („alerting“) als Grundlage für die Funktion des hinteren Aufmerksamkeitssystem vermuteten POSNER & PETERSEN in einem Subsystem der rechten Hemisphäre. Auch dieses Modell fand einige Bestätigungen durch bildgebende Verfahren: In einer PET-Studie fanden CORBETTA, MIEZIN, SHULMAN & PETERSEN (1993) bei einer Aufgabe nach dem Posner-Paradigma (Aufmerksamkeitsverlagerungen nach rechts und links auf zentrale Hinweisreize hin) Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC) um den Sulcus postcentralis nahe dem Brodman-Areal 7 sowie im superioren frontalen Kortex (SFC). Dabei war der SFC nur aktiv, wenn auf den Zielreiz mit einer motorischen Handlung (Tastendruck) reagiert werden sollte, der SPC jedoch unabhängig von einer solchen offenen Reaktion. Weiterhin zeigten sich eine Reihe anderer Aktivationsherde, die mit dem Modell kompatibel sind, z.B. im Gyrus cinguli anterior, Präcuneus und in verschiedenen extrastriären visuellen und motorischen Arealen. Die gleiche Autorengruppe untersuchte 1995 auch visuelle Suche mit PET und fand Aktivierungen in vergleichbaren Gebieten des SPC und Präcuneus während der Konjunktionssuche im Vergleich zur Merkmalsuche. Daraus schlossen sie, dass diese Gebiete tatsächlich eine Rolle bei der räumlichen Aufmerksamkeitsverlagerung spielen. Diese Interpretation fand darüber hinaus Bestätigung durch andere Methoden: Mit Hilfe von transkranieller magnetischer Stimulation (TMS) zeigten ASHBRIDGE, WALSH & COWEY (1997), dass die Konjunktionssuche, nicht jedoch die Pop-Out-Suche durch Stimulation über dem rechten superioren parietalen Kortex beeinträchtigt wurde. Sie vermuteten darüber hinaus, dass an der Entscheidung, ob ein Zielobjekt vorhanden war, frontale Gebiete, die mit den parietalen in Verbindung stehen, eine wesentliche Rolle spielen.

Beide Aufmerksamkeitsmodelle und auch die empirischen Ergebnisse stimmen darin überein, dass ein Teilgebiet des Parietallappens, vermutlich im Bereich des Sulcus intraparietalis, wesentlich an der räumlichen Aufmerksamkeitsverlagerung beteiligt ist. Dieses Gebiet steht mit extrastriären visuellen Arealen, mit dem dorsolateralen frontalen Kortex, mit dem Gyrus cinguli anterior und verschiedenen subkortikalen Gebieten in Verbindung. Deren Rolle im Aufmerksamkeitsprozess wird meist in Bezug auf Steuerung der Merkmalsaufmerksamkeit, Vorbereitung von Handlungen und motivationalen Komponenten, allerdings teilweise in unterschiedlicher Weise, interpretiert.

Das Zusammenspiel von Merkmals- und Raumaufmerksamkeit

Für die visuelle Suche werden beide Funktionen benötigt: Der Fokus der Aufmerksamkeit muss durch den Raum bewegt und dabei die Objekte im Fokus mit einer internen Repräsentation oder anderen wahrgenommenen Objekten verglichen werden. Wo und wie Raum- und Objektinformation verknüpft werden, ist bisher umstritten. Geht man von der strengen Interpretation zweier paralleler visueller Systeme mit getrennten Funktionen (UNGERLEIDER & MISHKIN 1982) aus, dann gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Zum einen könnte die Verknüpfung in anderen anatomischen Strukturen lokalisiert sein. Beispielsweise schlagen CRICK & KOCH (1990) vor, dass das Zusammenwirken des *What*- und *Where*-Systems durch subkortikale (Pulvinar, Claustrum, Colliculus superior) sowie präfrontale Strukturen vermittelt wird und lokalisieren in diesen Strukturen auch WOLFES (1994) *Aktivierungskarte*. Anstatt nach

einem externen Verknüpfungsmechanismus zu suchen, ist in den letzten Jahren jedoch auch zunehmend die Interpretation der beiden Systeme als streng getrennte *What* und *Where*-Verarbeitung hinterfragt worden (z.B. MILNER & GOODALE 1993; CRAMON & BUBLAK 1997). MILNER & GOODALE beschreiben vielfältige Interkonnektivitäten zwischen den beiden Systemen und propagieren, dass beide Systeme Objektinformationen aus den primären visuellen Arealen erhalten, sie jedoch für unterschiedliche Ziele nutzen: Das dorsale (*Where*-) System und dort vor Allem der inferiore Parietallappen in Zusammenarbeit mit dem prämotorischen und präfrontalen Kortex verwendet Objektrepräsentationen für eine visuelle „Online“-Überwachung und Steuerung von Handlungen. Im ventralen (*What*-) System sei ähnliche Objektinformation repräsentiert, sie werde dort jedoch für „Offline“-Funktionen wie perzeptuelles Lernen und Wiedererkennen verwendet. In eine solche Sichtweise ist die visuelle Suche gut einzuordnen: Aufmerksamkeit moduliert die neuronale Aktivität in beiden Systemen. Im ventralen System wird die neuronale Antwort auf die für die Suche bedeutsamen Stimulusmerkmale moduliert (Merkmalsaufmerksamkeit), im dorsalen System werden Neuronenaktivitäten moduliert, die diese Merkmale im Raum repräsentieren (räumliche Aufmerksamkeit). Wenn Letzteres nacheinander an verschiedenen „Stellen“ des repräsentierten Raumes geschieht, entspricht dies einem Verlagern des Aufmerksamkeitsfokus. Über Verbindungen mit dem frontalen Kortex werden Entscheidungen getroffen, die sowohl motorische Handlungen als auch die Funktionen der beiden Aufmerksamkeitssysteme betreffen. Unter einer solchen Sichtweise könnte man WOLFES *Merkmalskarten* im ventralen System lokalisieren (extrastriäre visuelle Areale) und die *Aktivierungskarte*, in der die Informationen der Merkmalskarten zusammenfließen, im dorsalen System (parietaler Kortex). Die Frage nach der Verknüpfung der Information aus beiden Systemen stellt aufgrund ihrer Interkonnektivität kein spezielles Problem mehr dar. POSNER & PETERSEN (1990) sowie auch verschiedene andere Autoren betonen hierfür jedoch die Rolle des Thalamus.

Empirische Belege für die Wirkung räumlicher Aufmerksamkeitszuwendung auf extrastriäre visuelle Areale stammen z.B. von TOOTELL u.a. (1998). Es gelang ihm, die Effekte, die die räumliche Aufmerksamkeitszuwendung auf eine Reihe von extrastriären visuellen Arealen hat, in Bezug auf das Gesichtsfeld und die Retinotopie dieser Areale zu kartieren. HILLYARD & ANLLO-VENTO (1998) untersuchten den zeitlichen Zusammenhang zwischen räumlicher und Merkmalsaufmerksamkeit mit Hilfe von ERP (Event-related brain potentials). Sie fanden, dass die Orts- der Merkmalsverarbeitung voranging. Dadurch wird die Ansicht unterstützt, dass die räumliche Aufmerksamkeit eine Kontrolle auf die Merkmalsaufmerksamkeit ausübt. Wie diese Wirkung vermittelt wird, wurde jedoch in keiner der beiden Arbeiten gezeigt.

Aufmerksamkeit und Handlung

In vielen Arbeiten mit bildgebenden Verfahren (s.o.) ist die visuelle Aufmerksamkeit im Zusammenhang mit Bewegungshandlungen untersucht worden. Diese bestanden meist in Augen- und/oder Tastendruckbewegungen. Neben der Aktivierung prämotorischer und motorischer Areale wurden häufig Aktivierungen im dorsolateralen präfrontalen Kortex gefunden. Die Interpretation dieser Befunde ist jedoch nicht eindeutig: Dem dorsolateralen präfrontalen Kortex werden teilweise Entscheidungsprozesse zugeschrieben (z.B. ob ein Zielreiz vorhanden ist oder nicht), die Initiierung und Steuerung der Aufmerksamkeitssysteme, aber auch die direkte Vorbereitung der motorischen Handlungen. Einzelzelleableitungen an Affen sprechen für eine Rolle des posterioren parietalen Kortex bei der Vorbereitung aufmerksamkeitsbezogener Bewegungen. Bisher gibt es wenig Arbeiten, die die genannten Funktionen beim Men-

schen systematisch untersucht haben. CORBETTA verglich Aktivierungsmuster bei verdeckter Aufmerksamkeitsverlagerung mit Aktivierungsmustern bei zielgerichteten Augenbewegungen (Sakkaden), sowohl in einer Metaanalyse verschiedener Studien (1998) als auch mit Hilfe einer direkten eigenen Vergleichsstudie (CORBETTA u.a. 1998). In Letzterer fand er identische Aktivationsherde bei verdeckter und offener Aufmerksamkeitsverlagerung. Diese lagen frontal im Bereich des frontalen Augenfeldes (Sulcus präcentralis / posteriorer Anteil des Sulcus frontalis superior) und parietal in drei Abschnitten des Sulcus intraparietalis: einem vorderen, einem hinteren und einem „IPS/TOS“ genannten Gebiet, das an der Verbindung des Sulcus intraparietalis mit dem Sulcus occipitalis transversalis lag.

Insgesamt spricht die derzeitige Befundlage für die bereits aufgrund von tierexperimentellen Studien geäußerte Interpretation (s.o.), dass im Bereich des Sulcus intraparietalis (SIP) eine Schnittstelle der räumlichen Aufmerksamkeit liegt, die zum einen die Sensitivität der visuellen Areale an den ausgewählten Positionen steigert, zum anderen aufmerksamkeitsbezogene Bewegungen vorbereitet. Im Bereich des dorsolateralen präfrontalen Kortex ist die Befundlage nicht so eindeutig. Vergleicht man die in den einzelnen Arbeiten angegebenen anatomischen Lokationen genauer, so werden vermutlich zwei unterschiedliche Aktivationsherde beschrieben. Einer liegt am Zusammenfluss des Sulcus präcentralis mit dem Sulcus frontalis superior, dem vermutlichen Homolog des frontalen Augenfeldes (FEF) (PAUS 1996; LUNA u.a. 1998). In anderen Arbeiten liegt das aktivierte Gebiet im Bereich des Gyrus frontalis medius (ROSEN u.a., 1999; POLLMANN u.a., eingereicht). Möglicherweise ist das FEF im Zusammenhang mit dem SIP bei Aufmerksamkeitsverlagerungen und aufmerksamkeitsbezogenen Bewegungen aktiviert, während der Gyrus frontalis medius in die Entscheidungen der visuellen Suche involviert ist (POSNERS „bewusste Zielreizentdeckung“, s.o.).

8.3 fMRT-Experiment

Im vorliegenden fMRT-Experiment sollten die Versuchspersonen die gleichen Suchaufgaben ausführen wie in Experiment 2: Es war in jedem Durchgang zu entscheiden, ob sich unter den homogenen Ablenkerobjekten ein vorgegebenes Zielobjekt befand, und entsprechend eine von zwei Antworttasten zu drücken. Das Zielobjekt unterschied sich nur in einer Dimension von den Ablenkern. Wie bisher wurden vier Faktoren variiert: Die Schwierigkeit der Zielerkennung (durch Abstufung der physikalischen Ziel-Ablenker-Ähnlichkeit), die Objektanzahl, die Aufgabe (*Suche* gegenüber *Vergleich* – bei Letzterem konnte das Zielobjekt nur an einer vorher angekündigten Position erscheinen) und das Vorhandensein des Zielobjektes. Aus den mittleren Reaktionszeiten in den einzelnen Faktorstufenkombinationen wurden mit Hilfe des Reaktionszeitmodells für jede Versuchsperson die Werte der Modellparameter bestimmt. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse dieser Arbeit kann angenommen werden, dass diese Werte Aufschluss geben über die Suchstrategien in den einzelnen experimentellen Bedingungen, d.h. über Beschaffenheit, Anzahl und Zeitdauer einzelner Teilprozesse der Suche. Ziel ist es, Zusammenhänge herzustellen zwischen diesen die Teilprozesse charakterisierenden Werten und der hämodynamischen Reaktion, also der vermuteten neuronalen Aktivität, in einzelnen Hirngebieten. Ergibt sich ein (monotoner oder sogar linearer) Zusammenhang zwischen der gemessenen Aktivierung in einem Hirngebiet und den Werten eines Modellparameters über die experimentellen Bedingungen, dann soll dies als Hinweis darauf gewertet werden, dass das entsprechende Hirngebiet an dem durch den Parameter charakterisierten Prozess be-

teiligt ist. Diese Auswertung soll für jede Versuchsperson separat erfolgen. Im Anschluss daran sollen die Ergebnisse aller Versuchspersonen qualitativ zusammengefasst werden.

Die Auswahl auszuwertender Hirngebiete soll größtenteils hypothesengeleitet erfolgen. Auf der Grundlage des Literaturüberblicks (Abschnitt 8.2) wird im Folgenden versucht, zu den hypothetischen Teilprozessen der beiden Aufgaben *Suche* und *Vergleich* Hirngebiete anzugeben, die bei diesen Teilprozessen aktiviert sein sollten. Für diese Hirngebiete werden Hypothesen über die Zusammenhänge der Aktivierung mit den Werten der Modellparameter formuliert. In einem weiteren, explorativen Teil der Auswertung soll geprüft werden, ob es weitere Hirngebiete gibt, die konsistente Aktivierungsmuster über mehrere Versuchspersonen hinweg zeigen, und diese im Zusammenhang mit den Modellparametern interpretiert werden.

8.3.1 Methode

Versuchspersonen

Acht Probanden nahmen am Experiment teil. Da eine Versuchsperson zum zweiten der beiden Termine nicht erschien, bei einer weiteren aufgrund von technischen Problemen die Datenaufzeichnung inkomplett war und bei einer dritten die Ergebnisse aufgrund zu großer Bewegungsartefakte nicht auswertbar waren, lagen am Ende von fünf Versuchspersonen auswertbare Daten vor. Diese Probanden (drei Frauen und zwei Männer im Alter zwischen 21 und 29 Jahren) waren neurologisch gesund, normalsichtig und rechtshändig. Alle waren mit Reaktionszeitexperimenten sowohl im Labor als auch im MR-Scanner vertraut. Zwei von ihnen (EM und CG) hatten bereits an den Experimenten 2 und 3 teilgenommen. Alle hatten an einem Trainingsexperiment von ca. einer Stunde Dauer im Labor teilgenommen, in dem dieselben Aufgaben, allerdings in schnellerer Abfolge und größerer Anzahl, zu bearbeiten waren wie im fMRT-Experiment.

Apparatur

Die Versuchsperson lag während des Experimentes im Gradientenrohr des MR-Scanners. Ihr Kopf war mit Schaumkörpern seitlich fixiert. Zusätzlich trug sie schalldämmende Kopfhörer gegen den Lärm des Scanners. Die Reize wurden von einem Personalcomputer (Lintec Pentium 90) generiert, wobei die Abfolge der Darbietungen vom Steuerungsrechner des Scanners gesteuert wurde. Dadurch wurden die Reizpräsentationen mit der Aufnahme der funktionellen Bilder synchronisiert. Die Reize wurden mit Hilfe eines LCD-Projektors auf eine transparente Mattscheibe projiziert, die hinter dem Kopf der Versuchsperson innerhalb des Gradientenrohres angebracht war. Über eine Spiegelbrille konnte die Versuchsperson die Reize sehen. Sie beantwortete die Aufgaben, indem sie mit Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand jeweils eine von zwei Antworttasten betätigte. Der rechte Arm und das Kästchen mit den Antworttasten war dabei in bequemer Position auf ihrem Körper fixiert.

Die funktionelle Bildgebung wurde mit einem 3 Tesla Spektrometer (Medspec 30 / 100, Bruker, Ettlingen) durchgeführt, welches zusätzlich mit einer Kopfgradientenspule ausgestattet war (SGRAD MkIII 580/400/S, MAGNEX Scientific, Ltd., Abingdon, UK). Die Messung erfolgte mit der EPI-Technik. EPI (Echo Planar Imaging) ist eine ultraschnelle MR-Technik, bei der die gesamte Menge an Information, die zur Rekonstruktion eines Bildes erforderlich

ist, nach einem einzigen Hochfrequenzimpuls erfasst wird. Hier wurde eine „single shot gradient recalled“ EPI-Sequenz verwendet (TR = 2000 ms, flip angle = 40°, TE = 40 ms²¹). Das gesamte Experiment bestand aus drei Messreihen. In jeder wurden 445 Zeitpunkte im Abstand von zwei Sekunden erhoben. Pro Zeitpunkt wurden 14 Schichten des Gehirns gemessen. Dabei handelte es sich um Axialschnitte, von denen einer die AC-PC-Linie²² enthielt und die anderen parallel dazu gelegt wurden, und zwar fünf Schichten unterhalb und acht oberhalb der AC-PC-Schicht. Die Schichtdicke betrug 5 mm und der Abstand der Schichten 2 mm. Jede Schicht entsprach einer Matrix von 64 x 64 Pixeln und hatte eine Seitenlänge (FOV, „field of view“) von 19,2 cm. Damit hatte jedes Voxel, d.h. jedes dreidimensionale Bildelement, eine Größe von 3 x 3 x 5 mm.

Reize

Die Suchbilder entsprachen im Wesentlichen denen aus Experiment 2. Es wurden drei Schwierigkeitsstufen (s.u.) und drei Objektanzahlen (vier, sechs und acht Objekte) dargeboten. Aus technischen Gründen waren die Maße jedoch verändert. Der imaginäre Kreis, auf dem die Suchobjekte angeordnet waren, hatte jetzt jedoch einen Durchmesser von 15° visuellem Winkel, der Durchmesser eines Objektes betrug 2,4° und der Abstand zwischen benachbarten Objekten 1,5° visueller Winkel. Die Farbwerte (CIE) der roten Objekte waren $x = 0,601$, $y = 0,365$, $L = 8,0$ cd/m², die des grauen Hintergrundes $x = 0,258$, $y = 0,281$, $L = 14,2$ cd/m². Dabei ist anzumerken, dass die Farbdarstellung des LCD-Projektors über die Bildfläche hinweg nicht ganz homogen war. Die Zielobjekte unterschieden sich von den Ablenkerobjekten in der Ortsfrequenz in drei Schwierigkeitsstufen. Es wurden die Schwierigkeitsstufen 1, 4 und 5 aus Experiment 2 verwendet.

Versuchsablauf

Der Ablauf der einzelnen Durchgänge entsprach dem aus Experiment 2 mit einigen Veränderungen: Zu Beginn jedes Durchganges wurde ein Fixationspunkt in Form eines kleinen, schwarz ausgefüllten Kreises in Bildschirmmitte dargeboten. Er blieb 500 ms lang sichtbar, dann folgte das Suchbild, welches stehen blieb, bis die Versuchsperson eine der Tasten drückte, jedoch maximal 9,5 s²³. Erfolgte in dieser Zeit keine Antwort, wurde das Suchbild vom nächsten Fixationspunkt abgelöst. Erfolgte eine Antwort, wurde das Suchbild von einem andersartigen Fixationspunkt abgelöst (kleiner, schwarz umrandeter, nicht ausgefüllter Kreis), der bis zum Ende der maximalen Antwortzeit stehen blieb. Dadurch betrug die Dauer jedes Durchganges exakt 10 s, so dass die Erhebung der funktionellen Bilder mit den Durchgängen synchronisiert werden konnte: Jeweils zu Beginn eines Durchganges wurde ein Bild aufgenommen und dann im Abstand von 2 s, so dass pro Durchgang fünf Bilder erhoben wurden. In den Durchgängen der Aufgabenbedingung *Suche* waren die Position der Objekte und die Zielreizposition weiterhin randomisiert. In der Bedingung *Vergleich* war die (durch den Fixationspunkt angekündigte) Zielreizposition jedoch jetzt konstant, und nur die Gruppe von Ab-

²¹ TR bedeutet „time to repeat“ und gibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Bildern an. „flip angle“ ist der Winkel, um den das Magnetfeld durch den HF-Puls aus seiner Grundrichtung ausgelenkt wird. TE bedeutet „time to echo“ und gibt die Zeit zwischen HF-Puls und Spin-Echo an.

²² Verbindungslinie zwischen Commissura anterior und Commissura posterior.

²³ Die maximale Suchzeit wurde so gewählt, dass die Versuchspersonen in der Regel ihre Suche in der Zeit abschließen konnten.

lenkerobjekten wurde um diese Position herum randomisiert. Dadurch sollten Augenbewegungen zwischen den Durchgängen verhindert werden, deren Effekte in den reinen Reaktionszeitexperimenten nicht gestört hatten, nun jedoch in den funktionellen Bildern erfasst worden wären. Als weitere Abweichung von den bisherigen Experimenten erhielten die Versuchspersonen keine Rückmeldung mehr über die Richtigkeit ihrer Antwort, um zusätzliche Aktivierungen zu vermeiden.

Wiederum wurden die Durchgänge gleicher Schwierigkeit, Objektanzahl und Aufgabenbedingung zu Blöcken zusammengefasst. Aufgrund der langen Dauer der einzelnen Durchgänge wurden jetzt nur noch zwölf Durchgänge pro Block dargeboten, davon (randomisiert) acht mit und vier ohne Zielreiz. Außerdem wurde die Reihenfolge der Blöcke geändert: Zuerst wurden alle Blöcke mit vier Objekten dargeboten, dann alle mit sechs und dann alle mit acht Objekten. Innerhalb einer Objektanzahl waren die Blöcke in ansteigender Schwierigkeit angeordnet, und innerhalb jeder Schwierigkeitsstufe kam erst der Block mit den Such-, dann der mit den Vergleichsaufgaben. Zwischen zwei Blöcken wurde jeweils eine Pause von 20 s eingeschoben, in der der zweite Fixationspunkt (der offene Kreis) fixiert werden musste. In den Pausen wurden weiterhin alle 2 s funktionelle Bilder erhoben. Die Pausen dienten als Kontrollbedingung, gegen die die Aktivierungsmuster in den Experimentalbedingungen berechnet wurden. Das gesamte Experiment war aufgliedert in drei funktionelle Messreihen. Während einer Messreihe wurden alle Blöcke einer Objektanzahl (also vier, sechs oder acht Objekte) und zusätzlich am Anfang und Ende der Fixationspunkt für jeweils 30 ms dargeboten. Jede Messreihe dauerte 14:40 Minuten. Alle drei Messreihen wurden direkt nacheinander erhoben. Vor Beginn der funktionellen Messreihen wurden außerdem anatomische Bilder aller 14 Schichten gemessen, um diese später mit den Aktivierungsmustern überlagern zu können. Die anatomische Messung dauerte ca. sechs Minuten. In dieser Zeit absolvierten die Versuchspersonen Übungsdurchgänge aller experimentellen Bedingungen. Mit Einweisung und Lagerung der Versuchspersonen dauerte das Experiment ca. eine Stunde.

Das gesamte Experiment wurde zweimal im Abstand von drei Tagen durchgeführt, um eine höhere Anzahl von Durchgängen pro experimenteller Bedingung zu erhalten.

Analyse der Verhaltensdaten

Hier wurden Fehlerraten, Reaktionszeiten und Modellparameter entsprechend der Vorgehensweise in den bisherigen Experimenten berechnet. Es ist jedoch anzumerken, dass (im fehlerfreien Fall) nur noch 16 positive Durchgänge pro experimenteller Bedingung vorlagen, so dass die Ermittlung der Modellparameter als nicht mehr so reliabel wie bisher angesehen werden kann. Aufgrund dieser geringen Zahl von verwertbaren Reaktionszeiten wurde auch auf eine Ausreißerkontrolle im bisherigen Sinne verzichtet. Statt dessen wurden die Reaktionszeitmediane an Stelle der Mittelwerte der Parameterschätzung zugrunde gelegt, da diese weniger ausreißeranfällig sind.

Analyse der BOLD-Daten

Vorverarbeitung der Daten. Als Ergebnis einer fMRT-Messung erhält man eine zeitliche Abfolge von funktionellen Bildern. Jedes einzelne dieser Bilder entspricht einer dreidimensionalen Matrix der momentanen Signalintensitäten. Ziel der Auswertung ist es, in einzelnen Hirnarealen bestimmte zeitliche Verlaufsmuster des BOLD-Kontrast-Signals zu detektieren.

Das gemessene Signal ist jedoch kein perfektes Abbild des BOLD-Effektes, sondern von Rauschen und Artefakten unterschiedlichen Ursprungs überlagert. Die Vorverarbeitung dient dazu, mittels effizienter Signalerkennungstechniken das ursprüngliche BOLD-Signal so weit wie möglich zu restaurieren. Die wesentlichen dabei zu kompensierenden Artefaktquellen sind: Körperbewegungen während der Messung, physiologische Bewegungen (Pulsschlag, Atmung, Schluckbewegungen), Instabilitäten des Spektrometers sowie Systemrauschen aufgrund von thermischem Rauschen und Hardware-Schwankungen. Es stehen verschiedene Korrektur- und Restaurierungsmethoden zur Verfügung, die jedoch alle mehr oder weniger dem Problem unterliegen, dass dabei auch das Ursprungssignal verfälscht wird. Daher wurden im vorliegenden Experiment nur zwei Methoden angewendet: Die Bewegungskorrektur und der räumliche Gaußfilter. Beide wurden mit Hilfe des Softwarepaketes BRIAN (KRUGGEL & LOHMANN 1996) durchgeführt. Bei der Bewegungskorrektur werden die Schichten zu einem bestimmten Zeitpunkt als Referenz genommen und die zeitlich folgenden Schichten an diesen ausgerichtet. Dadurch lassen sich Translationsbewegungen des Körpers innerhalb der Schichten sowie auch Effekte, die durch Pulsation entstehen, korrigieren, nicht jedoch Rotationsbewegungen um die Kopfachsen und Translationsbewegungen entlang der Körperachse. Der räumliche Gaußfilter wurde angewandt (hier mit der Breite $\sigma = 0,5$), um Rauschen im Signal zu beseitigen. Das funktionelle Bild wird dabei in seiner räumlichen Dimension durch eine Faltung mit einem Gaußfilter geglättet. Die Amplitude des Signals wird hierdurch zwar auch verringert, jedoch bleibt seine Verlaufsscharakteristik erhalten.

Die derart vorverarbeiteten Rohdaten wurden anschließend auf einen separat gemessenen, hochaufgelösten anatomischen 3D-Datensatz des jeweiligen Gehirns registriert, um die Ergebnisse der beiden Messtage zusammen auswerten zu können.

Statistische Auswertung. Zunächst wurden die vorverarbeiteten Rohdaten für jede Versuchsperson über die beiden Messtage gemittelt, d.h. aus den Signalen je zweier korrespondierender Zeitpunkte der Mittelwert gebildet. Anschließend wurde für jede Experimentalbedingung geprüft, welche Voxel in den einzelnen Experimentalbedingungen gegenüber der Kontrollbedingung eine signifikant erhöhte Aktivierung zeigten. Dazu wurde der Signalverlauf voxelweise mit einer hypothetischen zeitlichen Verlaufskurve der hämodynamischen Reaktion (BOLD-Kontrast) korreliert, die unter der Annahme erstellt wurde, dass das Voxel in der Experimentalbedingung aktiviert und in der Kontrollbedingung nicht aktiviert ist. Für jede der sechs Experimentalbedingungen (drei Schwierigkeitsstufen \times zwei Aufgabenbedingungen)²⁴ wurde die Korrelationsrechnung separat durchgeführt, wobei für die Kontrollbedingung jeweils die 20 Sekunden Fixation ausgewertet wurden, die unmittelbar auf die jeweilige Experimentalbedingung folgten, sowie die Fixationen zwischen den Durchgängen (vgl. Abbildung 28).

²⁴ Der experimentelle Faktor *Objektanzahl* wurde hier aus Gründen der statistischen Teststärke nicht separat ausgewertet, sondern die fMRT-Daten wurden über alle drei Objektanzahlen aggregiert. Weiterhin wurden Durchgänge mit und ohne Zielreiz nicht voneinander getrennt, da eine Auswertung einzelner Durchgänge nach der Mittelung über die beiden Messtage nicht mehr möglich war.

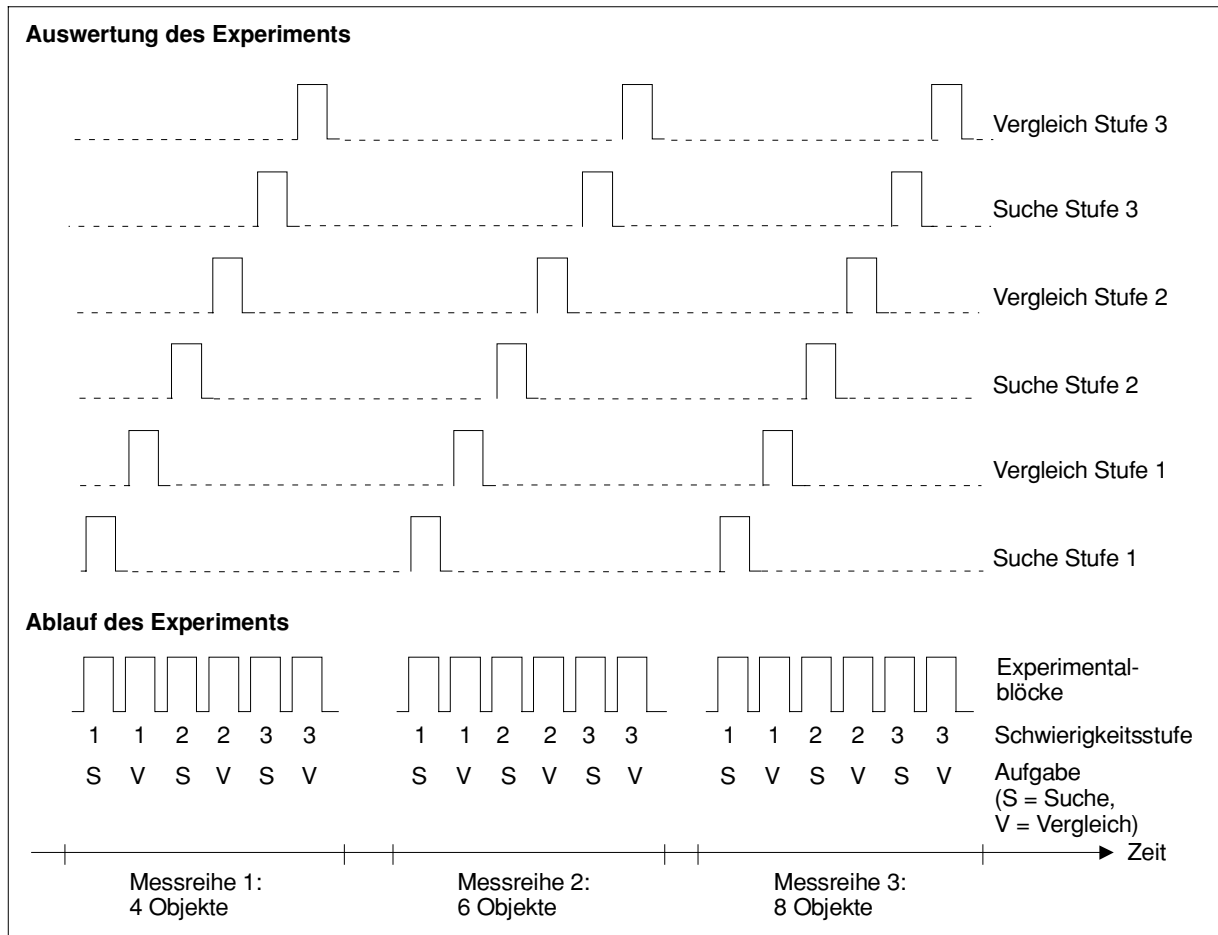


Abbildung 28. Auswertungsschema für die sechs Experimentalbedingungen. Die Rechtecke im oberen Teil (Auswertung des Experiments) bezeichnen für die jeweilige experimentelle Bedingung die Zeitabschnitte, aus denen das BOLD-Signal mit gamma-Kurven korreliert wurde. Daten aus den gepunktet dargestellten Zeitabschnitten wurden bei der Auswertung der jeweiligen Bedingung weggelassen. Im unteren Teil der Abbildung ist der zeitliche Ablauf des Experiments wiedergegeben.

Als hypothetische Kurve wurde die gamma-Funktion

$$h(t) = \frac{(t/\tau)^{(n-1)} \cdot e^{-t/\tau}}{\tau \cdot (n-1)!}$$

mit $\tau = 2,5$ und $n = 3$ verwendet. Die gamma-Kurve entspricht in ihrer Form (vgl. Abbildung 29a) recht gut einer typischen BOLD-Kontrast-Kurve (BOYNTON, ENGEL, GLOVER & HEEGER 1996; AGUIRRE, ZARAHN & D'ESPOSITO 1998). Da das BOLD-Signal ungefähr 2,5 Sekunden nach Beginn der Reizdarbietung ansteigt, wurde die gamma-Kurve um 2,5 Sekunden entlang der t -Achse nach rechts verschoben und der Zeitraum von $t = 0$ bis $t = 2,5$ mit Nullwerten bzw. den Werten der gamma-Kurve des vorherigen Durchgangs aufgefüllt. Weiterhin hängt der Verlauf der hämodynamischen Reaktion von der Dauer der experimentellen Aufgabe ab. Je länger die Reaktionszeit, desto länger bleibt das BOLD-Signal auf hohem Niveau. CLARK, MAISOG & HAXBY (1998) zeigten, dass eine längere Reaktionszeit sich weder auf den Verlauf von Anstieg und Abfall der Kurve noch auf deren absolute Höhe auswirkten, sondern dass die Kurve lediglich länger auf konstant hohem Niveau blieb. Die in Abbildung 29b angegebene gamma-Kurve entspricht dabei ungefähr dem Verlauf des hämodynamischen Signals bei einer Reaktionszeit von 500 ms. Zur Modellierung unterschiedlich langer Reaktionszeiten in den

einzelnen experimentellen Bedingungen wurden die in Abbildung 29b dargestellten „modifizierten gamma-Kurven“ $h^*(t)$ verwendet mit

$$h^*(t) = \begin{cases} h(t) & \text{für } t \leq 5 \\ 1 & \text{für } 5 < t < 5 + (RT - 0,5) \\ h(t - (RT - 0,5)) & \text{für } t \geq 5 + (RT - 0,5) \end{cases}$$

RT bezeichnet dabei die mittlere Reaktionszeit der Versuchsperson in der betreffenden Bedingung in Sekunden.

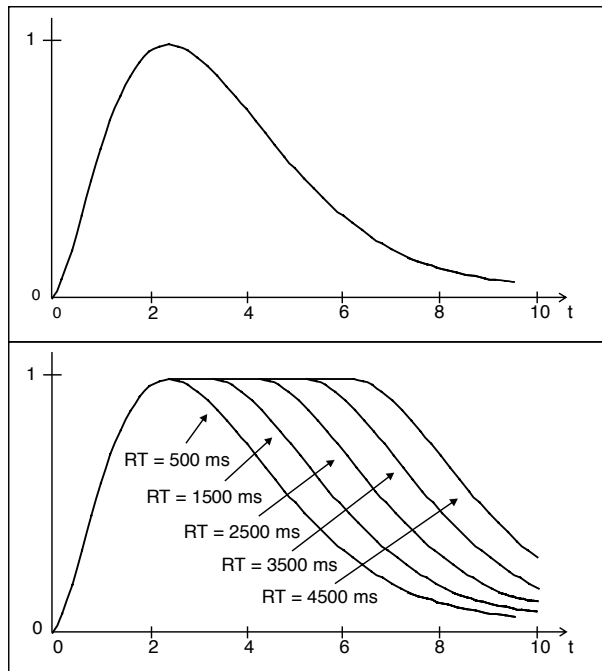


Abbildung 29. Verlauf der gamma-Kurve (a.) sowie der „modifizierten gamma-Kurven“ (b.)

Die Korrelationskoeffizienten wurden nach Fisher Z-transformiert und mit Hilfe der Normalverteilung gegen die Nullhypothese $Z = 0$ (d.h. $\rho = 0$) getestet. Um den α -Fehler für die große Anzahl von Voxeln zu korrigieren, wurde als Schwellenwert für die Ablehnung der Nullhypothese $z = 3$ gewählt (was einem α -Fehler von $p = 0,001$ entspricht). Alle Voxel, für die ein z -Wert von $z > 3$ errechnet wurde, wurden als *aktiviert* in der betreffenden experimentellen Bedingung bezeichnet. Die Z-Transformation dient vor allem dazu, ein intervallskaliertes Maß für die Höhe des Zusammenhangs zwischen BOLD- und gamma-Kurve, d.h. für die Aktivierung, zu erhalten. Die Teststatistik z ²⁵, die proportional zu Z ist, ist daher ein intervallskaliertes Maß für die Güte der Anpassung des BOLD-Signals an die theoretische Kurve und somit geeignet, die in den einzelnen Bedingungen aktivierten Hirngebiete zu ermitteln. Sie macht jedoch keine Aussage über die *Stärke* der Aktivierung, die mit den Modellparametern quantitativ in Beziehung gesetzt werden soll. Hierfür kommen mehrere Maße in Frage, die alle mehr oder weniger mit methodischen Problemen behaftet sind. Das gebräuchlichste Maß

²⁵ $z = \frac{Z}{\sqrt{\frac{1}{n-3}}}$, n = Anzahl der ausgewerteten Datenpunkte

ist die Änderung des BOLD-Signals (in %) in der Experimental- gegenüber der Kontrollbedingung. Hier stellt sich jedoch das Problem, welche zeitlichen und räumlichen Datenpunkte für einen Vergleich verschiedener Experimentalbedingungen auszuwählen sind. Vorauswertungen haben gezeigt, dass das Maß insbesondere gegenüber nur geringen räumlichen Abweichungen nicht sehr robust ist²⁶. Ein größeres, dafür aber robusteres Maß für die Aktivierungsstärke ist ihre räumliche Ausdehnung, d.h. die Anzahl aktivierter Voxel in einer anatomischen Struktur. Es wurde aus folgenden Gründen hier für die quantitative Auswertung herangezogen: Bei nur drei realisierten Schwierigkeitsstufen der Suche muss das Maß vor allem artefaktfrei sein, um eine Zusammenhangsanalyse mit den Modellparametern zu ermöglichen. Im Skalenniveau erscheint eine Ordinalskala ausreichend.

8.3.2 Hypothesen

Das Reaktionszeitmodell beschreibt die Aufgabenbedingungen *Suche* und *Vergleich* mit folgenden Gleichungen (siehe Kapitel 4 und 5):

$$\text{Suche:} \quad E(RT_s) = g(f_s) \cdot p_s + h(f_s) \cdot x + c \quad (*)$$

$$\text{Vergleich:} \quad RT_s(\text{vergl}) = p_s + c \quad (*v)$$

Hierbei gibt p_s die Aufmerksamkeitsverweildauer (bzw. Fixationsdauer) in Schwierigkeitsstufe s an und x die Aufmerksamkeitsverlagerungsdauer (bzw. Sakkadendauer). $g(f_s)$ und $h(f_s)$ geben die Anzahl der entsprechenden Schritte an. Diese Anzahlen sind Funktionen der Fokusgröße f_s . c ist die Zeit, die alle übrigen Prozesse benötigen. $E(RT_s)$ ist der Erwartungswert der Reaktionszeit in Stufe s über alle Objektanzahlen, Zielreizpositionen und Positionen des Suchbeginns.

Die dargebotenen visuellen Suchaufgaben enthalten entsprechend den Modellannahmen folgende kognitive Teilprozesse²⁷:

²⁶ Es werden in der Regel aus jeder interessierenden anatomischen Struktur die Voxel mit den höchsten z-Werten zur quantitativen Auswertung ausgewählt. Geringe Unterschiede in den z-Werten aufgrund von Schwankungen des Grundsignals können zu geringen räumlichen Abweichungen in der Auswahl führen, die mit großen Unterschieden in der Signalhöhe verbunden sein können. Eine andere Methode ist der bedingte Vergleich: Es werden für alle Experimentalbedingungen dieselben Voxel ausgewählt, und zwar aufgrund ihrer z-Werte in einer der Bedingungen. Hier stellt sich die Frage, welche Bedingung man zur Grundlage der Auswertung machen soll. Darüber hinaus sind auch hier Artefakte aufgrund des erstgenannten Problems nicht ausgeschlossen.

²⁷ Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vermutlich sind auch Prozesse des räumlich-visuellen Arbeitsgedächtnisses (für die bereits abgesuchten Positionen) und des visuellen Gedächtnisses (für das Aussehen des Zielobjektes) beteiligt. Das „Betätigen der Antworttaste“ kann in weitere Teilprozesse zerlegt werden, wie Handlungsauswahl, Handlungsvorbereitung usw. Da mit dieser Studie jedoch weder Gedächtnisprozesse noch motorische Handlungen untersucht werden sollen, werden über diese Prozesse hier keine speziellen Hypothesen formuliert. Bei der Interpretation der Aktivierungen sind sie allerdings zu berücksichtigen.

- (1) Einstellung des Aufmerksamkeitsfokus auf eine optimale Größe. Die optimale Größe hängt von der Reichweite der Aufmerksamkeit ab (nur bei *Suche*, bei *Vergleich* beträgt die optimale Größe ein Objekt),
- (2) Bewegung des Aufmerksamkeitsfokus über das Suchbild, vermutlich gekoppelt mit Augenbewegungen (nur bei *Suche*),
- (3) Vergleich der Objekte im Fokus mit den Nachbarobjekten (oder einer mentalen „Zielreiz-Schablone“),
- (4) Entscheidung, die Suche zu stoppen oder fortzuführen,
- (5) Betätigen der Antworttaste

Die Größeneinstellung des Aufmerksamkeitsfokus sowie der Objektvergleich im Fokus beruht auf folgenden Prozessen („präattentive Stufe“ in *Guided Search*):

- (i) Aufmerksamkeitseinfluss auf die Merkmalsdiskriminierung (Top-Down-Kontrolle der Bandbreite derjenigen sensorischen Kanäle, die am Besten zwischen Zielreiz und Ablenkern differenzieren) und auf die Gewichtung der *Merkmalskarten*,
- (ii) Berechnung der *Merkmalskarten*,
- (iii) Kombination der *Merkmalskarten* zu einer *Aktivierungskarte*. Aus dieser ergibt sich die Reichweite der Aufmerksamkeit.

Tabelle 16 gibt die neuroanatomischen Gebiete an, in denen aufgrund obiger Überlegungen (vgl. Literaturüberblick, Abschnitt 8.2) eine Aktivierung im Zusammenhang mit den einzelnen Teilprozessen zu erwarten ist. In der dritten Spalte der Tabelle sind die Hypothesen für das fMRT-Experiment aufgeführt, d.h. die erwarteten Relationen der Aktivierungsstärke im jeweiligen anatomischen Gebiet zu den Modellparametern.

Anatomisches Areal	Teilprozesse	Erwarteter Zusammenhang zwischen Aufgabe bzw. Parameterwerten und Aktivierung
Frontales Augenfeld (FEF, am Zusammenfluss von Sulcus präcentralis und Sulcus frontalis superior)	(2)	
Supplementärmotorisches Areal (SMA, im dorsomedialen frontalen Kortex)	(2) (5)	
Gyrus cinguli anterior	(3) (4)	
Dorsolateraler präfrontaler Kortex (Gyrus frontalis medius)	(3) (4) (i)	
Motorkortex, linke Hemisphäre (im Gyrus präcentralis)	(5)	
Sulcus intraparietalis } Vermutlich verschiedene Segmente	(2)	
Sulcus intraparietalis	(i)	
Striäre und extrastriäre visuelle Areale (Area striata, Gyrus fusiformis, Sulcus collateralis, Gyrus lingualis, Gyrus occipitalis, Sulcus temporalis)	(i) (ii)	
Thalamus	(2) und/oder (1)	

Tabelle 16. Hypothesen für das fMRT-Experiment: Beteiligte Hirngebiete, Involvierung in einzelne Teilprozesse und erwarteter Zusammenhang ihrer Aktivierung mit den Modellparametern. Hierbei ist angegeben, welche(r) Parameter jeweils mit welchem Aktivierungsanstieg in Zusammenhang stehen sollen.

Ob die postulierten Zusammenhänge linear oder nur monoton sind, soll hier offen gelassen werden. Eine strenge Linearität ist eher unwahrscheinlich, müssten hierfür doch nicht nur das

lineare Zusammenhangsmodell zwischen neuronaler Feuerungsrate und BOLD-Signal gelten (vgl. Abschnitt 8.1.3), sondern auch ein linearer Zusammenhang zwischen Verhaltensparametern und der Feuerungsrate der Neuronen.

Es finden sich im Prinzip zwei unterschiedliche Muster von erwarteten Zusammenhängen: Hirngebiete, die an der *Zielreizerkennung* beteiligt sind, sollten sowohl in der Vergleichsaufgabe als auch in der Suchaufgabe einen Aktivierungsanstieg mit ansteigender Schwierigkeit zeigen. Der Anstieg in der Vergleichsaufgabe sollte mit der Aufmerksamkeitsverweildauer p_s in Beziehung stehen, der Anstieg in der Suchaufgabe mit dem Produkt aus Verweildauer und Anzahl der Verweilschritte $p_s \cdot g(f_s)$. Hirngebiete, die an der *Verlagerung* des Aufmerksamkeitsfokus beteiligt sind, sollten in der Vergleichsaufgabe keinen Aktivierungsanstieg zeigen, in der Suchaufgabe einen mit der Anzahl der Verweilschritte $h(f_s)$ zusammenhängenden Anstieg.

Für den Teilprozess (1) (Einstellung der Größe des Aufmerksamkeitsfokus) lassen sich keine neuroanatomischen Hypothesen aufstellen, da dieser Prozess bisher kaum untersucht wurde. Einige Arbeiten (z.B. FINK u.a. 1996; MARTINEZ u.a. 1997) deuten darauf hin, dass sich Lateralisierungseffekte des okzipitalen Kortex in Bezug auf die Fokusgröße zeigen könnten: Bei kleinem Fokus soll die Aktivierung links, bei großem hingegen rechts akzentuiert sein. Andere Arbeiten bezweifeln dies jedoch (z. B. HEINZE u.a. 1998). So soll dieser Punkt zunächst offen gelassen und erst in der Diskussion wieder aufgegriffen werden.

8.3.3 Ergebnisse

Verhaltensdaten

Fehlerraten. Die Fehlerraten der fünf ausgewerteten Versuchspersonen lagen zwischen 1,6 % und 10,4 %. Tabelle 17 gibt diese Raten für die einzelnen Schwierigkeitsstufen und Versuchspersonen wieder.

Die Fehlerraten weisen große interindividuelle Unterschiede auf und liegen teilweise deutlich höher als bei dem zuvor durchgeführten Übungsdurchgang im Labor. Dies ist vermutlich auf unterschiedlich gute Sichtbedingungen im MR-Scanner (z.B. durch den Sitz der Spiegelbrille) zurückzuführen. Da die Rate der falschen Alarme bei allen recht niedrig lag, wurde jedoch keine Versuchsperson von der weiteren Auswertung ausgeschlossen (vgl. Abschnitt 4.3.2.).

Schwierigkeit	1	2	3
Auslassungen (Vorhandenes Zielobjekt nicht gefunden)			
CG	0,0	0,0	4,2
DR	0,0	7,3	17,7
EM	2,1	9,4	32,3
KH	2,1	7,3	11,5
OH	0,0	12,5	2,1
Falsche Alarmer (Zielobjekt gefunden, obwohl nicht vorhanden)			
CG	0,0	1,0	4,2
DR	0,0	2,1	6,3
EM	0,0	2,1	4,2
KH	0,0	2,1	4,2
OH	0,0	2,1	0,0

Tabelle 17. Fehlerraten der fünf ausgewerteten Versuchspersonen in den drei Schwierigkeitsstufen

Reaktionszeiten. Die folgende Abbildung 30 gibt die Reaktionszeiten der positiven Durchgänge für die einzelnen Versuchspersonen wieder. Auch hier traten ähnliche Unterschiede wie in den Fehlerraten auf, was die oben angeführte Erklärung stützt. Das angestrebte Kontinuum zwischen Pop-Out-Suche und serieller Suche zeigte sich bei allen Versuchspersonen. Für Versuchsperson OH scheint dabei Schwierigkeitsstufe 3 einfacher gewesen zu sein als Schwierigkeitsstufe 2, was auch an den Fehlerraten zu erkennen ist. Möglicherweise ist dies auf einen Übungseffekt zurückzuführen, der in diesem Experiment nicht durch Vertauschung der Reihenfolge kontrolliert worden war.

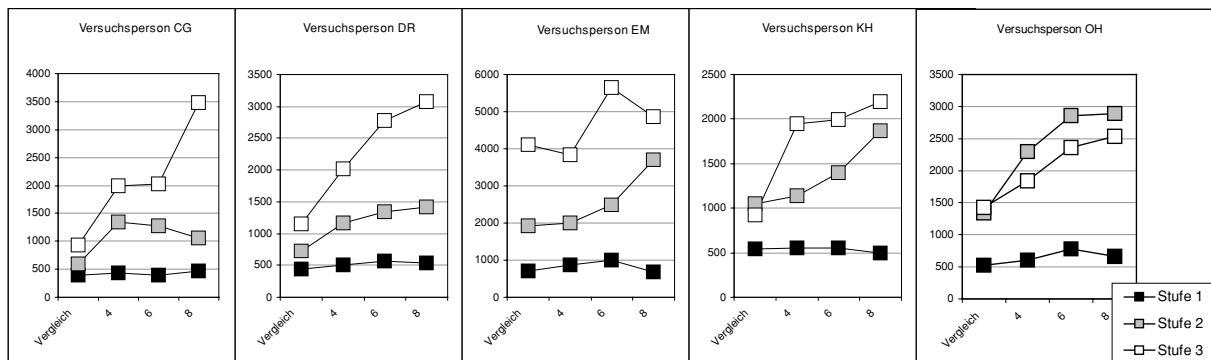


Abbildung 30. Reaktionszeiten (Mediane der positiven Durchgänge) in den drei Schwierigkeitsstufen für die fünf Versuchspersonen im fMRT-Experiment.

Modellparameter. Tabelle 18 gibt eine zusammenfassende Darstellung der geschätzten Werte für die Modellparameter. Die Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ wurde dabei als Produkt der geschätzten Werte d_s und l_n berechnet. Aus diesem Wert wurde dann für jede Schwierigkeitsstufe und jede Objektanzahl die Fokusgröße (Anzahl von Objekten im Fokus) $f_{s,n}$ sowie die Anzahl von Suchschritten $g(f_{s,n})$ bzw. $h(f_{s,n})$ berechnet, um diese Werte mit den fMRT-Aktivierungen in Beziehung setzen zu können. Da in der folgenden fMRT-Auswertung

die Aktivierungen über die drei Objektanzahlen n gemittelt werden sollen, wurden entsprechend auch f_s , $g(f_s)$ und $h(f_s)$ als Mittelwerte über die drei Objektanzahlen bestimmt.

Versuchsperson	CG			DR			EM			KH			OH		
Schwierigkeit	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f_s Fokusgröße [Anzahl Objekte]	8	1,5	1	8	2,9	1,7	8	3	5,6	6	2	2,5	5,4	2,2	2,2
$h(f_s)$ [Anzahl Verlagerungsschritte]	1	3,5	4,5	1	2,5	3,2	1	2,7	2,1	2	3	2,7	2,1	2,8	2,9
$g(f_s)$ [Anzahl Verweilschritte]	1	2,5	3,5	1	1,5	2,2	1	1,7	1,1	1	2	1,7	1,1	1,8	1,9
p_s Verweildauer [ms]	51	293	628	175	467	866	506	1483	3954	254	556	948	211	1159	938
c Konstante Zeit [ms]	325			271			288			248			329		
x Verlager.-dauer [ms]	39			93			129			77			64		

Tabelle 18. Geschätzte Werte der Modellparameter für die fünf Versuchspersonen in den drei Schwierigkeitsstufen. Die Fokusgröße und damit die Anzahl der Verlagerungs- und Verweilschritte wurde jeweils über die drei Objektanzahlen gemittelt.

Interessant erscheint, dass bei einigen Versuchspersonen (EM und KH) der Fokus in Schwierigkeitsstufe 3 größer war und damit weniger Schritte gemacht wurden als in Stufe 2, die Fixationsdauer jedoch in Stufe 3 länger war als in Stufe 2. Obwohl die Suche also subjektiv schwieriger war, wurde effektiver gesucht. Bei der Versuchsperson OH war das Muster umgekehrt: Sie benötigte in Stufe 2 eine längere Fixationsdauer als in Stufe 3, die Fokusgröße war jedoch nahezu gleich. Gerade diese unerwarteten Besonderheiten können bei einem Vergleich mit den Aktivierungsmustern möglicherweise Aufschluss geben, welches Hirngebiet mit welchem Parameter und welchen Teilprozessen in Zusammenhang steht.

BOLD-Signal-Daten

Abbildung 31 stellt die signifikanten ($z > 3$) Aktivierungen in der experimentellen Bedingung „Schwierigkeitsstufe 3, Suche“ im Gehirn der Versuchsperson KH dar. Die Beschriftung der Areale erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit: Es wurden nur solche Areale markiert, über die Hypothesen vorlagen oder die bei mehr als der Hälfte der Versuchspersonen aktiviert waren.

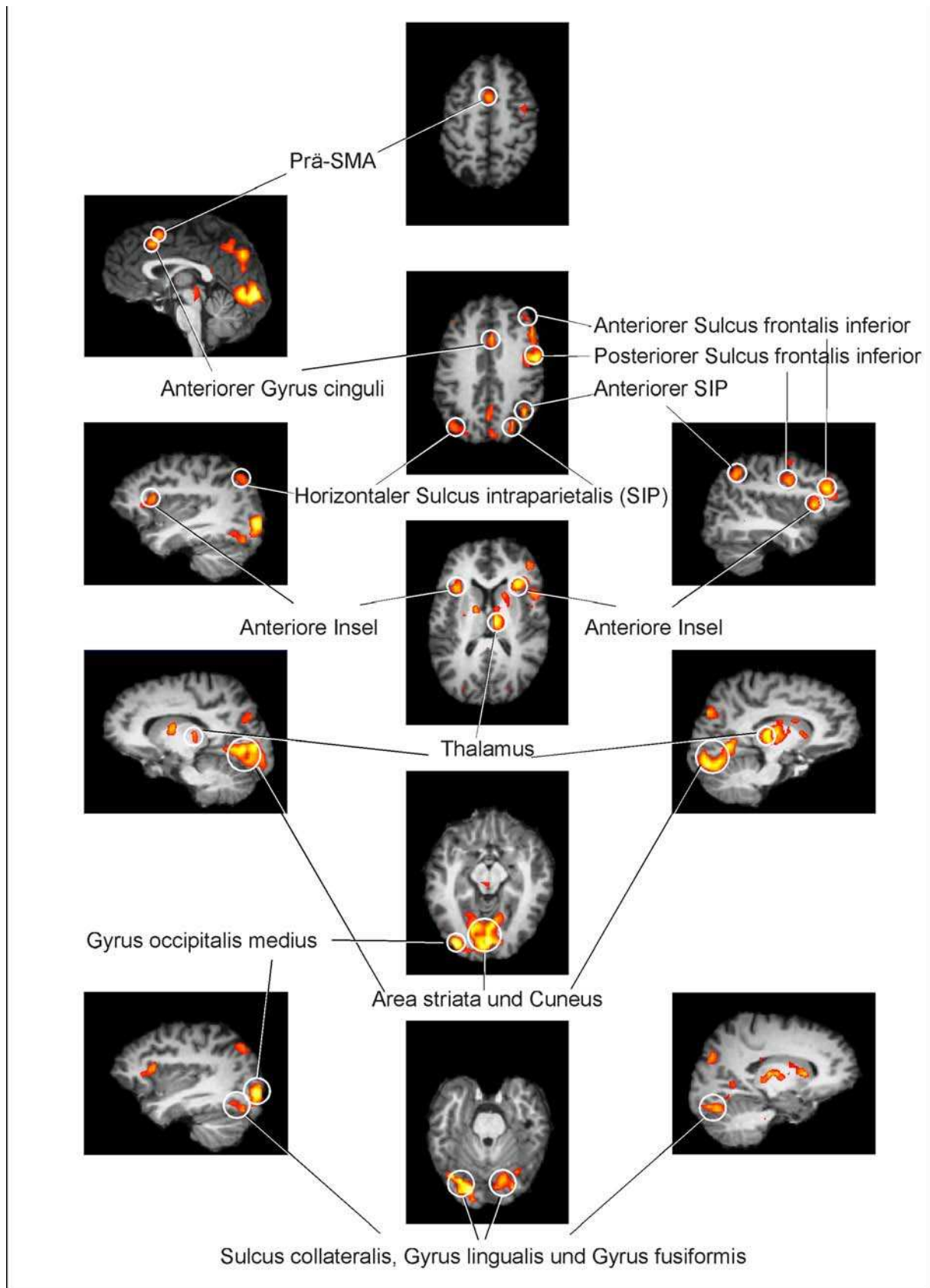


Abbildung 31. Signifikante Aktivierungen in der Bedingung *Suche*, *Schwierigkeitsstufe 3* bei Versuchsperson KH

Entgegen den Hypothesen waren im frontalen Augenfeld keine signifikanten Aktivierungen zu beobachten. Im dorsolateralen präfrontalen Kortex war die Aktivierung rechts lateralisiert. Sie erstreckte sich entlang des Sulcus frontalis inferior, und lag dort wie erwartet vorwiegend im Gyrus frontalis medius. Interessanterweise sind hier zwei Aktivierungsherde zu erkennen, einer im Bereich des anterioren und einer im Bereich des posterioren Teils des Sulcus frontalis inferior. Sowohl im Gyrus cinguli anterior als im Prä-SMA waren Aktivierungen zu erkennen, nicht jedoch im SMA und ebenso wenig im linken Motorkortex (M_1). Es fällt auf, dass alle Gebiete, die mit Bewegungshandlungen assoziiert werden, entgegen den Hypothesen keine Aktivierung erkennen ließen. Die in Bezug auf Aufmerksamkeit erwarteten Gebiete, nämlich der Sulcus intraparietalis (SIP) und die visuellen Areale, waren hingegen deutlich aktiviert. Im SIP zeigten sich tatsächlich wie erwartet zwei unterschiedliche Segmente, nämlich ein anteriores Segment rechts und ein posteriores bilateral. Bei den visuellen Arealen liegt ein Aktivierungszentrum im Bereich der Area striata, welches sich weiträumig über den Cuneus erstreckt. Ein weiteres ist bilateral im okzipitotemporalen Kortex (um den Sulcus collateralis sowie im Gyrus lingualis und Gyrus fusiformis) zu erkennen. Es wird im Folgenden in Anlehnung an MALACH u.a. (1995) „*LO-Komplex*“ (lateral okzipital) genannt. Als drittes visuelles Gebiet ist der linke Gyrus occipitalis medius (O_2) stark aktiviert, der allerdings in der weiteren Auswertung nicht gesondert beachtet werden soll. Neben den erwarteten Arealen fiel besonders die beidseitige starke Aktivierung der anterioren Insel auf. Sie soll daher in die weitere Auswertung einbezogen werden. Subkortikal zeigte durchgängig der Thalamus eine rechtsakzentuierte Aktivierung, außerdem traten meist Aktivierungen des Putamen und Nucleus caudatus auf, die aber im Folgenden nicht weiter besprochen werden sollen. Im Thalamus stellt sich das Problem, dass bei den einzelnen Versuchspersonen teilweise mehrere Aktivierungsherde zu finden waren. Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, sie alle im Einzelnen zu analysieren, so dass eine Zusammenhangsanalyse von Modellparametern und Aktivierungsstärke für den Thalamus hier entfallen muss.

Tabelle 19 gibt für die sechs Experimentalbedingungen an, bei wie vielen der fünf Versuchspersonen die einzelnen Hirngebiete signifikante ($z > 3$) Aktivierungen aufwiesen. Neben den Arealen, in denen Aktivierung erwartet worden war, sind solche Areale aufgeführt, die in mindestens einer Experimentalbedingung bei der Mehrzahl der Versuchspersonen aktiviert waren.

Areal		Suche in Stufe...			Vergleich in Stufe...		
		1	2	3	1	2	3
Frontal	Prä-SMA (1, 12, 51)	0	4	5	0	3	1
	Gyrus cinguli anterior (1, 20, 39)	1	4	4	1	3	2
	Anteriorer Sulcus frontalis inferior (32, 39, 18)	0	3 R	4 R	0	1 R	1 R
	Posteriorer Sulcus frontalis inferior (40, 6, 30)	0	5 R	4 R	0	1 R	2 R
	Anteriore Insel R: (28, 18, 11), L: (-32, 17, 12)	0	4 R 2 L	5 R 1 L	0	2 R	3 R
Parietal	Anteriorer Sulcus intraparietalis R: (31, -46, 56), L: (-38, -44, 51)	3 R 1 L	4 R 4 L	5 R 4 L	3 R 3 L	3 R 2 L	3 R 3 L
	Horizontaler Sulcus intraparietalis R: (24, -63, 53), L: (-27, -65, 50)	0	5 R 4 L	5 R 5 L	0	2 R 2 L	2 R 1 L
Okzipito-temporal	Area striata (V1) (-2, -80, 26)	5 B	5 B	5 B	1 B	2 B	3 B
	mit Cuneus-Beteiligung	5 B	5 B	5 B	0	0	1 B
	„LO-Komplex“ (Sulcus collateralis, Gyrus lingualis und Gyrus fusiformis) R: (23, -73, -3), L: (-33, -77, -5)	5 R 4 L	5 R 5 L	5 R 5 L	2 R 3 L	5 L 5 R	5 L 5 R
Subkortikal	Thalamus	2 R 1 L	1 R 2 L	3 R 2 L	4 R 2 L	4 R 3 L	3 L 3 R

Tabelle 19. Anzahl der Versuchspersonen, die eine signifikante ($z > 3$) Aktivierung in den einzelnen Hirngebieten und den sechs experimentellen Bedingungen zeigten. Angegeben sind für die aktivierten Hirngebiete auch die mittleren ($n = 5$ Versuchspersonen) Talairach-Koordinaten.

Zusammenhänge zwischen Modellparametern und BOLD-Signal

Für die im vorigen Abschnitt ausgewählten Hirngebiete wurde die Aktivierungsstärke mit den geschätzten Modellparametern in Beziehung gesetzt. Insbesondere waren Zusammenhänge erwartet worden mit der Verweildauer p_s , der Verweildauer multipliziert mit der Anzahl von Verweilschritten $p_s \cdot g(f_s)$, sowie der Anzahl von Verlagerungsschritten $h(f_s)$. In Abbildung 32 ist am Beispiel der Versuchsperson KH für jedes ausgewählte Hirngebiet der Verlauf dieser drei Parameter sowie die Aktivierungsstärke in den Aufgabenbedingungen Suche und Vergleich dargestellt. Die Darstellung erlaubt einen Vergleich zu den in Abschnitt 8.3.2 formulierten Hypothesen und eine Entscheidung, ob das jeweilige Hirngebiet eher an der Verlagerung des Aufmerksamkeitsfokus (räumliche Aufmerksamkeit) oder an der Prüfung der Objekte (Merkmalsaufmerksamkeit) beteiligt ist, oder ob es überhaupt nicht durch Aufmerksamkeit moduliert wird. Für Areale, die zumindest bei einigen der Versuchspersonen bilaterale Aktivierungen zeigten, erfolgt die Darstellung zunächst separat nach linker und rechter Hemisphäre und anschließend (dritte Spalte) in einer Zusammenschau, wobei jeweils das Maximum der Aktivierungen der linken und rechten Hemisphäre abgetragen ist.

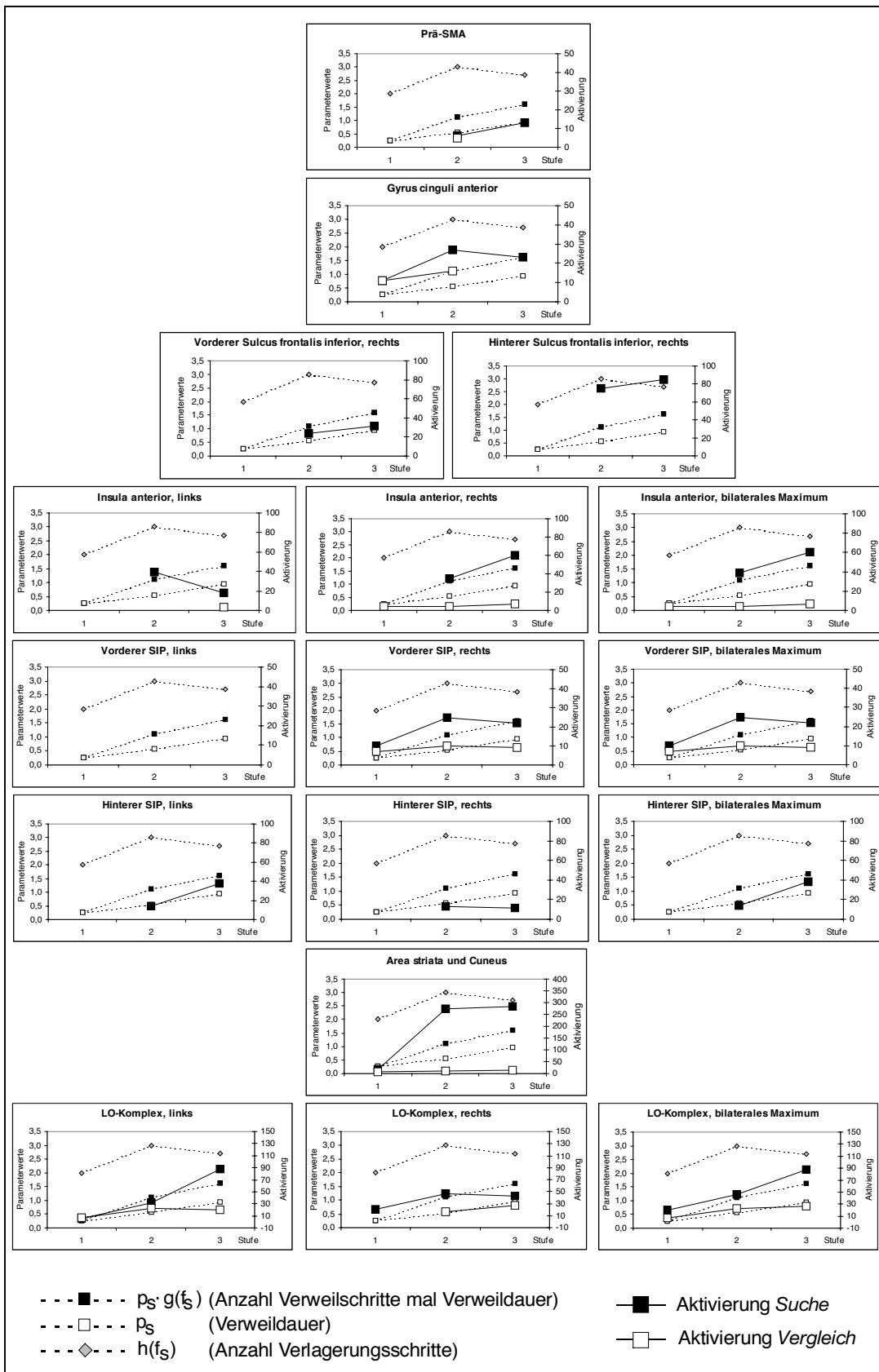


Abbildung 32 . Zusammenhang zwischen Modellparametern und Aktivierungen in ausgewählten Hirngebieten. Die Modellparameter p_s sowie $p_s \cdot g(f_s)$ sind in Sekunden angegeben, um die Darstellung in einem Maßstab zu ermöglichen. Die Aktivierungsstärke ist als Anzahl signifikant aktivierter Voxel angegeben. Fehlende Datenpunkte bedeuten, dass in der entsprechenden Bedingung keine signifikante Aktivierung gemessen wurde.

Das Vorliegen eines Zusammenhangs zwischen Parametern und Aktivierungen wurde genau dann bejaht, wenn die entsprechende Rangkorrelation über die drei Schwierigkeitsstufen sowohl für die Bedingung *Suche* als auch für die Bedingung *Vergleich* perfekt war²⁸. Tabelle 20 gibt eine Übersicht über alle untersuchten Zusammenhänge bei allen Versuchspersonen.

Versuchsperson		CG		DR		EM		KH		OH		Bewertung
Areal	Parameter	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	
Prä-SMA	$p_s \cdot g(f_s)$ ²⁹	+		o		-		+		+		Eher $p_s \cdot g(f_s)$, nicht ganz ein- deutig
	$h(f_s)$	+		o		-		-		-		
Gyrus cinguli anterior	$p_s \cdot g(f_s)$	-		o		o		o		-		Vermutlich $h(f_s)$
	$h(f_s)$	+		o		o		o		+		
Anteriorer Sulcus frontalis inferior rechts	$p_s \cdot g(f_s)$	o		o		-		+		-		Eher $h(f_s)$, nicht ganz eindeutig
	$h(f_s)$	o		o		+		-		+		
Posteriorer Sulcus frontalis inferior rechts	$p_s \cdot g(f_s)$	+		+		+		+		+		$p_s \cdot g(f_s)$
	$h(f_s)$	-		+		+		-		-		
Anteriore Insel	$p_s \cdot g(f_s)$	+	o	+	-	-	+	-	+	o	+	$p_s \cdot g(f_s)$ bei bilateraler Betrachtung (Lateralisie- rungseffekt)
		+		+		+		+		+		
	$h(f_s)$	+	o	+	-	+	-	+	-	o	-	
		+		+		-		-		-		
Anteriorer SIP	$p_s \cdot g(f_s)$	+	o	o	o	-	o	o	-	o	-	Vermutlich $h(f_s)$
		+		o		-		-		-		
	$h(f_s)$	+	o	o	o	+	o	o	+	o	+	
		+		o		+		+		+		
Horizontaler SIP	$p_s \cdot g(f_s)$	o	+	+	+	+	+	+	-	+	-	$p_s \cdot g(f_s)$ bei bilateraler Betrachtung (Lateralisie- rungseffekt)
		+		+		+		+		+		
	$h(f_s)$	o	+	-	+	-	-	-	+	-	+	
		+		-		-		-		-		
Cuneus mit Area striata	$p_s \cdot g(f_s)$	+		+		+		+		-		Eher $p_s \cdot g(f_s)$, nicht ganz ein- deutig
	$h(f_s)$	-		-		-		-		-		
LO-Komplex	$p_s \cdot g(f_s)$	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+	$p_s \cdot g(f_s)$ bei bilateraler Betrachtung (Lateralisie- rungseffekt)
		+		+		+		+		+		
	$h(f_s)$	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	
		+		-		-		-		-	+	

Tabelle 20. Überblick über Zusammenhänge zwischen Modellparametern und Aktivierungen in den ausgewählten Hirnregionen für alle fünf Versuchspersonen. Ein Plus bedeutet, der Zusammenhang lag vor (im Sinne einer Rangkorrelation), ein Minus bedeutet, er wurde widerlegt, und bei einem Kreis war die Datenbasis zu gering, um die Frage zu entscheiden (nur eine oder keine signifikante Aktivierung).

²⁸ Bei einem vollständigen Datensatz (sechs signifikante Aktivierungen) beträgt die Zufallswahrscheinlichkeit für eine perfekte Rangkorrelation $p = 1/6! = 0,0014$. Sie wird um so größer, je mehr Datenpunkte fehlen, und beträgt bei nur zwei signifikanten Aktivierungen $p = 0,5$.

²⁹ D.h. $p_s \cdot g(f_s)$ (Verweildauer mal Anzahl der Verweilschritte) in der Bedingung *Suche* und p_s (Verweildauer) in der Bedingung *Vergleich*.

Einen eindeutigen Zusammenhang mit der Verweildauer p_s (und damit der subjektiven Diskriminationsschwierigkeit), nicht jedoch mit der Anzahl der Verlagerungen, zeigte der posteriore Sulcus frontalis inferior rechts, die anteriore Insel, der horizontale SIP sowie der LO-Komplex (extrastriäre visuelle Areale). Dabei ist bei den drei letztgenannten Arealen bei einigen Versuchspersonen ein interessanter Lateralisierungseffekt zu beobachten: Mit zunehmender Diskriminationsschwierigkeit sinkt die Aktivierung rechts, während sie links steigt. Der monotone Zusammenhang mit den Parameterwerten ergibt sich hier erst aus der gemeinsamen Auswertung beider Hemisphären, indem man in jeder Schwierigkeitsstufe die größere der beiden Aktivierungen heranzieht. Für das Prä-SMA, den Gyrus cinguli anterior, den anterioren Sulcus frontalis inferior, den anterioren SIP und den Cuneus liefern die Versuchspersonen zum Teil widersprüchliche Ergebnisse. Die Aktivierungen im Gyrus cinguli anterior, im anterioren Sulcus frontalis inferior und im anterioren SIP korrelieren möglicherweise mit der Anzahl der Verlagerungsschritte, die Datenbasis war jedoch zu gering für eine sichere Aussage. Insbesondere im anterioren Sulcus frontalis inferior wiesen die Talairach-Koordinaten auch eine recht große Streuung auf (24-36, 35-49, 15-19). Es könnte sich also auch um verschiedene Aktivierungsherde mit unterschiedlichen Funktionen handeln. Der Cuneus mit der Area striata war das im gesamten Experiment am stärksten aktivierte Gebiet. Die Aktivierungsstärke korrelierte in der Suchaufgabe mit $p_s \cdot g(f_s)$, jedoch in der Vergleichsaufgabe nicht immer mit p_s , wie dies für Areale, die mit der Merkmalsaufmerksamkeit in Zusammenhang stehen, erwartet worden war. Ursache ist vermutlich eine differentielle Beteiligung funktionell unterschiedlicher Areale: Bei vier der fünf Versuchspersonen war der Cuneus (das Gebiet oberhalb der Area striata) nur in der Suchaufgabe aktiviert, während sich in der Vergleichsaufgabe die Aktivierung auf den Bereich der Area striata beschränkte. Letztere zeigt eher eine Korrelation mit der Anzahl der Verlagerungsschritte $h(f_s)$ als mit der Verweildauer p_s , welche mit der Änderung des retinalen Bildes bei Blickbewegungen zusammenhängen könnte.

8.4 Diskussion

Die meisten der eingangs formulierten Hypothesen konnten bestätigt werden. Allerdings zeigten das frontale Augenfeld und der linke motorische Kortex (M_1) überhaupt keine signifikante Aktivierung. Wie in Abschnitt 8.1.3 bereits erwähnt, kann das Ausbleiben einer Aktivierung zwei mögliche Ursachen haben: Das Gebiet ist entweder sowohl in der Experimental- als auch der Kontrollbedingung aktiv, oder in keiner von beiden. Ersteres erscheint hier allerdings nicht sehr plausibel, insbesondere nicht für den motorischen Kortex. Das frontale Augenfeld (FEF) könnte beim Fixieren des Fixationspunktes in der Kontrollbedingung beansprucht sein, jedoch haben eine Reihe von Arbeiten eine Aktivierung des FEF bei Sakkaden gegenüber Fixation zeigen können (z.B. PAUS 1996; LUNA U.A. 1998; CORBETTA u.a.1998). Die Gebiete sind also vermutlich in keiner der beiden Bedingungen aktiv, wofür es wiederum zwei alternative Erklärungen gibt: Sie sind tatsächlich nicht aktiv, oder die Aktivierungsstärke hat das Signifikanzniveau verfehlt. Für das FEF wird diskutiert, ob das dem Affengehirn entsprechende Gebiet am Zusammenfluss von Sulcus präcentralis und Sulcus frontalis superior tatsächlich auch beim Menschen in Augenbewegungen involviert ist, oder ob es eher mit räumlichem Arbeitsgedächtnis in Zusammenhang zu bringen ist. Dann müsste in den Arbeiten, die mit Sakkadenaufgaben das Gebiet aktiviert haben, das räumliche Arbeitsgedächtnis mehr beansprucht sein als in der vorliegenden Aufgabe, was nicht sehr plausibel erscheint. Zudem träfe diese Erklärung auch nicht für den Motorkortex zu. Es bleibt also zu vermuten,

dass das konservative statistische Testkriterium bzw. die zu geringe Teststärke das Ausbleiben der Aktivierung verursacht hat. Im Vergleich zu den anderen Teilprozessen der Aufgabe ist zu bemerken, dass die motorischen Handlungen (Augen- und Fingerbewegungen) sehr kurz dauern und sehr stark überlernt („automatisiert“) sind. Daher könnte die Teststärke für die mit den anderen kognitiven Teilprozessen assoziierten Aktivierungen ausreichend gewesen sein, für die motorischen Areale jedoch nicht. Mit einem weiteren Experiment, das weniger Stufen und dafür mehr Wiederholungen enthält, könnte dies überprüft werden. Ein Serie solcher Experimente könnte auch, z.B. durch Paarvergleiche experimenteller Bedingungen, die „Datenlücken“ in Tabelle 20 füllen und somit zu einer weiteren Absicherung der Ergebnisse beitragen.

Die übrigen Ergebnisse bestätigen, mit einigen Modifikationen, die Hypothesen. Es kristallisierten sich zwei Aufmerksamkeitsnetzwerke heraus: Mit der Verweildauer korrelierten wie erwartet ein Gebiet im dorsolateralen präfrontalen Kortex (um den posterioren Teil des Sulcus frontalis inferior), das horizontale Segment des SIP, extrastriäre visuelle Areale (LO-Komplex) und vermutlich das Prä-SMA. Darüber hinaus scheint auch die Anteriore Insel zu diesem Netzwerk zu gehören, welches offenbar mit der Modulation der Merkmalsaufmerksamkeit in Zusammenhang steht. Mit der Anzahl der Verlagerungsschritte und damit mit der räumlichen Aufmerksamkeit standen der anteriore Teil des Sulcus frontalis inferior, das anteriore Segment des SIP sowie vermutlich der Gyrus cinguli anterior in Zusammenhang. Die auffällig starke Cuneus-Aktivierung korrelierte zwar mit den Parametern der Merkmalsaufmerksamkeit, allerdings nur in der Bedingung *Suche*, nicht bei *Vergleich*. Damit könnte der Cuneus eine Schnittstelle zwischen den beiden Netzwerken darstellen, an der die Merkmalsaufmerksamkeit auf die verschiedenen räumlichen Positionen angewendet wird. Eine derartige Schnittstelle passt zu der Vorstellung von MILNER & GOODALE (1993), die das Zusammenspiel von Merkmals- und Raumaufmerksamkeit in direkten Interkonnektivitäten zwischen dorsalem und ventralem System lokalisieren.

Innerhalb der beiden Netzwerke stellt sich die Frage, welche Gebiete jeweils die Modulation der Aufmerksamkeit initiieren und welche die Wirkorte darstellen. Dies kann ohne eine Zeitverlaufsanalyse – die hier nicht möglich ist - nicht beantwortet werden. Vermutlich aber wird eine unidirektionale Sichtweise dem Zusammenspiel der Gebiete gar nicht gerecht. In einem Kreisprozess könnte vom rechten dorsolateralen präfrontalen Kortex die Initiierung der Merkmalsaufmerksamkeit ausgehen. In der Studie von COULL, FRACKOWIAK & FRITH (1998) war bei einer reinen Aufgabe der Merkmalsaufmerksamkeit ebenfalls speziell der rechte dorsolaterale präfrontale Kortex aktiviert. Über den horizontalen SIP könnten die Signale in den LO-Komplex weitergeleitet werden, wo der visuelle Objektvergleich stattfindet. Beispielsweise fand MALACH (1995) bei einer Aufgabe zur Objektbetrachtung genau die gleichen aktivierten Areale im lateralen Okzipitallappen aktiviert wie im vorliegenden Experiment. Das Ergebnis der (aufmerksamkeitsmodulierten) Objektbetrachtung könnte dann wieder in den präfrontalen Kortex zurückgeleitet werden, wo Entscheidungen getroffen werden, die Suche fortzusetzen, d.h. den Aufmerksamkeitsfokus weiter zu bewegen, oder die Suche abzubrechen und eine Taste zu drücken. Welche Rolle in einem solchen Kreislauf das Prä-SMA und die Anteriore Insel spielen, kann nur spekuliert werden. Das Prä-SMA wird beispielsweise mit „Aufmerksamkeit zur Handlungsvorbereitung“ in Verbindung gebracht (PETIT u.a. 1998), und zwar zusammen mit dem Gyrus cinguli anterior. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen könnte speziell das Prä-SMA dabei die Komponente der Merkmalsaufmerksamkeit, der Gyrus cinguli anterior die Komponente der räumlichen Aufmerksamkeit repräsentieren. Über die

Funktion der anterioren Insel wird in der Literatur viel spekuliert. So werden ihr beispielsweise Funktionen im cross-modalen Transfer zugeschrieben (HADJIKHANI & ROLAND 1998), als supplementärmotorisches Areal (AUGUSTINE 1996) oder bei der zeitlich beschleunigten Verarbeitung allgemein (FIEZ u.a. 1995), aber auch in den bereits diskutierten Arbeiten zur visuellen Aufmerksamkeit war sie häufig aktiv. Insgesamt ist nicht anzunehmen, dass ihre Funktion auf die visuelle Aufmerksamkeit und Wahrnehmung beschränkt ist. In einer neueren Arbeit führten FLYNN, BENSON & ARDILAS (1999) vielfältige anatomische, physiologische und klinische Evidenz dafür an, dass die anteriore Insel eine wesentliche Rolle bei der Modulation viszerosensorischer Reaktionen spielt. Insbesondere erwähnen sie in diesem Zusammenhang gastrointestinale Reaktionen, kardiovaskuläre Veränderungen, Beeinflussung der Atmung sowie Pupillendilatation. Da im vorliegenden Experiment die insuläre Aktivierung mit der Schwierigkeit der Zielreizdiskrimination korrelierte, scheint eine Erklärung am plausibelsten, nach der dies eine zunehmende Amplitude der Pupillendilatation reflektiert: In verschiedenen Arbeiten konnte nämlich BEATTY zeigen (z.B. BEATTY 1988; RICHER & BEATTY 1987), dass sich in kognitiven Reaktionszeitexperimenten die Pupille in jedem Durchgang weit stellte, und zwar nahm die Amplitude der Dilatation mit steigender kognitiver Anforderung (insbesondere Antwortunsicherheit und Aufgabenschwierigkeit) zu.

Ein Kreislauf der räumlichen Aufmerksamkeit könnte eine Initiierung im anterioren Teil des Sulcus frontalis inferior beinhalten sowie eine Weiterleitung über den anterioren Teil des SIP, in dem vermutlich der extrapersonale Raum repräsentiert ist (vgl. Abschnitt 8.2). Die ausgewählten räumlichen Positionen müssen nun mit der Merkmalsaufmerksamkeit in Verbindung gebracht werden, wofür hier eine Rolle des horizontalen SIP sowie des Cuneus vorgeschlagen wurde. Nach dem Objektvergleich (LO-Komplex) und der Entscheidung über den Fortgang der Suche im posterioren frontalen Sulcus inferior könnte dann eine weitere Verlagerung im anterioren Teil desselben Sulcus initiiert werden.

Ein weiterer auffälliger Befund war die Lateralisierung der Aktivierung im LO-Komplex, dem horizontalen SIP und der Anterioren Insel. Bei drei der fünf Versuchspersonen nahm mit zunehmender Diskriminationsschwierigkeit, d.h. abnehmender Fokusgröße, die Aktivierung rechts ab und links zu. Im Bereich der extrastriären visuellen Areale ist bereits mehrfach eine solche Lateralisierung berichtet worden (z.B. FINK u.a. 1996, MARTINEZ u.a. 1997). Für den parietalen Kortex hat MESULAM (1981, 1990) eine Lateralisierung angenommen, nach der der rechte Parietallappen Aufmerksamkeit im gesamten Raum, der linke hingegen nur in der kontralateralen Raumhälfte steuern soll. Nach den vorliegenden Befunden ist für alle drei Gebiete eher eine Lateralisierung im Zusammenhang mit der Fokusgröße anzunehmen. Nach dem vorgeschlagenen Modell der beiden „verzahnten Kreisläufe“ würde dies bedeuten, dass die Merkmalsaufmerksamkeit ab einer bestimmten Ebene lateralisiert verarbeitet wird. Die Verteilung auf die beiden Hemisphären könnte dabei vom rechten Sulcus frontalis inferior gesteuert werden. Diese Spekulation stützt sich auf das beobachtete Kontinuum einer Lateralisierung: Im Sulcus frontalis inferior ist die Aktivierung ausschließlich rechts zu beobachten, in der Insula ist sie vorwiegend rechts mit einem geringen Einfluss der Fokusgröße, ebenso im horizontalen SIP, während im LO-Komplex insgesamt beide Hemisphären in gleichem Ausmaß beteiligt sind. Welches Hirngebiet an der *Einstellung* der Fokusgröße beteiligt ist, ist bisher völlig offen geblieben. Weder gibt es hierzu einschlägige Literaturbefunde, noch konnte das vorliegende Experiment eindeutige Daten liefern, da die Fokusgrößen geblockt auftraten. Um die Initiierung dieses Prozesses zu untersuchen, müsste ein häufiger Wechsel der Fokusgröße experimentell hervorgerufen werden. Daher kann an dieser Stelle nur speku-

liert werden. Eine Spekulation, die sich auf die vorliegenden Lateralisierungsbefunde stützt, wäre, dass der posteriore Sulcus frontalis inferior an der Einstellung beteiligt ist oder sie initiiert, und dass er dabei von der Anterioren Insel im Sinne einer Strategieoptimierung unterstützt wird.

Insgesamt erschien die Suchaufgabe mit dem Reaktionszeitmodell geeignet, um zur Lokalisierung von Teilprozessen der visuellen Suche beizutragen. Der Auflösungsgrad bisher vorliegender Befunde konnte teilweise verbessert werden. Aufgrund der geringen Teststärke einerseits und der geringen Anzahl realisierter experimenteller Bedingungen (und damit Parameterabstufungen) andererseits – was in einem solchen Experiment konkurrierende Anforderungen sind – musste die Interpretation der Daten jedoch auf einem recht spekulativen Niveau erfolgen. Jedoch konnte umgekehrt das Reaktionszeitmodell durch die fMRT-Ergebnisse insofern validiert werden, da es sinnvolle und mit der Literatur kompatible Zusammenhänge zwischen Aktivierungen und Parameterwerten lieferte.

Kapitel 9

Klinische Anwendung des Reaktionszeitmodells:

Differentialdiagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen bei hirngeschädigten Patienten

9.1 Fragestellung

In diesem Kapitel soll untersucht werden, ob sich das Reaktionszeitmodell für eine prozessorientierte Differentialdiagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen eignet. Beeinträchtigungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit treten bei verschiedenartigen Hirnschädigungen auf (vgl. Abschnitt 9.2), wie das komplexe neuronale Netzwerk, das im letzten Kapitel identifiziert wurde, ja auch vermuten lässt. Visuelle Aufmerksamkeitsstörungen sind bisher insgesamt recht wenig verstanden. Defizite in einer Anzahl verschiedener kognitiver Teilprozesse können zu solchen Störungen beitragen. Um zu spezifizieren, welche Teilprozesse der Aufmerksamkeit bei den einzelnen Patienten beeinträchtigt sind, fehlen bisher allerdings geeignete diagnostische Verfahren.

Im vorliegenden Kapitel sollen sowohl die methodische als auch die inhaltliche Fragestellung untersucht werden:

- Ist die in dieser Arbeit verwendete Suchaufgabe zusammen mit dem Reaktionszeitmodell ein geeignetes diagnostisches Instrument, um zu spezifizieren, welche Teilprozesse der räumlich-visuellen Aufmerksamkeit bei einem Patienten beeinträchtigt sind ?
- Lassen sich Zusammenhänge feststellen zwischen Arten von Hirnläsionen und Beeinträchtigungen in einzelnen Teilprozessen der räumlich-visuellen Aufmerksamkeit ?

Die Ergebnisse könnten zum einen Ansatzpunkte für eine Entwicklung individuell „maßgeschneiderter“ Rehabilitationsverfahren liefern, zum anderen - im Zusammenhang mit dem vorangegangenen Kapitel - zu einem besseren Verständnis der neuronalen Implementierung visueller Aufmerksamkeit und ihrer Störungen beitragen.

9.2 Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit bei hirngeschädigten Patienten: Literaturüberblick

9.2.1 Diagnostische Verfahren

Es liegt eine Reihe von neuropsychologischen Tests vor, die Fähigkeiten im Bereich der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit messen sollen. SPREEN & STRAUSS unterscheiden in ihrem Handbuch neuropsychologischer Tests (1998) beispielsweise Testverfahren für fokussierte Aufmerksamkeit, für Daueraufmerksamkeit und für Verteilte Aufmerksamkeit. Tests für fokussierte Aufmerksamkeit verlangen das schnelle Absuchen und Identifizieren von Objekten. Der bekannteste Test für die Daueraufmerksamkeit ist der *d2*, der allerdings auch schnelle visuelle Suche beinhaltet. Verteilte Aufmerksamkeit wird z.B. mit dem *Trail-Making-Test* (TMT) geprüft. Zu Einzelheiten der Testverfahren sei auf die Handbücher von SPREEN & STRAUSS (1998) sowie LEZAK (1995) verwiesen. SPREEN & STRAUSS geben zu bedenken (1998, S. 232), dass die meisten Messverfahren der Aufmerksamkeit mehrere Prozesse beanspruchen und die Testleistung nicht ohne Weiteres auf Leistungen in einzelnen kognitiven Komponenten zurückgeführt werden kann. Außerdem können gemessene Aufmerksamkeitsdefizite auch auf einer verlangsamten Verarbeitungsgeschwindigkeit beruhen, die wiederum unterteilt werden kann, in verlangsamte Reaktion und verlangsamte Informationsverarbeitung.

Weiterhin existiert eine Anzahl von Testverfahren, die Defizite in der Beachtung von Objekten an bestimmten räumlichen Positionen aufdecken sollen. Insbesondere sind diese zur Diagnostik des Neglect-Syndroms entwickelt worden. Der Neglect ist die wohl am klarsten umrissene Aufmerksamkeitsstörung. Er tritt speziell bei Läsionen des rechten Parietallappens auf und bedeutet, dass der Patient nicht in der Lage ist, auf Reize oder Teile von Reizen in der linken (also kontraläsionalen) Hälfte des Raumes zu reagieren. Die Schwierigkeit darf nicht auf einem Gesichtsfeldausfall beruhen. Dabei ist es unklar, ob das Extinktionssyndrom, bei dem der Patient nur dann einen kontraläsional präsentierten Reiz nicht wahrnimmt, wenn ipsiläsional ein zweiter dargeboten wird, eine mildere Form des Neglects oder eine andere Störung darstellt (vgl. DRIVER u.a. 1997). Die bekanntesten Testinstrumente zur Diagnostik von Neglect und Extinktion sind die *Sensory-Perceptual Examination* (SPE) aus der *Halstead-Reitan-Batterie*, der *Test of Visual Neglect* sowie der Hemi-Inattention-Test von ROBERTSON. Alle Tests sind dargestellt bei STRINGER 1996. Zur Auswertung wird in allen solchen Tests die Leistung in der linken mit der in der rechten Raum- (bzw. Papier-) Hälfte verglichen. Alle diese Tests sind recht gut in der Lage, Patienten mit schwerem Neglect von anderen Patienten sowie von Gesunden zu trennen. Sie ermöglichen aber weder Aufschluss darüber, welche Teilprozesse beim Neglect beeinträchtigt sind, noch sind sie in der Lage, mildere Störungsformen (beispielsweise eine lediglich verlangsamte Reaktion zur kontraläsionalen Seite) aufzudecken.

An allen bisher vorgestellten diagnostischen Verfahren ist zu kritisieren, dass die Testaufgaben zu komplex sind, um daraus wirkliche Schlüsse über Defizite in Aufmerksamkeitsleistungen ziehen zu können. Schlechte Testleistungen können immer auch auf perzeptuelle, kognitive oder motorische Defizite zurückgehen, die mit der zu testenden Aufmerksamkeitsfunktion nichts zu tun haben. Diese Möglichkeiten müssen durch eine umständliche zusätzliche Diagnostik ausgeschlossen werden. Darüber hinaus besteht Aufmerksamkeit selbst aus ver-

schiedenen Teilprozessen, die bei unterschiedlichen Hirnschädigungen vermutlich differenziell beeinträchtigt sind. Die vorgestellten Testverfahren sind nicht geeignet, hier zu differenzieren. Dies soll mit dem Reaktionszeitmodell versucht werden.

9.2.2 Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit bei Hirnschädigungen

Beeinträchtigungen visuell-räumlicher Aufmerksamkeitsleistungen sind nach unterschiedlichsten Hirnläsionen zu beobachten, was nicht verwundert, wenn man das komplexe neuronale Netzwerk beachtet, das an dieser Leistung beteiligt ist (vgl. Kapitel 8). Die Ätiologien, die im Zusammenhang mit solchen Aufmerksamkeitsdefiziten genannt werden, reichen von fokalen Läsionen durch Schlaganfälle oder Tumore über diffuse Hirnschädigungen nach Kopfverletzungen, Vergiftungen oder Sauerstoffunterversorgung bis hin zu degenerativen Erkrankungen wie Morbus Parkinson oder Alzheimer. Seit dem Ersten Weltkrieg, als die Neuropsychologie aufgrund einer Vielzahl fokaler Schädigungen durch Kopfschüsse einen ersten Aufschwung nahm, sind zu allen diesen Bereichen eine Vielzahl von Arbeiten entstanden, die zu zitieren den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Der folgende kurze Überblick beschränkt sich daher auf die diesbezügliche neuere Literatur.

Fokale Hirnläsionen

Die häufigsten Ursachen für fokale Hirnläsionen (in Friedenszeiten) sind Schlaganfälle sowie Tumorbildungen und die damit verbundenen neurochirurgischen Eingriffe. Seit ungefähr hundert Jahren wird gezielt versucht, aus Ausfällen bei fokalen Läsionen Aufschlüsse über die Funktionsweise des menschlichen Gehirns zu gewinnen. Somit stellen fokale Läsionen auch im Bereich der visuellen Aufmerksamkeit die neuropsychologisch am besten untersuchten Hirnschädigungen dar. Schwierigkeiten bei visuellen Aufmerksamkeitsleistungen sind bei Läsionen im Parietallappen, im Okzipitallappen, im Frontallappen sowie in subkortikalen Strukturen (Thalamus, Colliculus superior, Basalganglien) gefunden worden.

Läsionen des Parietallappens. Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit werden am häufigsten im Zusammenhang mit Schädigungen der Parietallappen beschrieben. Es gibt eine Reihe von Arbeiten, die das Neglect-Syndrom, das bei bestimmten rechtsparietalen Läsionen auftritt (s.o.), weiter aufzuklären versuchten. Einhelliger Befund dabei war, dass Neglect-Patienten Schwierigkeiten haben, ihre Aufmerksamkeit in das kontraläsionale Halbfeld zu verlagern, und zwar um so mehr, je weiter die Aufmerksamkeit bewegt werden musste (EGLIN u.a. 1994). ARGUIN & BUB (1993) fanden leichtere Schwierigkeiten auch bei Verlagerungen in das ipsiläsionale Halbfeld. Nach LADAVAS, CARLETTI & GORI (1994) sollen exogen gesteuerte Verlagerungen stärker beeinträchtigt sein als endogen gesteuerte. Bei visuellen Suchaufgaben machten Neglect-Patienten weniger und kürzere Fixationen im kontraläsionalen Halbfeld, dafür mehr und längere Fixationen im ipsiläsionalen Halbfeld im Vergleich zu Gesunden und zu Hemianopsie-Patienten (BEHRMANN u.a. 1997). Eine verlängerte Verweildauer der Aufmerksamkeit fanden HUSAIN u.a. (1997) auch bei Objekterkennungsaufgaben, bei denen die Objekte nacheinander am selben Ort dargeboten wurden. Einer weit verbreiteten Meinung zufolge, die auf POSNER (1980) zurückgeht, liegen die Probleme der Neglect-Patienten ursächlich darin, dass sie Schwierigkeiten haben, ihre Aufmerksamkeit von ipsilä-

sional präsentierten Objekten loszulösen („disengagement“). WALKER & FINDLAY (1996) untersuchten allerdings Neglect-Patienten mit einem Paradigma, das zwischen der ipsi- und der kontraläsionalen Reizdarbietung eine zeitliche Lücke lässt, und fanden auch hier die bekannten Schwierigkeiten der Patienten, ihre Aufmerksamkeit nach kontraläsional zu richten. Sie argumentieren, dass diese nicht durch Probleme bei der Loslösung erklärt werden können, da das ipsiläsionale Objekt gar nicht mehr vorhanden war. Außerdem beschreiben sie zwei unterschiedliche Formen von Neglect: Während Patienten mit *raumbezogenem* Neglect die linke Raumhälfte nicht beachten, gibt es auch Patienten mit *objektbezogenem* Neglect, die von jedem Objekt unabhängig von seiner Position die linke Hälfte übersehen. Letztere sind in der Aufmerksamkeitsverlagerung zwischen Objekten, d.h. auch nach kontraläsional, nicht beeinträchtigt (WALKER u.a. 1996). Weshalb der Neglect vorwiegend bei rechtsparietalen Läsionen auftritt, ist nicht bekannt. Nach dem Modell eines Aufmerksamkeitsnetzwerkes von MESULAM (1981) liegt dies daran, dass im rechten Parietallappen der gesamte Raum, im linken hingegen nur die kontralaterale (also rechte) Raumhälfte repräsentiert ist, da die Sprache dort „synaptischen Raum“ wegnimmt. So kann eine linksparietale Läsion vom rechten Parietallappen kompensiert werden, umgekehrt jedoch nicht. BABINSKY u.a. (1996) beschreiben allerdings einen Fall von Neglect der rechten Raumhälfte nach linksparietaler Läsion. Die Läsion betraf insbesondere den Gyrus angularis und Gyrus supramarginalis. Dies spricht nach ihrer Auffassung eher für ein Modell, nach dem große Teile des rechten, aber nur sehr kleine Teile des linken Parietallappens für Aufmerksamkeitsverlagerungen zuständig sind. Bei rechtsparietalen Läsionen wird somit mit wesentlich größerer Wahrscheinlichkeit ein aufmerksamkeitssensitiver Bereich betroffen als bei linksparietalen. Ein recht überzeugendes Alternativmodell stammt von BISIACH & VALLAR (1988): Sie gehen von einer asymmetrischen Verteilung rezeptiver Felder in beiden Parietallappen aus, nach der im linken Parietallappen eine große Anzahl von Neuronen kontralaterale rezeptive Felder haben, jedoch nur eine sehr kleine Anzahl ipsilaterale. Im rechten Parietallappen ist dieser Unterschied weniger ausgeprägt. Bei einer Läsion des rechten Parietallappens bleiben somit insgesamt weniger Neuronen mit rezeptiven Feldern im linken visuellen Halbfeld übrig als umgekehrt bei einer linksparietalen Läsion Neuronen mit rezeptiven Feldern im rechten Halbfeld. Anhand von Daten zweier Patienten mit Kommissurotomie konnten POLLMANN & ZAIDEL (1998) dieses Modell stützen.

Es gibt darüber hinaus Aufmerksamkeitsstörungen nach parietalen Läsionen ohne Neglect. EGLIN, ROBERTSON & KNIGHT (1991) beschreiben Patienten sowohl mit rechts- als auch mit linksparietaler Läsion, die bei visueller Suche eine Verzögerung des Suchbeginns nach kontraläsional zeigten, bei wachsenden Aufmerksamkeitsanforderungen auch nach ipsiläsional. Auch sind bei parietalen Läsionen häufig Störungen komplexerer Augenbewegungen zu beobachten. HEIDE u.a. (1995) und HEIDE & KÖMPF (1997) erwähnen, dass Patienten mit posteriorer parietaler Läsion räumliche Probleme mit sogenannten Zweischritt-Sakkaden haben, wenn der erste Schritt nach kontraläsional führt. Bei Zweischritt-Sakkaden sollen zu zwei dargebotenen Objekten nacheinander Sakkaden ausgeführt werden. Um die zweite Sakkade richtig ausführen zu können, muss die Augenbewegung der ersten in die Planung mit einbezogen (d.h. „herausgerechnet“) werden. Hierzu sind die betroffenen Patienten offensichtlich nicht in der Lage.

Besonders schwere Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit treten nach bilateralen parietalen Läsionen auf: Beim sogenannten Balint-Syndrom ist der Patient nicht in der Lage, mehr als ein Objekt gleichzeitig wahrzunehmen. Dies führt zu Problemen bei fast jeder Art

von visueller Suche, da dem Patienten keinerlei Informationen über die räumliche Lage der (nacheinander wahrgenommenen) Objekte zur Verfügung stehen. Allerdings fanden ROBERTSON u.a. (1997), dass die Merkmalssuche (Pop-Out) unbeeinträchtigt sein kann. Vermutlich wird hier das gesamte Suchbild als ein Objekt aufgefasst (vgl. hierzu auch NAKAYAMA 1999).

Läsionen des Okzipitallappens. Durch Schädigungen striärer und extrastriärer visueller Areale führen Läsionen des Okzipitallappens häufig indirekt zu Funktionsbeeinträchtigungen der visuellen Aufmerksamkeit. Besonders bei Schädigung der Area striata kommt es zu Gesichtsfeldausfällen wie Skotomen („blinden Flecken“) oder Hemianopsie (Ausfall der gesamten kontraläsionalen Gesichtsfeldhälfte). In der Folge finden sich unsystematisch viele Explorationswege bei der visuellen Suche (ZIHL 1995) und meist ein eingeschränkter visueller Suchbereich (KERKHOFF u.a. 1992). Bereits bei einfachen Sakkaden fand MEIENBERG (1981, 1983) verlängerte Latenzen und reduzierte Amplituden zur kontraläsionalen Seite (d.h. in das blinde Halbfeld). MEIENBERG und auch RIZZO & ROBIN (1996) erwähnen, dass diese Beeinträchtigungen in abgeschwächter Form auch in der ipsiläsionalen Gesichtsfeldhälfte auftreten können. Durch ein gezieltes Sakkadentraining sind die Probleme aber so weit zu beheben, dass die Patienten in der Regel im Alltag keine Probleme mehr haben (z.B. stoßen sie nicht mehr gegen Gegenstände) und zu einer systematischen visuellen Suche in der Lage sind (KERKHOFF u.a. 1992; KERKHOFF, MUNSINGER & MEIER 1994, ZIHL 1995).

Läsionen extrastriärer visueller Areale können, insbesondere, wenn sie bilateral auftreten, zu den verschiedensten Formen von visueller Agnosie führen (z.B. Formagnosie, Farbagnosie, Prosopagnosie). Dabei werden bestimmte Objektmerkmale nicht erkannt, wenn das Objekt lediglich visuell präsentiert wird (die taktile oder akustische Objekterkennung ist dabei intakt). Entsprechend haben die betroffenen Patienten häufig Probleme bei visuellen Suchaufgaben, die präattentive Gruppierungsprozesse der betroffenen Merkmale verlangen, also bei der Nutzung der Homogenität von Ablenkern (HUMPHREYS u.a. 1992) oder der Merkmalssuche (VECERA & BEHRMANN 1997). Räumliche Aufmerksamkeitsleistungen sind dabei unbeeinträchtigt. Die Merkmalsintegration und damit die Konjunktionssuche waren hingegen bei Patienten beeinträchtigt, deren Läsion parieto-okzipitale Verbindungsbahnen betraf (ARGUIN, JOANETTE & CAVANAGH 1993).

Läsionen des Frontallappens. Dem Frontallappen wird eine wesentliche Rolle bei verschiedensten kognitiven Leistungen zugeschrieben. Somit ist es nicht verwunderlich, dass frontale Läsionen auch Auswirkungen auf Aufmerksamkeitsfunktionen haben können. Da die meisten Testaufgaben zur visuellen Aufmerksamkeit aber auch eine Vielzahl anderer kognitiver Anforderungen beinhalten (s.o.), ist es insbesondere hier schwierig, bei einer Leistungsminde- rung auf eine spezifische Aufmerksamkeitsstörung zu schließen. Abgesehen von der „typischen“ Frontalhirnsymptomatik, die eine mangelnde Umschaltfähigkeit auch bei Aufmerksamkeitsanforderungen beinhaltet, gibt es recht wenige Arbeiten, die visuelle Aufmerksamkeitsstörungen bei Frontalläsionen untersucht haben. RUFF u.a. (1992) verglichen Leistungen in der selektiven Aufmerksamkeit bei frontalen und nichtfrontalen Läsionen mit einem eigens dafür entwickelten Test und stellten fest, dass bei frontalen Läsionen die serielle Merkmalsverarbeitung stärker beeinträchtigt war als die parallele. Außerdem wiesen Patienten mit rechtsfrontaler Läsion eine allgemeine Verlangsamung in den Aufgaben auf. Weiterhin wurden bei Frontalläsionen verschiedene Augenbewegungsstörungen berichtet (PIERROT-

DESEILLIGNY 1994; HEIDE & KÖMPF 1997), deren Ursache auf Beschädigungen des frontalen bzw. supplementären Augenfeldes zurückgeführt wird.

Subkortikale Läsionen. Sowohl im Zusammenhang mit Läsionen der Basalganglien (KARNATH 1994) als auch des Colliculus superior (PIERROT-DESEILLIGNY 1994) werden verschiedene Augenbewegungsstörungen beschrieben, die meist nicht näher spezifiziert werden, aber Auswirkungen auf Exploration und visuelle Suche haben. Weiterhin finden sich visuell-räumliche Aufmerksamkeitsstörungen nach Thalamusläsionen: RAFAL & POSNER (1987) beschreiben Schwierigkeiten bei der räumlichen Orientierung der Aufmerksamkeit nach Thalamusläsionen, und speziell bei einer Läsion des Pulvinars soll die selektive Aufmerksamkeit beeinträchtigt sein (PETERSEN, ROBINSON & MORRIS 1987). Auch im Sakkadentraining von ZIHL (1995, s.o.) hatten die einzigen Patienten, deren visuelle Suchpfade nicht durch das Training verbessert worden waren, zusätzlich zur Hemianopsie eine Läsion im Bereich des hinteren Thalamus.

Schädel-Hirn-Trauma (SHT)

Patienten klagen häufig auch Jahre nach einem Schädel-Hirn-Trauma (SHT) noch über Schwierigkeiten bei Aufmerksamkeitsanforderungen und unangemessene Ermüdungserscheinungen im Alltag. In einem Überblickswerk kamen VAN ZOMEREN & BROUWER (1994) zu dem Ergebnis, dass SHT-Patienten keine erhöhte Ablenkbarkeit oder Probleme im Halten der Aufmerksamkeit haben, jedoch in der Geschwindigkeit der visuellen Suche verlangsamt seien. Es sei allerdings unklar, welche Prozesse genau beeinträchtigt sind. HEINZE u.a. (1992) untersuchten Schwierigkeiten von SHT-Patienten sowohl bei Pop-Out- als auch bei serieller Suche mit Hilfe von EEG-Methoden und interpretieren ihre Ergebnisse dahingehend, dass die Defizite insbesondere auf eine beeinträchtigte Registrierung visueller Merkmale zurückgehen. Nach STABLUM u.a. (1994) ist allerdings die *selektive Aufmerksamkeit* auf globale und lokale visuelle Merkmale nicht beeinträchtigt. CREMONA-MEEYARD & GEFFEN (1994) beschreiben darüber hinaus Beeinträchtigungen bei der räumlichen Lenkung der Aufmerksamkeit nach mittelschwerem bis schwerem SHT, welche mit der Zeit aber zurückgingen.

Degenerative Hirnläsionen

Morbus Parkinson. Die Parkinsonsche Krankheit ist eine Degeneration dopaminerger Neuronen in den Basalganglien. Die bekanntesten Symptome sind Tremor (Zittern), Rigor (Steifheit) und Akinese (Unfähigkeit zur Initiierung von Bewegungen). Was die visuell-räumliche Aufmerksamkeit angeht, werden insbesondere zwei Arten von Defiziten beschrieben: zum einen eine verminderte Fähigkeit im Halten der Aufmerksamkeit, also eine zu schnelle Abwendung von relevanten Reizen (FILOTEO u.a., 1994; WRIGHT u.a., 1990), zum anderen Beeinträchtigungen bei der Merkmalsuche. Während Parkinson-Patienten bei der Konjunktionssuche normale Leistungen erbrachten (WEINSTEIN, TROSCIANKO & CALVERT 1997), suchten sie einfache Merkmals-Zielreize, die normalerweise zum Pop-Out führen, seriell (FILOTEO u.a., 1997). MADDOX u.a. (1996) kamen zu dem Schluss, dass speziell die selektive Aufmerksamkeit beeinträchtigt ist, nicht jedoch die Integration verschiedener Objektmerkmale. CRONIN-GOLOMB & BRAUN (1997) führen dieses Defizit bei der visuellen Suche auf eine Dysfunktion des Netzwerkes aus Basalganglien, Thalamus und Kortex zurück, welches den dorsolateralen präfrontalen Kortex und die hinteren Parietallappen einschließt.

Morbus Alzheimer. Diese Erkrankung des zentralen Nervensystems führt zunächst zumeist zu Gedächtniseinbußen und später zur Demenz. Verschiedene Autoren beschreiben bereits in der Frühphase Beeinträchtigungen der räumlich-visuellen Aufmerksamkeit. Insbesondere sollen die Patienten bei der visuellen Suche und Objekterkennung Schwierigkeiten mit der Größe ihres Aufmerksamkeitsfokus haben. Ob dieser jedoch durchweg zu klein ist (THAISS & DE BLESER 1992; COSLETT u.a. 1995; STARK, GRAFMAN & FERTIG 1997), oder ob sie ihn nicht auf die optimale Größe einstellen können (GREENWOOD, PARASURAMAN & ALEXANDER 1997), ist umstritten. Es wird auch diskutiert, dass verschiedene Untergruppen von Alzheimer-Patienten unterschiedliche Aufmerksamkeitsstörungen zeigen, beispielsweise auch im zielgerichteten Verlagern und im Halten der Aufmerksamkeit (SCINTO u.a. 1994; PARASURAMAN, GREENWOOD & ALEXANDER 1995). KULJIS (1994) führt attentionale Defizite bei Alzheimer-Patienten auf post mortem gefundene amyloide Plaques im Pulvinar des Thalamus zurück. Schwierigkeiten bei der Bewertung der Ergebnisse ergeben sich hier nicht nur aus der Problematik der oft nicht vergleichbaren und keine eindeutigen Rückschlüsse zulassenden Testaufgaben (vgl. Abschnitt 9.2.1), sondern darüber hinaus auch aus der Tatsache, dass im Frühstadium der Alzheimerschen Krankheit, in dem die Fälle untersucht und berichtet werden, die Diagnose nicht unbedingt zuverlässig ist.

Vergiftungen

DECKEL (1994) beschreibt bei einem Patienten, der eine Vergiftung mit Kohlenmonoxid erlitt, Störungen der räumlich-visuellen Informationsverarbeitung und der visuellen Aufmerksamkeit (die er allerdings nicht näher spezifiziert) und führt diese auf eine später gefundene Pathologie des Frontallappens zurück. Nach einer organischen Lösungsmittelvergiftung hatte ein von MORROW (1994) untersuchter Patient Probleme mit der POSNER-Aufgabe (vgl. Abschnitt 9.2.1), und zwar sowohl in der räumlichen Lenkung als auch in der Loslösung („disengagement“) der Aufmerksamkeit.

9.3 Das Reaktionszeitmodell als diagnostisches Instrument zur Spezifizierung von Aufmerksamkeitsstörungen: Klinische Studie

In dieser Studie sollen Patienten, die unter Störungen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit leiden, die in dieser Arbeit bereits mehrfach angewendete, schwierigkeitsgestufte Merkmalsuche durchführen. Mit Hilfe des hier entwickelten Reaktionszeitmodells sollen ihre Suchstrategien bestimmt werden, um genauer zu spezifizieren, in welchen Teilprozessen der visuellen Suche ihre Schwierigkeiten begründet sind. Dabei soll die in der Einleitung umrissene zweifache Fragestellung verfolgt werden. Zum einen soll die Eignung des Reaktionszeitmodells als diagnostisches Instrument untersucht werden, zum anderen soll die Studie zum Verständnis des menschlichen Aufmerksamkeitsnetzwerkes und seiner Störungen beitragen. Die diagnostische Eignung der Aufgabe soll nach folgenden Kriterien beurteilt werden:

1. **Praktische Durchführbarkeit:** Sind hirngeschädigte Patienten in der Lage, die visuellen Suchaufgaben so zu bearbeiten, dass eine Datenbasis für die Modellanpassung zur Verfügung steht?

2. Modellanpassung: Sind aus den Modellparametern auch bei „abnormalen“ Suchstrategien, wie Patienten sie möglicherweise durchführen, Schlussfolgerungen über die Suchstrategien möglich, oder produzieren mögliche Verletzungen der Modellannahmen einfach nur „chaotische“ Parameterwerte? Als Kriterium hierfür sollen die errechneten Parameterwerte mit den bisherigen Befunden aus der Literatur verglichen werden, und zwar speziell bei Hirnläsionen, deren Auswirkungen auf die visuelle Suche schon recht gut verstanden sind (z.B. okzipitale Läsionen mit Hemianopsie).
3. Plausibilität der Ergebnisse: Ein Hinweis auf die Plausibilität der Parameter- und Strategieschätzungen bei den Patienten liegt dann vor, wenn gleiche Muster von Abweichungen (zu Normalwerten) bei gleichartigen Hirnläsionen auftreten.

Sind diese Kriterien erfüllt, dann können die Ergebnisse qualitativ im Hinblick auf die zweite Fragestellung diskutiert werden.

9.3.1 Methode

Versuchspersonen

Untersucht wurden 26 hirngeschädigte Patienten und 26 gesunde Kontrollpersonen, die in Geschlecht, Alter (+ / – 2 Jahre) und Bildungsstand (höchster erreichter Bildungsabschluss) parallelisiert zu den Patienten ausgewählt worden waren. Die Patienten waren derzeitige oder ehemalige Patienten der Tagesklinik für kognitive Neurologie der Universität Leipzig. Die Patienten unterschrieben nach vorheriger Aufklärung über Umfang und Zweck der Untersuchung auf freiwilliger Basis eine Einverständniserklärung³⁰. Ehemalige Patienten und Kontrollpersonen erhielten eine Vergütung. Die Auswahl der Patienten erfolgte auf der Grundlage ihrer Testergebnisse in der *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung* (TAP, ZIMMERMANN & FIMM 1993) sowie orthoptischer Prüfungen der räumlich-visuellen Sehfunktionen. Aus der TAP wurden standardmäßig die Untertests „Alertness (tonisches und phasisches Arousal)“, „Geteilte Aufmerksamkeit“ und der „Go- / No Go-Test“ durchgeführt. Bei den räumlich-visuellen Sehfunktionen wurden standardmäßig das Gesichtsfeld (mit Hilfe kinetischer Perimetrie), das Vorliegen eines visuellen Neglects (mit dem Hemi-Inattention-Test von ROBERTSON, vgl. STRINGER 1996) sowie einer Explorationsstörung (mit Hilfe von realen Objekten, die auf einer großen Platte angebracht waren und gefunden werden mussten) geprüft. Bei einer Beeinträchtigung des Gesichtsfeldes wurde in der Regel zusätzlich untersucht, ob eine Einengung des binokularen Blickfeldes vorlag. Im Gegensatz zum Gesichtsfeld, das den Ausschnitt der Außenwelt darstellt, in dem ein Betrachter bei unveränderter Fixationsstellung der Augen visuelle Reize entdecken kann, umfasst das Blickfeld den Bereich des visuellen Raumes, der unter Zuhilfenahme der Blickbewegungen, aber bei fixiertem Kopf, erfasst werden kann. Bei Patienten mit einem homonymen Gesichtsfeldausfall wird das Blickfeld bestimmt, indem die Patienten aufgefordert werden, auf einen akustischen Reiz die Augen so weit zur Seite des Gesichtsfeldausfalls zu bewegen, bis sie den Reiz erkennen können (ZIHL & VON CRAMON 1986).

³⁰ Die Aufklärung und das schriftliche Einverständnis erfolgten in Übereinstimmung mit der Erklärung von Helsinki.

Zusätzlich wurden drei Patienten in die Stichprobe aufgenommen, die in keiner der beschriebenen Untersuchungsmethoden Auffälligkeiten gezeigt hatten. Aufgrund ihrer Läsionsorte (im Parietallappen bzw. im rechten Frontallappen, vgl. Kapitel 8) konnte man allerdings Beeinträchtigungen bei der visuellen Suche erwarten. Dabei ist es denkbar, dass die durchgeführten Untersuchungen zu grob waren, um leichtere Störungen der räumlich-visuellen Aufmerksamkeit aufdecken zu können. An diesen drei Patienten (ID 89, 153 und 294) kann geprüft werden, ob das hier zur Debatte stehende neue Testverfahren eine größere Sensitivität besitzt.

Tabelle 21 gibt eine Übersicht über die Patientenstichprobe. Neben Alter, Geschlecht, Ätiologie und Orten der Hirnschädigung sind diejenigen Untertests der TAP aufgeführt, in denen der Patient weit unterdurchschnittliche Ergebnisse erzielt hat, sowie auffällige Befunde der orthoptischen Untersuchung. Dabei sind neben Auffälligkeiten in räumlich-visuellen Sehfunktionen solche Befunde in elementaren Sehleistungen angegeben, die die Leistung in der vorliegenden Suchaufgabe beeinträchtigen können. Insbesondere ist dies die Sehschärfe für die Ferne und die Kontrastsensitivität (geprüft mit dem Cambridge Low Contrast Gratings Test), da in der Suchaufgabe Ortsfrequenzunterschiede zu detektieren waren. Mit Hilfe eines Vortests, in dem den Patienten die in der späteren Suchaufgabe enthaltenen Objekte auf einem Blatt Papier vorgelegt wurden, wurden solche Patienten von der Studie ausgeschlossen, die die verwendeten Objekte nicht unterscheiden konnten. Eine Aphasie stellte keinen Ausschlussgrund für den Test dar.

ID	Geschl	Alter	Ätiologie	Läsionsorte					TAP-Untertests mit unterdurchschnittlichem Ergebnis	Räumliche Sehfunktionen				Merkmalssehfunktionen	
				F	T	P	O	Sub		Gesichtsfeld	Blickfeld	Explorationsstörung	Neglect	Sehschärfe	Kontrastsehen
3	m	47	SHT mit DAI						Go-NoGo	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 1,0 L 1,0	o.B.
12	w	21	SHT mit Hypoxie durch Blutungsschock						Geteilte Aufm.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
35	m	22	Rupturiertes Media-aneurysma, ICB		R	R		BG(R)	o.B.	hom. Hem. L Rest-GF 2°	n.d.	mittelgradig	linksseitig	R 1,0 L 1,0	o.B.
43	w	54	SHT mit Kontusionsverletzung	R					Alertness phas	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
50	m	29	SHT mit DAI	R					Alertness ton/phas Geteilte Aufm. Go-NoGo	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 1,0 L 1,0	o.B.
53	m	46	Mediateilinfarkt	L	L	L			o.B.	hom. Quad. RU	o.B.	geringgradig	o.B.	R 0,9 L 1,0	o.B.
70	w	36	Mediateilinfarkt, zerebrale Mikroangiopathie			R		BG(L)	Alertness ton, Go-NoGo	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 0,8 L 0,8	o.B.
71	m	33	SHT mit DAI	L					Alertness ton/phas	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 1,0 L 0,75	o.B.
84	w	20	SHT mit DAI und Blutungen im Hirnstamm	B					Alertness ton/phas Geteilte Aufm. Go-NoGo	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 1,3 L 1,0	o.B.
89	w	38	Anterior-Media-Grenzzoneninfarkt	R					o.B.	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 1,2 L 1,2	o.B.
93	m	54	Posterierteilinfarkt				R		Geteilte Aufm.	Parazentral-skotom L, Ausdehnung 10°-35°	o.B.	o.B.	o.B.	R 1,0 L 1,0	o.B.
108	m	53	Posterierteilinfarkte, Mediateilinfarkt	L	L	L	B		n.d.	hom. Hem. R Rest-GF 3°	n.d.	hochgradig	o.B.	R 0,6 L 1,0	o.B.

SHT = Schädel-Hirn-Trauma
DAI = Diffuse axonale Schädigung
ICB = Intrazerebralblutung

F = Frontallappen
T = Temporallappen
P = Parietallappen
O = Okzipitallappen
Sub = Subkortikal

BG = Basalganglien
CGL = Lateraler Kniehöcker
Pul = Pulvinar
Th = Restlicher Thalamus
SC = Colliculus superior

L = links
R = rechts
B = bilateral
U = unten
O = oben

o.B. = Ohne Befund
n.d. = nicht durchgeführt
hom. Hem. = homonyme Hemianopsie
hom. Quad. = homonyme Quadrantenanopsie
Rest-GF = Restgesichtsfeld auf dem horizont. Meridian

ID	Geschl	Alter	Ätiologie	Läsionsorte					TAP-Untertests mit unterdurchschnittlichem Ergebnis	Räumliche Sehfunktionen				Merkmalssehfunktionen	
				F	T	P	O	Sub		Gesichtsfeld	Blickfeld	Explorationsstörung	Neglect	Sehschärfe	Kontrastsehen
115	w	51	Anterior-Media-Grenzzoneninfarkt	R					o.B.	o.B.	n.d.	o.B.	Verdacht linksseitig	R 1,0 L 0,83	o.B.
120	m	50	Mediateilinfarkt	R		R		BG(R)	Alertness ton Go-NoGo	o.B.	L auf 50° eingengt	mittel- bis schwergradig	linksseitig	R 0,05 L 1,0	reduziert
136	m	67	Posterierteilinfarkt				R		n.d.	hom. Hem. L Rest-GF <1°	auf 25° eingengt	mittelgradig	o.B.	R 0,67 L 0,9	o.B.
140	w	57	Posterierteilinfarkt, zerebrale Mikroangiopathie		L		L	BG(B)	Geteilte Aufm.	hom. Hem. R Rest-GF 0°	auf 40° eingengt	mittelgradig	o.B.	R 0,5 L 1,0	o.B.
153	w	47	Mediateilinfarkt	L	L	L		BG(L)	n.d.	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 1,0 L 1,2	o.B.
174	w	39	SHT mit DAI						Alertness ton/phas Geteilte Aufm.	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 0,8 L 0,9	o.B.
186	w	67	Posterierteilinfarkt, zerebrale Mikroangiopathie		R			CGL(R) Pul(R)	o.B.	hom. Hem. L Rest-GF <2°	n.d.	mittelgradig	o.B.	R 0,8 L 1,0	o.B.
200	m	23	Granulomatöse Enzephalitis					CGL(R) SC(R) Pul(R)	Alertness ton Geteilte Aufm.	hom. Hem L Rest-GF 2,5°	o.B., aber Sakkaden- initiiierungs- störung nach L	mittelgradig	o.B.	R 0,6 L 0,6	reduziert
222	m	59	Posterierteilinfarkt		R		R	Th(R)	Alertness ton/phas	hom. Hem. L Rest-GF ?	L auf 25° eingengt	schwer	linksseitig	R 1,0 L 0,7	o.B.
251	m	49	ICB, zerebrale Mikroangiopathie		R	R		BG(R)	Alertness ton/phas	hom. Hem. L Rest-GF 2-3°	L auf 5° eingengt	schwergradig	linksseitig	R 1,0 L 0,83	o.B.

SHT = Schädel-Hirn-Trauma	F = Frontallappen	BG = Basalganglien	L = links	o.B. = Ohne Befund
DAI = Diffuse axonale Schädigung	T = Temporallappen	CGL = Lateraler Kniehöcker	R = rechts	n.d. = nicht durchgeführt
ICB = Intrazerebralblutung	P = Parietallappen	Pul = Pulvinar	B = bilateral	hom. Hem. = homonyme Hemianopsie
	O = Okzipitallappen	Th = Restlicher Thalamus	U = unten	hom. Quad. = homonyme Quadrantenanopsie
	Sub = Subkortikal	SC = Colliculus superior	O = o.B.en	Rest-GF = Restgesichtsfeld auf dem horizont. Meridian

ID	Geschl	Alter	Ätiologie	Läsionsorte					TAP-Untertests mit unterdurchschnittlichem Ergebnis	Räumliche Sehfunktionen				Merkmals-sehfunktionen	
				F	T	P	O	Sub		Gesichtsfeld	Blickfeld	Explorationsstörung	Neglect	Sehschärfe	Kontrastsehen
259	m	56	ICB, zerebrale Mikroangiopathie		R	R			Alertness ton/phas	hom. Quad. LU Rest-GF 20-30°	o.B.	o.B.	Verdacht linksseitig	R 1,0 L 0,4	o.B.
260	m	45	Posteriorteilinfarkt		R		R		Go-NoGo	hom. Hem. L Rest-GF 0°	LU auf 35° eingengt	gering- bis mittelgradig	o.B.	R 0,4 L 1,2	o.B.
294	m	63	Mediateilinfarkt		L	L		BG(L)	n.d.	o.B.	n.d.	o.B.	o.B.	R 0,8 L 0,8	o.B.
309	w	14	Arteriovenöse Gefäßmissbildung, ICB		L	L			Alertness ton/phas	hom. Hem. R, Rest-GF <1°	RU auf 50° eingengt	mittelgradig	o.B.	R 1,2 L 1,0	o.B.
SHT = Schädel-Hirn-Trauma		F = Frontallappen		BG = Basalganglien		L = links		o.B. = Ohne Befund							
DAI = Diffuse axonale Schädigung		T = Temporallappen		CGL = Lateraler Kniehöcker		R = rechts		n.d. = nicht durchgeführt							
ICB = Intrazerebralblutung		P = Parietallappen		Pul = Pulvinar		B = bilateral		hom. Hem. = homonyme Hemianopsie							
		O = Okzipitallappen		Th = Restlicher Thalamus		U = unten		hom. Quad. = homonyme Quadrantenanopsie							
		Sub = Subkortikal		SC = Colliculus superior		O = o.B.en		Rest-GF = Restgesichtsfeld auf dem horizont. Meridian							

Tabelle 21. Übersicht über die Patientenstichprobe: Alter, Geschlecht, Ätiologie der Läsion, Läsionsorte kortikal und subkortikal, diagnostizierte Störungen der Aufmerksamkeit und der visuellen Wahrnehmung. Bei der Aufmerksamkeit sind diejenigen Untertests der TAP angegeben, in denen der Patient ein weit unterdurchschnittliches Ergebnis (Prozentrang < 10) erreichte. Die Ergebnisse der orthoptischen Prüfung sind unterteilt in räumliche Sehfunktionen und für die Aufgabe relevante Merkmals-Sehfunktionen

Apparatur und Reize

Es wurden die Apparatur und eine Auswahl von Reizen aus Experiment 2 (vgl. Kapitel 5) übernommen und leicht modifiziert. Als Apparatur wurden der PC, der Monitor und der Reduktionstunnel verwendet. Im Gegensatz zu Experiment 2 blieb die Versuchsleiterin jedoch während des gesamten Experimentes im Raum und konnte über einen zweiten Monitor, der außerhalb des Reduktionstunnel aufgestellt war, die Reizdarbietung und die Antworten des Patienten verfolgen. So war sie in der Lage, während der Übungsphase Hilfestellung zu geben und später gegebenenfalls die Motivation der Patienten zu unterstützen, wenn sie ihren eigenen Leistungen zu kritisch gegenüberstanden.

Als Suchobjekte wurden die Schwierigkeitsstufen 1, 3 und 4 der Ortsfrequenzdimension ausgewählt (vgl. Abbildung 18.). Es wurden Suchbilder mit vier, sechs und acht Objekten dargeboten. Die Suchbilder in der Aufgabenbedingung *Suche* entsprachen denen aus Experiment 2. Für die Aufgabenbedingung *Vergleich* wurde allerdings eine Modifikation vorgenommen: In Experiment 2 war das Suchbild für den Vergleich identisch mit dem für die Suche. Die Position des möglicherweise vorhandenen Zielobjektes war jedoch dadurch angekündigt worden, dass das Fixationskreuz nicht in der Mitte, sondern an der zu beachtenden Position erschien. Die Aufmerksamkeit konnte also vor Beginn der Reaktionszeitmessung dorthin verlagert werden. Da anzunehmen ist, dass es Patienten mit Aufmerksamkeitsstörungen und / oder Gesichtsfeldausfall schwer fallen würde, ihre Aufmerksamkeit rechtzeitig zur jeweils angekündigten Position zu verlagern, wurde das Suchbild modifiziert: Das Zielobjekt wurde immer in der Bildschirmmitte, d.h. an der Position des Fixationskreuzes, dargeboten. Zwei Ablenkerobjekte befanden sich links und rechts darunter. So wurde sichergestellt, dass auch Patienten mit Gesichtsfeldausfall oder Störungen der Aufmerksamkeitsverlagerung die interessierende Position fixieren konnten und dabei mindestens ein Vergleichsobjekt in ihrem Blickfeld haben würden. Abbildung 33 gibt Beispiele für die im Patientenexperiment verwendeten Suchbilder.

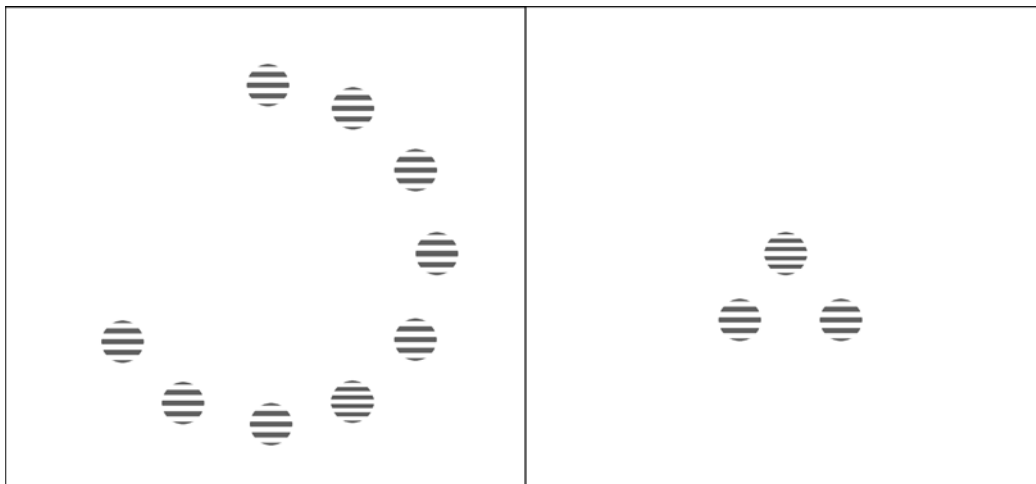


Abbildung 33. Beispiele von Suchbildern im Patientenexperiment für die Aufgabenbedingungen *Suche* (links) und *Vergleich* (rechts).

Versuchsablauf

Die einzelnen Durchgänge liefen wie in Experiment 2 ab: Nach der Darbietung eines Fixationskreuzes in Bildschirmmitte für eine Sekunde erschien das Suchbild, das so lange stehen blieb, bis der Proband eine der beiden Antworttasten drückte. Als Rückmeldung ertönte wie bisher ein hoher bzw. tiefer Signalton. Nach einer Pause von einer Sekunde folgte der nächste Durchgang. Ein Probedurchlauf mit zwei Patienten hatte gezeigt, dass es nicht nötig war, für die Patienten den Ablauf zu verlangsamen. Die Durchgänge waren wie bisher zu Blöcken gleicher Schwierigkeit, Objektanzahl und Aufgabenbedingung zusammengefasst. Falsch beantwortete Durchgänge wurden innerhalb des selben Blockes einmal wiederholt, um möglichst viele auswertbare Durchgänge zu erhalten. Im Gegensatz zu Experiment 2 wurde jeder neue Block durch ein „Probekbild“ angekündigt, in dem außer einem Beispiel eines Suchbildes für den neuen Block seine Charakteristika in Worten genannt waren (z.B. „Stufe 2 – Suche in 4“ oder „Stufe 1 – Vergleich“). Der Schriftzug befand sich in Bildschirmmitte bzw. (beim Vergleich) etwas darüber, und der Teilkreis der Suchobjekte wurde stets in der „besseren“ Gesichtsfeldhälfte des Patienten dargeboten. Alle Probekbilder enthielten das Zielobjekt, und der Patient wurde aufgefordert, dieses zu finden. Erst nach erfolgreicher Erkennung des Zielobjektes (nötigenfalls mit Hilfe) startete die Versuchsleiterin den neuen Block per Mausklick.

Die Blöcke aller zwölf Faktorstufenkombinationen (drei Schwierigkeitsstufen mit je einer Vergleichs- und drei Suchaufgaben (vier, sechs und acht Objekte) bildeten eine Sitzung. Insgesamt bestand das Experiment aus einer Übungs- und zwei Wertungssitzungen. Während der Übungssitzung wurde die Aufgabe erklärt, demonstriert, dann mit Hilfe und schließlich selbstständig durchgeführt. Die Übungssitzung enthielt zehn Durchgänge pro Block, die Wertungssitzungen 20, von denen jeweils die ersten beiden nicht gewertet wurden. Von den verbleibenden 18 Durchgängen war in zwei Dritteln, d.h. zwölf Durchgängen, ein Zielobjekt vorhanden, und nur in einem Drittel der Durchgänge nicht. Dieses Ungleichgewicht diente zur Optimierung der Datenbasis für die Modellanpassung bei möglichst geringer Belastung des Patienten. In der Übungssitzung betrug das Verhältnis allerdings 1 : 1, um die spätere Manipulation nicht so deutlich werden zu lassen. In der Übungs- und der ersten Wertungssitzung wurden die Blöcke in aufsteigender Schwierigkeit präsentiert, d.h. das Experiment begann mit dem Vergleich in der einfachsten Schwierigkeitsstufe und endetet mit der Suche unter acht Objekten der schwierigsten Stufe. In der zweiten Wertungssitzung war die Reihenfolge umgekehrt, so dass das Experiment schließlich wieder mit der einfachsten Aufgabe endete. Alle drei Sitzungen wurden hintereinander mit Pausen von – je nach Bedarf – fünf bis fünfzehn Minuten Dauer durchgeführt. Zusätzlich konnten zwischen den einzelnen Blöcken Pausen eingeschoben werden. Je nach Reaktionszeiten und Pausenbedarf der Patienten betrug die Gesamtdauer des Experimentes 1:15 bis 2:00 Stunden. Obwohl das Experiment damit recht lang und anstrengend war, waren alle bis auf einen Patienten bis zum Schluss sehr motiviert, fühlten sich herausgefordert und zeigten großes Interesse an ihren Ergebnissen, von denen eine Kurzauswertung (Fehler auf den einzelnen Zielreizpositionen sowie Reaktionszeiten in den einzelnen Schwierigkeitsstufen und Objektanzahlen) am Ende präsentiert und besprochen wurde. Einer zu großen Enttäuschung konnte immer dadurch vorgebeugt werden, dass unter der Vielzahl der dargestellten Werte einige gute Leistungen hervorgehoben werden konnten.

Datenanalyse

Die Fehlerraten und Reaktionszeiten wurden wie bisher ausgewertet. Bei den Reaktionszeiten wurde jedoch als zentraler Kennwert jeder Faktorstufenkombination statt des Mittelwertes der Median verwendet. Da bei einer recht geringen Datenmenge (24 Durchgänge mit vorhandenem Zielreiz pro Block) z.T. erhebliche Ausreißerwerte vorkamen. Statt der bisherigen Ausreißerkontrolle wurden nur Reaktionszeiten über zehn Sekunden Dauer ausgeschlossen.

An die Daten wurde anschließend das in dieser Arbeit favorisierte Reaktionszeitmodell angepasst (Prüfung der Objekte in Gruppen, konstante Verlagerungsdauer). Die Werte für die geometrischen Parameter l_n , die nur von der Anordnung der Objekte im Suchbild abhängen, wurden dabei aus Experiment 2 übernommen. Da aufgrund der geringeren Anzahl von Faktorstufen und damit Datenpunkten (zwölf statt 25 in Experiment 2) für eine reliable Modellanpassung die Parameteranzahl reduziert werden musste, wurde nur eine Zeitdauer x für endogene und exogene Verlagerungsschritte (bisher x und y) angenommen. Um der Möglichkeit Rechnung zu tragen, dass der letzte Verlagerungsschritt – in der die Aufmerksamkeit direkt auf das Zielobjekt zentriert wird, obwohl sich dieses bereits innerhalb des Fokus befindet – ausgelassen werden kann, wurden für jeden Patienten zwei Modellanpassungen durchgeführt, eine mit und eine ohne diesen letzten Schritt. Die Parameter aus der besseren der beiden Anpassungen wurden dann übernommen.

Um Lateralisierungen von möglichen Aufmerksamkeitsstörungen zu erkennen, wurden bei allen Patienten mit einer lateralisierten Läsion sämtliche Auswertungen noch einmal getrennt für diejenigen Durchgänge durchgeführt, in denen sich das Zielobjekt im linken bzw. im rechten visuellen Halbfeld befunden hatte. Da in diesen Auswertungen Durchgänge mit Zielobjekten auf dem vertikalen Meridian weggelassen wurden, müssen die Mittelwerte dieser beiden lateralisierten Auswertungen nicht notwendigerweise mit den Ergebnissen der Gesamtauswertung übereinstimmen.

Die Daten der Kontrollprobanden wurden genau so ausgewertet wie der der Patienten. Anschließend wurden sie jedoch zusammengefasst. Hier wurde zunächst geprüft, ob Alterseffekte vorlagen. Sollte sich ein signifikanter Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmendem Alter ergeben, so sollte die Kontrollgruppe entlang ihres Altersmedians in zwei gleich große Untergruppen zerlegt werden. Für die Kontrollgruppe bzw. für jede der beiden Untergruppen wurden dann die Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebniswerte (Fehlerraten, Reaktionszeiten und Modellparameter) berechnet.

9.3.2 Ergebnisse

Fehlerraten und Reaktionszeiten

Abbildung 34 stellt die Fehlerraten und Reaktionszeiten der Patienten denen der Kontrollgruppe gegenüber. Im Mittel machte die Patientengruppe nicht signifikant mehr Fehler als die Kontrollgruppe (6,6 % gegenüber 5,1%; $t(25) = 1,02$; $p = 0,31$). Die mittleren Reaktionszeiten der Patienten waren jedoch ungefähr doppelt so lang wie die der Kontrollprobanden (1853 ms gegenüber 914 ms; $t(25) = 7,4$; $p < 0,001$).

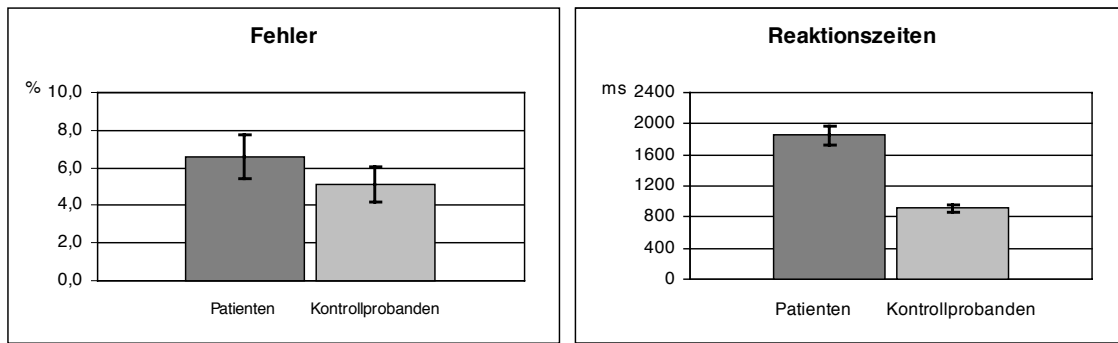


Abbildung 34. Vergleich der Fehlerraten und der Reaktionszeiten von Patienten- und Kontrollgruppe.

In der Kontrollgruppe ergab sich ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen Alter und Reaktionszeit ($r = 0,42$; $p = 0,027$). Abbildung 35 zeigt diesen Zusammenhang. Es wurde ein Median-Split der Kontrollgruppe vorgenommen, aufgrund dessen die Kontrollgruppe in eine jüngere Gruppe ($n = 13$, Alter 15 – 45 Jahre, Mittelwert 31 Jahre) und eine ältere Gruppe ($n = 13$, Alter 47 – 67 Jahre, Mittelwert 55 Jahre) zerfiel.

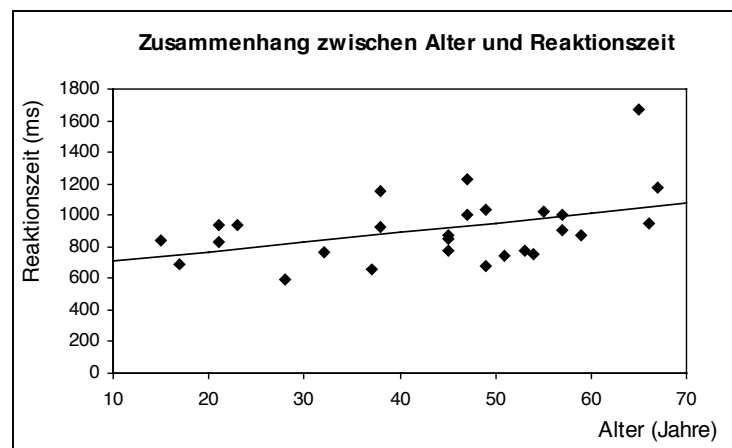


Abbildung 35. Zusammenhang zwischen Alter und Reaktionszeit in der Kontrollgruppe.

Werte der Modellparameter

In den meisten Fällen war die Schätzung der Modellparameter eindeutig möglich. Lediglich in drei Fällen (Patienten 115, 153 und 120) ergab die Modellrechnung mehrere gleichwertige Lösungen. In diesen Fällen wurden diejenigen ausgewählt, die am plausibelsten erschienen (Werte für die konstante Zeit c zwischen 200 und 500 ms).

In der folgenden Tabelle 22 sind die Werte der Modellparameter für die einzelnen Patienten zusammengefasst. Zur Vermeidung einer unübersichtlichen Datenvielfalt wurde dabei die Verweildauer p_s über alle drei Schwierigkeitsstufen s gemittelt. Die Fokusgrößen für die drei Schwierigkeitsstufen $r_{s,n}$ (in Grad visueller Winkel) wurden jeweils über die drei Objektanzahlen n gemittelt. Für Patienten mit einseitiger Läsion sind zusätzlich zum Ergebnis der Gesamtauswertung die Werte der Modellparameter für Zielobjekte in den beiden Gesichtsfeldhälften separat aufgeführt. Die Werte der Patienten im gesamten Suchfeld wurden anhand der Vergleichswerte der jeweils altersentsprechenden Kontrollgruppe bewertet: Für beide Kontrollgruppen sind am Ende der Tabelle Mittelwert und Standardabweichung aufgeführt. Pati-

entenergebnisse wurden dann als weit unterdurchschnittlich bezeichnet, wenn sie unterhalb von Prozentrang 10 der altersentsprechenden Kontrollgruppe lagen. Solche Abweichungen sind in der Tabelle grau markiert. Außerdem wurde bei der lateralisierten Auswertung die Gegenüberstellung von kontra- und ipsiläsionalem Wert als Auffälligkeit grau markiert, wenn der kontraläsionale Wert deutlich schlechter war als der ipsiläsionale (d.h. deutlich längere Zeit bzw. deutlich kleinerer Fokus). Als „deutlich“ wurde ein Unterschied von mehr als $1/3$ des kleineren Wertes bezeichnet. Da bei den Fokusgrößen vielfach Boden- oder Deckeneffekte auftraten, wurde der Unterschied zwischen dem kontra- und dem ipsiläsionalen Fokus bereits dann als auffällig markiert, wenn dies bei einer der drei Fokusgrößen der Fall war. Es wurde bei der Gegenüberstellung kontra- und ipsiläsionaler Parameterwerte das Ausmaß des Unterschiedes bewertet und nicht die Absolutwerte im Vergleich zur Kontrollgruppe, da Letztere nicht unbedingt sinnvoll interpretierbar sind: Ist ein Patient in einem visuellen Halbfeld beeinträchtigt, so beginnt er möglicherweise die Suche immer in seinem „guten“ Halbfeld. Die Modellannahme, dass die Zielreizposition in Bezug auf Position des Suchbeginns gleichverteilt ist, trifft dann zwar noch in Bezug auf das gesamte Suchbild zu, nicht mehr jedoch auf die beiden Untermengen derjenigen Durchgänge, in denen das Zielobjekt sich in jeweils einem der beiden Halbfelder befindet. Das Modell unterschätzt dann Suchzeiten und überschätzt Fokusgrößen im „guten“ Halbfeld und umgekehrt. Das deutlichste Beispiel hierfür findet sich bei Patientin 309 für die Werte der Verlagerungsdauer, die für das gesamte Feld auf 416 ms, für das kontraläsionale Halbfeld auf 816 ms und für das ipsiläsionale Halbfeld auf 0 ms geschätzt wurde. Ein Unterschied der Werte in den beiden Halbfeldern lässt somit immer zwei mögliche Interpretationen zu: Entweder ist die Zeit für Verlagerungen in das kontraläsionale Halbfeld tatsächlich länger / der Fokus kleiner, oder der Patient hat eine einseitige Suchstrategie insofern, dass er die Suche immer im selben Halbfeld beginnt.

Die Patienten wurden in der Tabelle nach Ähnlichkeiten in den Parameterwerten zusammengeordnet.

ID	Ätiologie	Läsionsorte					Räuml. Sehstör.		Verlagerungsdauer x (ms)			Verweildauer p (ms)	Konstante Zeit c (ms)	Fokusgröße r_s (°)								
														Stufe 1		Stufe 2		Stufe 3		Stufe 1		Stufe 2
		F	T	P	O	Sub	H*)	N*)	gesamt	con	ips	gesamt	gesamt	gesamt	con	ips	con	ips	con	ips		
3	SHT mit DAI								144			669	356	> 4	1,8	2,1						
50	SHT mit DAI und Blutungsresiduen	R							378			827	208	> 4	4,3	2,4						
84	SHT mit DAI und Blutungsresiduen	B							271			550	430	> 4	3,1	1,8						
71	SHT mit DAI und Blutungsresiduen	L							449			596	381	3,9	3,2	1,9						
12	SHT mit Hypoxie								302			460	193	> 4	4,4	0,9						
43	SHT mit Kontusionsverletzung	R							108			404	595	> 4	4,4	0,9						
115	Anterior-Media-Grenzzoneninfarkt	R							151	141	165	398	223	3,4	1,5	0,8	3,6	3,1	1,8	1,3	0,8	0,8
89	Anterior-Media-Grenzzoneninfarkt	R							130	129	118	792	219	2,3	0,8	0,9	2,4	2,3	0,9	0,8	1,0	0,9
251	ICB, Mikroangiopathie		R	R		BG(R)	L	L	267	910	132	1459	951+)	3,7	0,8	2,3	4,0	3,7	0,8	0,8	2,5	2,0
35	Rupturiertes Media-aneurysma, ICB		R	R		BG(R)	L	L	140	297	143	600	160	3,2	3,8	0,8	3,7	3,5	3,9	3,9	0,8	0,8
259	ICB, Mikroangiopathie		R	R					46	179	33	282	338	3,8	2,4	0,9	4,6	3,4	2,5	2,4	1,0	0,9
70	Mediateilinfarkte, Mikroangiopathie			R		BG(L)			38	L	R	828	426	3,3	2,3	1,8	L	R	L	R	L	R
153	Mediateilinfarkt	L	L	L		BG(L)			73	271	56	327	455	> 4	0,8	0,8	5,0	5,0	0,9	0,8	0,8	0,8
294	Mediateilinfarkt		L	L		BG(L)			119	234	97	594	300	> 4	0,8	2,3	5,0	5,0	0,9	0,8	1,7	2,0
309	Arteriovenöse Gefäßmissbildung, ICB		L	L			R		426	816	0	608	369	> 4	0,8	0,8	4,6	4,1	0,8	0,9	0,9	1,0
53	Mediateilinfarkt	L	L	L					260	330	210	611	272	> 4	4,0	3,6	5,0	5,0	3,9	3,9	3,6	3,6

ID	Ätiologie	Läsionsorte					Räuml. Sehstör.		Verlagerungsdauer x (ms)			Verweildauer p (ms)	Konstante Zeit c (ms)	Fokusgröße r _s (°)								
														Stufe 1		Stufe 2		Stufe 3		Stufe 1		Stufe 2
		F	T	P	O	Sub	H*)	N*)	gesamt	con	ips	gesamt	c	gesamt	gesamt	gesamt	con	ips	con	ips	con	ips
108	Posteriorteilinfarkte, Mediateilinfarkt	L	L	L	B		R		229	343	75	251	525	> 4	2,1	0,8	5,0	5,0	2,4	3,8	1,0	1,9
140	Posteriorinfarkt, Mikroangiopathie		L		L	BG(B)	R		284	254	153	322	410	> 4	3,4	1,2	3,6	5,0	1,8	3,4	0,9	1,1
200	Granulomatöse Enzephalitis					CGL(R) SC(R) Pul(R)	L		41	258	68	479	268	> 4	1,0	0,8	5,0	5,0	1,4	1,9	0,8	0,8
186	Posteriorteilinfarkt, Mikroangiopathie		R			CGL(R) Pul(R)	L		136	259	191	384	303	> 4	0,9	1,9	5,0	5,0	0,8	1,8	1,0	3,3
222	Posteriorteilinfarkt		R		R	Th(R)	L	L	121	173	108	1109	253	> 4	0,9	1,8	3,6	5,0	1,7	0,8	1,0	1,2
260	Posteriorteilinfarkt		R		R		L		213	199	220	1000	338	2,8	1,9	2,4	2,1	2,6	1,8	1,8	2,4	2,5
136	Posteriorteilinfarkt				R		L		102	117	117	317	388	3,3	1,1	1,0	3,6	3,4	1,1	1,1	1,0	1,7
120	Mediateilinfarkt	R		R		BG(R)		L	224	338	35	554	220	3,5	0,8	2,0	3,5	4,0	0,8	1,2	0,8	2,0
93	Posteriorteilinfarkt				R				69	24	85	344	384	> 4	1,9	1,8	5,0	5,0	1,9	2,4	1,9	1,3
174	SHT mit DAI								35			456	344	> 4	4,7	3,2						
Jüngere Kontrollgruppe		Mittelwert							67			285	267	> 4	2,9	1,6						
		Prozentrang 10							116			497	431	3,8	1,0	0,8						
Ältere Kontrollgruppe		Mittelwert							73			361	320	> 4	3,1	1,7						
		Prozentrang 10							138			620	433	3,8	1,1	0,8						
*) H = Hemianopsie mit Restgesichtsfeld < 4° (Exzentrizität der Suchobjekte); N = Neglect									+) Aufgrund einer schweren amnestischen Störung war der Patient nicht in der Lage, sich die Zuordnung der Antworttasten zu merken. Die Antworten erfolgten verbal und die Versuchsleiterin drückte die Tasten. Der Wert für c wird nicht gewertet.													

Tabelle 22. Werte der Modellparameter für die einzelnen Patienten. Für Patienten mit einseitigen Läsionen sind neben den Parameterwerten der Gesamtauswertung auch die Ergebnisse der getrennten Auswertung der beiden visuellen Halbfelder angegeben. Weit unterdurchschnittliche Ergebnisse bzw. deutliche Unterschiede zwischen kontra- und ipsiläsionalem Halbfeld sind grau markiert. Die Ergebnisse der beiden Kontrollgruppen finden sich zusammengefasst in den letzten Tabellenzeilen.

9.3.3 Diskussion

Praktische Durchführbarkeit und Fehlerraten

Die Suchaufgaben wurden von der überwiegenden Zahl der Patienten gut bewältigt. Dass die Fehlerraten nicht wesentlich über denen der gesunden Kontrollprobanden lagen, deutet darauf hin, dass die Suchschwierigkeit angemessen war. Insbesondere erwies sich die Übungssitzung als geeignet zur Erklärung der Aufgabe. Anhand der praktischen Beispiele hatten auch aphasische Patienten keine Schwierigkeiten, die Aufgabe zu verstehen. Lediglich zwei Patienten machten mehr als 15 % Fehler: Bei Patient 35 lag die Gesamtfehlerrate bei 18,6 %, mit 22,0 % im kontraläsionalen und 15,8 % im ipsiläsionalen Halbfeld. Patient 251 beantwortete insgesamt 23,4 % der Durchgänge falsch, und zwar 43,5 % im kontraläsionalen und 20,6 % im ipsiläsionalen Halbfeld. Beide Patienten litten sowohl unter einer Hemianopsie als auch unter einem Neglectsyndrom. Dies deutet darauf hin, dass der Test zumindest für Patienten mit schwerem Neglect nicht geeignet sein dürfte. Hemianopsie allein stellt dabei kein Problem dar, wie die geringen Fehlerraten der übrigen acht Hemianopsie-Patienten zeigen. Mit 6,3 % lagen sie im Mittel nicht höher als die der übrigen Patienten.

Weiterhin zeigte sich, dass der Test in seiner jetzigen Form für Patienten mit schweren amnestischen Störungen nicht geeignet ist. So konnte Patient 251 sich nicht merken, welche der beiden Antworttasten er jeweils drücken sollte, wenn das Zielobjekt im Suchbild enthalten bzw. nicht enthalten war. Die Aufgabe selbst hatte er jedoch verstanden und war in der Lage, jeweils verbal zu antworten („Ja“ / „Nein“). Da diese Antworten lebenslang überlernt sind, bleiben sie bei Amnesie erhalten, auch wenn das Neulernen von Bedeutungen erschwert oder unmöglich ist. Es wäre daher ratsam, entweder in einem Vortest die diesbezügliche Eignung eines Patienten zu prüfen, um ihn rechtzeitig vom Test auszuschließen, oder den Testaufbau mit einem Voice-Key auszustatten. Da es auch den übrigen Patienten unterschiedlich leicht gefallen sein dürfte, sich die Antworttasten zu merken, sind hierin begründete Fehler, Verlängerungen der Reaktionszeiten sowie Erhöhungen des Parameterwertes für die konstante Zeit c nicht auszuschließen. Zur Steigerung der Testvalidität wäre ein Voice-Key daher vorzuziehen.

Obwohl die meisten Patienten die Testaufgaben als herausfordernd empfanden und sehr motiviert waren, könnte die Testlänge (bis zu zwei Stunden) ein Problem darstellen. Es ist jedoch nicht möglich, die Anzahl der Durchgänge pro Faktorstufenkombination zu reduzieren, da schon in der jetzigen Form die Daten kaum reliabel genug waren, um insbesondere eine separate Auswertung der beiden visuellen Halbfelder zu ermöglichen.³¹ Prinzipiell bieten sich zwei Lösungsmöglichkeiten an, um einerseits die Testdauer zu verkürzen, andererseits die Anzahl der Durchgänge pro experimenteller Bedingung zu erhöhen: Der Test könnte entweder auf mehrere Tage verteilt werden (wie es bei Experiment 2 geschehen ist), oder die Zahl der Faktorstufen müsste reduziert werden. Hier käme ein Verzicht auf die schwierigste Stufe 3 in Frage, da diese aufgrund eines Bodeneffektes keinen zusätzlichen diagnostischen Wert hat (vgl. Tabelle 22). Eine Auswertungsprobe (Modellanpassung der Daten ohne Stufe 3) an-

³¹ Die Probleme bei der Modellrechnung bei drei Patienten könnten auf eine ungenügende Reliabilität der Daten zurückzuführen sein.

hand der Daten von zwei Patienten und zwei Kontrollprobanden ergab, dass bei den Patienten eine reliable Parameterschätzung möglich war, bei den Kontrollprobanden jedoch nicht. Die Ursache lag darin, dass bei den Patienten (Patienten 3 und 89) die Suche in Stufe 2 ineffizient (kleiner Fokus) war, bei den Kontrollprobanden jedoch recht effizient, z.T. gab es hier sogar Pop-Out-Effekte. Bereits in Kapitel 6 war angesprochen worden, dass eine genügende Bandbreite an Sucheffizienzen Voraussetzung für die Modellrechnung ist. Eine Lösungsmöglichkeit könnte darin bestehen, von einer Normierungsstichprobe verschiedene Schwierigkeitsstufen zu erheben (drei oder vier), und für jeden Patienten in einem Vortest zwei Stufen so auszuwählen, dass die Modellrechnung möglich ist und die Ergebnisse maximalen Aufschluss über die Art der Störung bieten. Bei dieser Vorgehensweise sind jedoch unterschiedliche Übungseffekte bei Patienten und Kontrollprobanden zu berücksichtigen. Es könnte weiterhin versucht werden, ein neues Suchbild mit nur zwei Stufen so zu konstruieren, dass eine Stufe bei Gesunden zur Pop-Out-Suche führt und die andere zu einer genügend ineffizienten teilseriellen Suche, ohne gleich zu einem Bodeneffekt zu führen. Hierfür wäre insbesondere ein größeres Suchbild geeignet (größere Exzentrizität, mehr Objekte).

Neben der Testlänge war auch der apparative Aufwand zu hoch, um eine praktische Anwendung in unterschiedlichen klinischen Einrichtungen zu ermöglichen. Hierfür müsste der Test an einem einzigen normalen PC ohne Reduktionstunnel durchführbar sein. Ob dies ohne große Reliabilitätsverluste möglich ist, ist noch zu untersuchen.

Diskussion der Parameterwerte

In den meisten Fällen ergab die Modellrechnung sinnvoll interpretierbare Parameterwerte. Selbst bei der abweichenden Durchführung für Patient 251, bei dem die Versuchsleiterin die Tasten nach verbaler Antwort des Patienten drückte, ergab sich das erwartete Ergebnis: Die konstante Zeit c wurde auf 951 ms geschätzt, mehr als das Doppelte der üblichen Werte. Dass die Parameterschätzung bei drei Patienten nicht eindeutig war (vgl. Abschnitt 9.3.2), kann zwei mögliche Ursachen haben: Entweder waren die Daten nicht reliabel genug, oder die Suchstrategien der Patienten wichen zu stark von den Modellannahmen ab. Es erscheint jedoch nicht einsichtig, weshalb das gerade bei diesen drei Patienten (115, 120 und 153) der Fall sein sollte, da sie hinsichtlich ihrer Läsionen keine Übereinstimmungen aufweisen, die Daten anderer Patienten mit ähnlichen Läsionen jedoch eindeutige Lösungen ermöglicht haben. Die Ursache ist vermutlich eher in einer ungenügenden Datenbasis zu sehen, oder die Patienten haben während des Tests ihre Suchstrategie stark verändert.

22 der 26 Patienten lassen sich zusammenfassen zu Gruppen mit ähnlichen Parameterabweichungen von den Kontrollgruppen. In Tabelle 22 sind diese Gruppen durch Absetzungen in den Tabellenzeilen erkennbar. Im Folgenden werden die Gruppen charakterisiert und mit Bezug auf ihre Läsionen diskutiert. Die Stichprobe war allerdings recht inhomogen bezüglich ihrer Läsionen, und eine Vielzahl entsprechender individueller Besonderheiten spiegelt sich auch in den Parameterwerten wider. Zum Teil ergaben sich hier Untergruppen. Tabelle 23 fasst die Einteilung in Gruppen und Untergruppen, die aufgrund vorhandener bzw. nicht vorhandener Abweichungen in den einzelnen Parametern gebildet wurden, zusammen und gibt auch die Läsionen der Patienten in den einzelnen Gruppen an. Zwei Patienten (70 und 120) ließen sich keiner Gruppe zuordnen, und zwei Patienten (93 und 174) zeigten keinerlei Abweichungen von den Kontrollgruppenwerten.

Grp	Fokus Stufe 1 (Pop-Out)	Fokus Stufe 2	Fokus kontraläs. kleiner als ipsiläs.	Konst. Zeit	Verweildauer	Verlager.-dauer	Verlager. kontraläs. länger als ipsiläs.	Patienten	Läsionen
1	Nein		Ja in mindestens einem dieser Werte			Nein		3, 50, 84, 71, 12, 43	SHT
1a	Nein		Nein	Ja	Ja			3, 50, 84, 71	SHT mit DAI
2	Ja		Nein	Nein				115, 89, 251, 35, 259	Rechtshirinig, nicht okzipital
2a	Ja		Nein	Nein		Ja	Nein	115, 89	Rechts nur frontal
2b	Ja		Nein	Nein			Ja	251, 35, 259	Rechts parietal und temporal
3	Nein	Ja	Nein				Ja	153, 294, 309, 53	Links parietal und temporal
4			Ja					108, 140, 200, 186, 222, 260, 136	Okzipital oder CGL mit Hemianopsie
4a	Nein	Nein	Ja		Nein	Ja	Ja	108, 140	Okzipital mit Hemian. rechts
4b	Nein	Ja	Ja			Nein	Ja	200, 186, 222	CGL mit Hemian. Rechts
4c	Ja		Ja				Nein	260, 136	Okzipital mit Hemian. links

Tabelle 23. Einteilung der Patienten in Gruppen und Untergruppen aufgrund ihrer Parameterabweichungen von den Kontrollgruppen. „Ja“ bedeutet eine Abweichung bei allen Patienten der Gruppe und „Nein“, dass alle Patienten der Gruppe unbeeinträchtigte Werte zeigen. Bei den Untergruppen sind nur zusätzliche Charakteristika zu denen der Gruppe angegeben.

Insgesamt ergaben sich im Hinblick auf die Hirnläsionen der Patienten recht plausible Muster von Parameterwerten. Die eingangs formulierten Kriterien für eine inhaltliche Interpretierbarkeit sind damit erfüllt.

Gruppe 1

Diese Gruppe ist charakterisiert durch Verlängerungen in den Zeitparametern, aber keine Beeinträchtigung der Fokusgröße. Interessanterweise beruhte bei allen sechs Patienten mit diesem Parametermuster die Läsion auf einem Schädel-Hirn-Trauma (SHT), während in keiner der anderen Gruppen ein Patient mit SHT zu finden ist. Innerhalb der Gruppe lässt sich eine Untergruppe (1a) aus vier Patienten definieren, die speziell durch eine verlängerte Verlagerungsdauer sowie eine verlängerte Verweildauer gekennzeichnet ist. Bei diesen vier Patienten (3, 50, 84, 71) war eine diffuse axonale Schädigung (DAI) vermutet worden. Von den beiden übrigen Patientinnen hatte eine (12) eine begleitende hypoxische Enzephalitis, die andere (43) eine rechtsfrontale Kontusionsverletzung. Bei der Hypoxiepatientin war nur die Verlage-

rungsdauer verlängert, bei der Kontusionspatientin nur die konstante Zeit, nicht aber die Verweildauer.

Die Ergebnisse sind kompatibel zu der Metaanalyse von VAN ZOMEREN & BROUWER (1994). Sie verglichen die Leistungen von Patienten mit SHT in verschiedenen Aufmerksamkeitsaufgaben und Reaktionszeitaufgaben mit denen gesunder Kontrollprobanden und stellten fest, dass aufgabenunspezifisch die Reaktionszeiten der Patienten im Mittel ca. um das 1,4fache verlängert waren, sich jedoch keine spezifischen Aufmerksamkeitsdefizite feststellen ließen. Welche Prozesse zu der Reaktionszeitverlangsamung führten, konnten sie nicht feststellen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie geben auf diese Frage einen Hinweis. Insbesondere lassen sie vermuten, dass unterschiedliche Schädigungsformen des SHT zu unterschiedlichen Beeinträchtigungen in Teilprozessen führen. Auch hier sind die gefundenen Beeinträchtigungen nicht unbedingt aufmerksamkeitspezifisch. Die erhöhte Verlagerungsdauer steht vermutlich mit verlängerten Sakkadenlatenzen in Zusammenhang. Es wäre zu prüfen, ob auch die Latenzen anderer, weniger automatisierter Tätigkeiten verlängert sind, oder ob die Beeinträchtigung auf die Okulomotorik beschränkt ist. Die verlängerte Verweildauer deutet auf eine verlangsamte / beeinträchtigte visuelle Verarbeitung der Reizmerkmale oder Schwierigkeiten beim Abgleich mit einer mentalen Zielobjekt-Schablone hin. Erstere Interpretation stimmt mit der von HEINZE u.a. (1992) überein, die ihre EEG-Daten aus einem visuellen Suchexperiment mit SHT-Patienten als Schwierigkeiten bei der Registrierung visueller Merkmale interpretierten. Läsionsspezifische Beeinträchtigungen unterschiedlicher Prozesse sind bisher bei SHT-Patienten nicht beschrieben worden. Die hier vorliegenden Ergebnisse lassen dies vermuten, müssten aber anhand einer größeren Stichprobe überprüft werden.

Das Ergebnismuster stellt insofern eine Validierung des Modells dar, da wie erwartet die Zeitparameter, nicht jedoch die Fokusgröße beeinträchtigt waren.

Gruppe 2

Diese Gruppe ist vor Allem durch einen zu kleinen Fokus in Stufe 1 gekennzeichnet, d.h. die Patienten zeigten selbst in der einfachsten Stufe keinen Pop-Out-Effekt. Dabei zeigten sich zwischen den beiden Halbfeldern keine Unterschiede in der Fokusgröße. Die Zeitparameter waren in unterschiedlichem Maße beeinträchtigt, wobei allerdings die konstante Zeit bei allen Patienten im Normbereich lag. Bezüglich der Läsionen fiel auf, dass alle fünf Patienten dieser Gruppe Läsionen in der rechten Hemisphäre aufwiesen. Betrachtet man die Verlagerungsdauer, so lässt sich die Gruppe weiter unterteilen: Bei zwei Patientinnen (89 und 115; Untergruppe 2a) war die Verlagerungsdauer erhöht, jedoch ohne Unterschied zwischen den visuellen Halbfeldern. Genau bei diesen Patienten betraf die Läsion Teile des Frontallappens. Bei den drei anderen Patienten (251, 35, 259; Untergruppe 2b) war hingegen die Verlagerungsdauer im kontraläsionalen Halbfeld deutlich länger als im ipsiläsionalen. Die Läsion dieser drei Patienten erstreckte sich auf die temporoparietale Region. Bei zwei dieser drei Patienten (35, 251) war zusätzlich ein Neglectsyndrom diagnostiziert worden, und die Läsionen bezogen auch die Basalganglien mit ein. Bei diesen beiden Patienten war zusätzlich zur Verlagerungsdauer auch die Verweildauer stark verlängert.

Das Fehlen des Pop-Out-Effektes bei rechtshirnigen Läsionen (das sich im Übrigen in Gruppe 4 weiter bestätigt, s.u.) passt zu der in Kapitel 8 diskutierten Lateralisierung der Fokusgröße: Ergebnisse aus der Literatur (FINK u.a. 1996; MARTINEZ u.a. 1997), nach denen die rechte Hemisphäre stärker an der globalen visuellen Wahrnehmung (großer Fokus) beteiligt ist, die linke hingegen mehr für die lokale Wahrnehmung zuständig ist, konnten in der vorliegenden Arbeit im fMRT-Experiment bestätigt werden (vgl. Abschnitt 8.4). Die diesbezügliche Gruppierung der Patienten lässt sich in diesen Zusammenhang einordnen: Nach einer rechtshirnigen Gewebsläsion sind die Patienten gezwungen, visuelle Reize linkshemisphärisch zu verarbeiten, was zu einer „Lokalisierung“ der Wahrnehmung, d.h. zu einem zu kleinen Fokus, führt. Da die entsprechenden frontalen und parietalen Rindenareale nicht retinotop organisiert sind, ist es auch einsichtig, dass der Fokus nicht selektiv in einem der beiden Halbfelder stärker beeinträchtigt ist.

Die Beeinträchtigungen in der Verlagerungsdauer waren bei den Patienten mit Parietalläsion (Untergruppe 2b) kontraläsional stärker als ipsiläsional, bei den Frontalhirn-Patienten (Untergruppe 2a) hingegen nicht lateralisiert. Die Lateralisierung der Beeinträchtigung bei den parietalen Läsionen stimmt mit den Befunden zum (raumbezogenen) Neglectsyndrom aus der Literatur (s.o.) und auch dem Modell von BISIACH & VALLAR (1988) überein. Hiernach haben Neglectpatienten Schwierigkeiten, ihre Aufmerksamkeit in das kontraläsionale (linke) Halbfeld zu verlagern, da im intakten linken Parietallappen offenbar nur wenige Neuronen vorhanden sind, die dieses repräsentieren. Es war bereits erwähnt worden, dass eine Lateralisierung der Parameter ihre (rechnerische) Ursache allein schon in einer festen Suchreihenfolge (erst ipsi-, dann kontraläsional) haben kann. Auffällig ist jedoch, dass sowohl bei Patienten mit Frontal- als auch bei zwei der drei mit parietalen Gewebsläsionen die Absolutdauer der Verlagerungen über das gesamte visuelle Feld und zumeist auch die Verweildauer erhöht war. Eine Verlängerung der Verweildauer ergibt sich rechnerisch nur dann, wenn schon in der Vergleichsaufgabe die Objekte sehr lange betrachtet werden, bevor der Patient die Taste drückt. Dies könnte damit erklärt werden, dass das neuronale Netzwerk, das die „Aufmerksamkeit zur Handlungsvorbereitung“ steuert, beeinträchtigt ist. In Kapitel 8 war diskutiert worden, dass an diesem Netzwerk frontoparietale Strukturen beteiligt sind. Ob die verlängerte Verlagerungsdauer speziell bei den Patienten mit frontaler Hirnschädigung auch in einer Beschädigung des frontalen bzw. supplementären Augenfeldes begründet sein kann (vgl. z.B. PIERROT-DESEILLIGNY 1994), müsste durch eine genauere Analyse der Läsionsorte geklärt werden. Die in der Literatur erwähnte „allgemeine Verlangsamung“ von Frontalhirn-Patienten bei Aufmerksamkeitsaufgaben (RUFF 1992) konnte hier zumindest näher spezifiziert werden.

Gruppe 3

Diese Gruppe besteht aus vier Patienten (153, 294, 309, 53), die wie Gruppe 2b eine lateralisierte Verlängerung der Verlagerungsdauer zeigten. Anstatt im Fokus der Pop-Out-Suche (Stufe 1) beeinträchtigt zu sein, wiesen drei der vier Patienten (153, 294, 309) hier eine Reduktion des Fokus in der üblicherweise teilseriellen Suche (Stufe 2) auf, in der sie seriell suchten. Alle Patienten dieser Gruppe hatten linksseitige temporo-parietale Läsionen. Somit stellt diese Gruppe gewissermaßen das linksseitige „Pendant“ zur Gruppe 2b (temporo-parietale Läsionen rechts) dar.

Die Fokusreduktion könnte in dieser Gruppe darin begründet sein, dass bei linkshemisphärischen Läsionen die lokale visuelle Verarbeitung beeinträchtigt ist (s.o.), die Aufgabe in den schwierigeren Stufen jedoch mit der globalen (rechtshemisphärisch vermittelten) Verarbeitung nicht zu lösen ist. So sind die Patienten gezwungen, die Objekte einzeln zu betrachten, und benötigen dazu z.T. auch länger (Patienten 309, 53). Dass bei zwei Patienten die Verweildauer nicht verlängert ist und bei einem der Fokus nicht reduziert, könnte mit Art und Ausdehnung der Läsion zu tun haben. Eine frontale Beteiligung ergab hier keine spezifischen Auswirkungen. Aufgrund der Ergebnisse von Kapitel 8 (nur rechtsfrontale Aktivierung im fMRT-Experiment) wäre zu erwarten, dass linksfrontale Gewebsläsionen bei solchen Patienten zu keinen Beeinträchtigungen in der Aufgabe führen, so lange nicht die Augenfelder betroffen sind.

Interessant war, dass die Patienten mit linksparietaler Schädigung die gleiche lateralisierte Verlängerung der Verlagerungsdauer aufwiesen wie mit rechtsparietaler Läsion (Gruppe 2b). Bei Patientin 309, bei der der Effekt am größten war, hat vermutlich die Hemianopsie dazu beigetragen. Bei den anderen ist die Ursache fraglich. Die Läsion der Basalganglien bei den Patienten 153 und 294 erklärt das Ergebnis nicht auf Anhieb. Ein Vergleich mit der Literatur über Parkinson-Patienten zeigt, dass diese die Aufmerksamkeit zu schnell abwenden (z.B. FILOTEO u.a. 1994), anstatt sie zu lange auf einzelnen Objekten zu belassen. Um hier eine Beziehung herstellen zu können, müssten die Läsionen innerhalb der Interkonnektivitäten der Basalganglien genauer lokalisiert und interpretiert werden. Ob diese Idee erfolgversprechend ist, erscheint jedoch auch deshalb zweifelhaft, da die beiden anderen Patienten der Gruppe, 309 und 53, das gleiche Muster ohne Basalganglien-Läsion aufweisen. So liegt die Ursache wohl doch eher in der parietalen Läsion: Vermutlich beginnen auch Patienten mit linksparietaler Läsion die Suche zunächst im ipsiläsionalen Halbfeld. Möglicherweise ist die Art der Beeinträchtigung ähnlich wie bei rechtsparietaler Läsion, nur subtiler. Vielleicht fällt ihnen das Loslösen der Aufmerksamkeit („disengagement“) und die Verlagerung nach kontraläsional nicht so schwer wie den rechtsparietalen (Neglect)-Patienten, so dass es in einfacheren Aufgaben wie dem Posner-Paradigma zu keiner Auffälligkeit kommt. Eine solche Interpretation ist kompatibel mit dem Neglect-Modell von BISIACH & VALLAR (1988, s.o.), das keinen prinzipiellen Unterschied in der Arbeitsweise der beiden Parietallappen annimmt wie MESULAM (1981), sondern einen graduellen.

Gruppe 4

Das Charakteristikum dieser Gruppe ist ein Unterschied in der Größe des kontraläsionalen gegenüber dem ipsiläsionalen Fokus. Sieben Patienten zeigten diese Auffälligkeit, und alle litten unter einer Hemianopsie, bei der das Restgesichtsfeld kleiner war als das Suchbild. Anhand der übrigen Parameterwerte kristallisieren sich drei Untergruppen heraus:

Bei Gruppe 4a (Patienten 108, 140) zeigte sich zwar ein Fokusunterschied zwischen den beiden Halbfeldern, der Fokus war jedoch insgesamt gegenüber der Kontrollgruppe nicht verkleinert. Dafür war die Verlagerungsdauer verlangsamt und wies wie der Fokus einen Lateralisierungsunterschied auf. Interessanterweise sind diese beiden Patienten genau diejenigen mit einer Läsion im linken Posteriorstromgebiet.

Bei den Patienten der Gruppe 4b (200, 186, 222) war der Fokus nicht nur in den beiden Halbfeldern unterschiedlich groß, sondern auch in der teilseriellen Suche (Stufe 2) insgesamt reduziert, so dass sie vollständig seriell suchten. Umgekehrt zeigte die Verlagerungsdauer hier eine bloße Lateralisierungsdifferenz, ohne in ihrer Absolutdauer beeinträchtigt zu sein. Bei zwei der drei Patienten dieser Untergruppe (200, 186) beruhte die Hemianopsie nicht auf einer kortikalen Schädigung, sondern auf einer subkortikalen Läsion (CGL, Pulvinar des Thalamus). Patient 222 hatte ebenfalls eine Thalamusläsion, wobei hier jedoch auch eine kortikale Läsion und ein funktionelles Neglectsyndrom vorhanden war. In den Parameterwerten unterschied er sich von den beiden anderen durch eine zusätzlich sehr stark verlängerte Verweildauer.

Gruppe 4c (260, 136) zeigte zusätzlich zur Lateralisierung der Fokusgröße eine absolute Fokusreduktion in der einfachsten Stufe und somit ein Fehlen des Pop-Out-Effektes, wie es auch schon in Gruppe 2 zu beobachten war. Dafür waren hier keine Unterschiede in der Verlagerungsdauer nach kontra- bzw. ipsiläsional zu beobachten.

Der Unterschied in der Fokusgröße zwischen den beiden visuellen Halbfeldern bei Hemianopsie ist unmittelbar einsichtig: Der Fokus ist schon physikalisch nach der blinden Seite hin reduziert, und vermutlich machen die Patienten auch kleinere Sakkaden dorthin (MEIENBERG 1981).

Interessant waren die Unterschiede zwischen rechts- und linkshirnigen Läsionen (Gruppen 4c und 4a). Das Muster aus den Gruppen 2 und 3 setzte sich insofern fort, als dass die rechtshirnige Läsion zu einem Verschwinden des Pop-Out-Effektes führte. Die dort angeführte Erklärung könnte auch hier gelten. Weshalb die beiden Patienten mit rechtsokzipitaler, jedoch ohne subkortikale Läsion (Gruppe 4c) keinen Unterschied in der Verlagerungsdauer nach kontra- und ipsiläsional zeigten, ist nicht ohne Weiteres einsichtig. Bei allen anderen Hemianopsie-Patienten (4a und 4b) ist dieser Unterschied vorhanden und erklärbar durch die ebenfalls bereits von MEIENBERG (1981, 1983) beobachtete verlängerte Sakkadenlatenz zur kontraläsionalen Seite, da dorthin die Sakkaden endogen (ohne Reizunterstützung) ausgelöst werden müssen.

Die Gruppe der Hemianopsien mit CGL-/Thalamusbeteiligung (4b) nahm in ihrem Parameternmuster gewissermaßen eine Zwischenstellung zwischen den links- und den rechtsokzipitalen Läsionen ein: Obwohl diese Läsionen ausnahmslos rechts lokalisiert waren, war die Pop-Out-Suche nicht beeinträchtigt. Dafür waren vermutlich die Sakkadenamplituden in beide Richtungen verringert, was sich aus dem allgemein reduzierten Fokus in Stufe 2 schließen lässt. Eine Beeinträchtigung von Sakkaden, die in das kontraläsionale Halbfeld zwar stärker, jedoch auch in das ipsiläsionale Halbfeld beobachtbar ist, beschreiben auch RIZZO & ROBIN (1996). Weder bei MEIENBERG noch bei RIZZO & ROBIN findet sich jedoch eine Differenzierung nach der Ursache der Hemianopsie. Hinweise in diese Richtung sind bestenfalls der Arbeit von ZIHL (1995) zu entnehmen, der feststellte, dass ein Sakkadentraining bei Hemianopsie-Patienten mit Thalamus-Beteiligung nicht so gute Wirkungen zeigte wie bei solchen mit kortikaler Läsion im Posteriorstromgebiet.

Die beiden Patienten mit Hemianopsie aufgrund einer linksokzipitalen Läsion (4a) zeigten insgesamt am deutlichsten das bei einer Hemianopsie erwartete Muster: Sowohl in der Fokusgröße als auch in der Verlagerungsdauer fand sich eine deutliche Differenz zwischen den bei-

den Halbfeldern, wobei die Verlagerungsdauer auch allgemein verlangsamt war. Dies entspricht genau den Beobachtungen von MEIENBERG (1981, 1983), nach denen Sakkadenamplitude und –latenz nach kontraläsional beeinträchtigt waren, die Latenz auch in geringerem Maße nach ipsiläsional. Worauf die Verzögerung nach ipsiläsional zurückzuführen ist, ist nicht ganz klar. Vielleicht manifestiert sich hierin einfach eine allgemeine Unsicherheit oder auch eine bewusstere Steuerung der Augenbewegung.

Weitere Patienten

Die Patienten 70, 120, 93 und 174 konnten keiner der Gruppen eindeutig zugeordnet werden. Bei Patientin 70 liegt das Zuordnungsproblem vermutlich darin, dass sie bilaterale Läsionen aufgrund beidseitiger Infarkte hat, was zu einer „Mischung“ von Parametermustern geführt hat. So entspricht der fehlende Pop-Out-Effekt ihrer rechtsparietalen Läsion (vgl. Gruppe 2). Die Verlagerungsdauer weist jedoch eine Lateralisierung auf, die typisch ist für eine linkshemisphärische Läsion, und die Lateralisierung der Fokusgröße wechselt: Während der größte Fokus (Stufe 1) links kleiner ist als rechts (typisch für die rechtshemisphärische Läsion), zeigt der mittlere Fokus (Stufe 2) keine und der kleinste Fokus (Stufe 3) schließlich die umgekehrte, für eine linkshemisphärische Läsion typische Lateralisierung.

Patient 120 hat eine rechtsparietale Läsion mit Neglect, müsste also eigentlich zu Gruppe 2b gehören. Der fehlende Pop-Out-Effekt passt auch in dieses Muster. Jedoch ist bei ihm, im Gegensatz zu allen in Gruppe 2 eingeordneten Patienten, der Fokus in allen drei Stufen kontraläsional deutlich kleiner als ipsiläsional, was sonst nur bei Patienten mit Hemianopsie (Gruppe 4) der Fall war. Möglicherweise führte bei ihm der Neglect in Zusammenhang mit einer reduzierten Kontrastwahrnehmung (vgl. Tabelle 21) zu ähnlichen Auswirkungen wie eine Hemianopsie.

Die beiden übrigen Patienten, 93 und 174, zeigten überhaupt keine Beeinträchtigungen. Bei 93 war dies im Grunde auch zu erwarten, da seine Läsion mit einem Gesichtsfeldausfall verbunden war, der außerhalb des Suchbildes lag. Patientin 174 hatte ein Schädel-Hirn-Trauma mit DAI, wäre also eigentlich in Gruppe 1 zu erwarten gewesen. Tatsächlich zeigte ihre Verweildauer auch eine Tendenz zur Verlängerung (456 ms bei einem Kontrollgruppenmittelwert von 285 ms), blieb jedoch über dem festgelegten Cut-Off-Wert (497 ms). Interessanterweise war bei ihr die DAI nur sehr diskret ausgeprägt.

Insgesamt ergaben sich recht plausible und interessante Muster von Parameterwerten, die teilweise in ihrer Differenzierung von Störungen und Läsionen über die bisherige Literatur hinausgehen. In den einzelnen Gruppen müssten die Ergebnisse durch größere Fallzahlen abgesichert werden. Zudem ist für eine zuverlässigere Auswertung eine größere Normierungsstichprobe erforderlich. Mit den im ersten Teil dieses Abschnittes diskutierten Modifikationen könnte das Reaktionszeitmodell die Grundlage für ein vielversprechendes diagnostisches Verfahren liefern.

Kapitel 10

Zusammenfassung

In diesem abschließenden Kapitel sollen rückblickend noch einmal die wesentlichen Überlegungen, Experimente und Ergebnisse in übersichtlicher Form zusammengefasst und bewertet werden.

Einleitung und Fragestellung

Thema der vorliegenden Arbeit war die visuelle Suche. Dabei handelt es sich um den aus dem Alltag bekannten Vorgang, die visuelle Szene nach einem bestimmten Objekt, einem Objektmerkmal oder einfach einer Auffälligkeit abzusuchen. In der experimentellen Psychologie stellt die visuelle Suche ein zentrales Paradigma zur Erforschung der visuellen Aufmerksamkeit dar. Typischerweise wird ein Suchbild mit mehreren („Ablenker“-) Objekten präsentiert, und die Versuchsperson hat die Aufgabe, so schnell wie möglich zu entscheiden, ob ein sogenanntes „Zielobjekt“ im Suchbild vorhanden ist. Ausgewertet werden Fehler und Reaktionszeiten. Dabei gibt es verschiedene experimentelle Varianten, die die Suche beeinflussen können, was bei der Bewertung vorhandener und eigener Forschungsergebnisse zu berücksichtigen ist (Kapitel 1). In der vorliegenden Arbeit wurden Suchaufgaben verwendet, bei denen Ziel- und Ablenkerobjekte bekannt waren, das Suchbild so lange sichtbar blieb, bis eine Antwort erfolgte, und die Versuchsperson die Augen frei bewegen durften.

Ziel der Arbeit war es, eine Technik zu entwickeln, mit der die Suchstrategien einzelner Versuchspersonen in einem gegebenen Suchbild qualitativ und quantitativ bestimmt werden können. Insbesondere sollte hierbei die Art der Suchschritte, ihre Abfolge, ihre Anzahl und ihre Dauer angegeben werden. Dazu sollten Reaktionszeitmodelle formuliert und eine experimentelle Anordnung derart konstruiert werden, dass eine Anpassung der Modelle an die empirischen Reaktionszeiten eine Bestimmung oben genannter Parameter ermöglicht. Die Ergebnisse würden zum einen zur Aufklärung einiger derzeit diskutierter Fragen beitragen, zum anderen Anwendungsmöglichkeiten bei der Lokalisation beteiligter Hirnfunktionen sowie in der Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen eröffnen.

Die Modellentwicklung sollte auf bereits existierende formale Modelle der visuellen Suche aufbauen. In Kapitel 2 wurden daher einige formale Suchmodelle vorgestellt, die sich in der bisherigen Forschung als besonders einflussreich erwiesen haben: Die „Feature Integration Theory“ von TREISMAN (TREISMAN & GELADE 1980; TREISMAN & SATO 1990), das „Guided Search“-Modell von WOLFE (CAVE & WOLFE 1990; WOLFE 1994), das SERR-Modell von HUMPHREYS & MÜLLER (1993) sowie das SOS-Modell von GROSSBERG (GROSSBERG,

MINGOLLA & ROSS 1995). Weiterhin wurde ein Überblick über aktuelle Fragestellungen im Forschungsbereich der visuellen Suche gegeben.

In Kapitel 3 wurde erläutert, weshalb die üblichen Methoden der Reaktionszeitanalyse nicht geeignet sind, die oben formulierte Fragestellung zu beantworten.

Die Reaktionszeitmodelle: Experimente 1 und 2

Die Grundidee der hier entwickelten Reaktionszeitmodelle besteht darin, Reaktionszeiten bei Suchaufgaben in die Zeiten aufeinanderfolgender Suchschritte zu zerlegen. Welches die einzelnen Suchschritte sind und von welchen Aufgabenbedingungen sie in welcher Weise abhängen, wird in Modellannahmen formuliert, die auf bestehenden theoretischen Konzepten basieren. Ein Reaktionszeitmodell wird dann in Form einer Reaktionszeitgleichung formuliert. Diese enthält Parameter für die Aufgabeneigenschaften (z.B. Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Ablenkern, Anzahl und geometrische Anordnung der Objekte) und für Verarbeitungseigenschaften der Versuchsperson (z.B. Verlagerungsdauer der Aufmerksamkeit, Verweildauer der Aufmerksamkeit, Dauer der motorischen Reaktion). Es wurde ein experimentelles Paradigma entwickelt, das es erlaubt, die Werte aller Modellparameter in allen experimentellen Bedingungen separat zu schätzen, indem die Reaktionszeitmodelle numerisch an die empirischen Reaktionszeiten angepasst werden. Das Experiment bestand aus Suchbildern verschiedener Schwierigkeit (aufgrund unterschiedlicher Ziel-Ablenker-Ähnlichkeiten) und verschiedener Objektanzahlen. Um eine numerische Lösbarkeit des Problems zu ermöglichen, wurde auf die Modellgleichungen aus der präattentiven Verarbeitungsstufe in WOLFES (1994) *Guided-Search*-Modell zurückgegriffen: Im Zusammenhang mit der hier verwendeten Objektauswahl und -anordnung im Suchbild erlaubte es dieser Ansatz, die gewünschten Parameter aus einem kleineren Satz von Basisparametern zu berechnen.

In Kapitel 4 wurde ein erstes Reaktionszeitmodell formuliert. Bezüglich der Modellannahmen wurde hier zunächst auch für die serielle Verarbeitungsstufe auf *Guided Search* zurückgegriffen und angenommen, dass der Aufmerksamkeitsfokus jeweils nur auf einem Objekt zur Zeit verweilen kann. Um Suchvorgänge mit Augenbewegungen modellieren zu können, wurde *Guided Search* dabei um das neue Konzept einer *Reichweite der Aufmerksamkeit* erweitert. Dieses gibt die Größe desjenigen Bildausschnittes an, auf dem *Guided Search* effektiv operiert. Es wurde angenommen, dass diese Größe mit zunehmender Ähnlichkeit zwischen Ziel- und Ablenkerobjekten abnimmt. In Experiment 1 wurde das Reaktionszeitmodell getestet. Das Ergebnis deutete darauf hin, dass insbesondere die Annahme einer strengen Serialität (Einzelprüfung der Objekte) unzutreffend sein könnte.

Daher wurden in Kapitel 5 zu mehreren der ursprünglichen Modellannahmen Alternativen formuliert und diese in Experiment 2 gegeneinander geprüft. Die Bewertung konkurrierender Modelle - und damit konkurrierender theoretischer Konzepte der visuellen Suche - gründete sich sowohl auf die statistische Güte der Modellanpassung als auch auf inhaltliche Kriterien bezüglich der geschätzten Parameter und Suchstrategien. Es erwies sich ein Modell als überlegen hinsichtlich aller Bewertungskriterien. Dieses Modell beschreibt den Suchvorgang als ein Prüfen der Objekte in Gruppen, wobei die Gruppengröße (= Größe des Aufmerksamkeitsfokus) mit der Suchschwierigkeit, d.h. der physikalischen Ziel-Ablenker-Ähnlichkeit, abnimmt. Spezialfälle stellen dabei einerseits die Pop-Out-Suche dar, bei der alle Objekte eine Gruppe bilden, andererseits die vollständig serielle Suche mit nur einem Objekt pro Gruppe.

Weiterhin nimmt das Modell eine konstante Dauer der Aufmerksamkeitsverlagerung an (unabhängig von der Verlagerungslänge) sowie eine mit der Suchschwierigkeit ansteigende Verweildauer auf den einzelnen Objekten. Im letzten Suchschritt erfolgt meist noch eine explizite Zentrierung der Aufmerksamkeit auf das Zielobjekt. Mit der Entscheidung für dieses Modell waren die Suchstrategien jeder Versuchsperson bestimmt: Die Beschaffenheit und die Abfolge der Suchschritte ist in den Modellannahmen enthalten, und ihre Anzahl und Zeitdauer in den geschätzten Parameterwerten. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde nur noch das eben beschriebene Modell verwendet.

Validierung des Modells: Experiment 3

In Kapitel 6 wurden Betrachtungen zur Validität des Modells angestellt. Insbesondere erschien es fraglich, ob die gute Modellanpassung einen Rückschluss auf die tatsächlichen Suchstrategien zulässt, d.h. ob dasselbe Ergebnis nicht auch mit anderen Reaktionszeitgleichungen hätte produziert werden können, und ob dieselben Reaktionszeitgleichungen nicht auch aus anderen theoretischen Annahmen hätte hervorgehen können. Experiment 3 wurde konstruiert, um das zentrale Konzept des Modells, die variable Reichweite der Aufmerksamkeit (und damit die Fokusgröße), zu validieren. Es wurde explizit geprüft, wie große Gruppen von Objekten die Versuchspersonen in einem Suchschritt verarbeiten konnten, und die Ergebnisse mit den geschätzten Parameterwerten aus der Modellrechnung verglichen. Es ergab sich eine nahezu perfekte Übereinstimmung. Dies lässt den Schluss zu, dass in den vorliegenden Experimenten die Versuchspersonen tatsächlich mit einem Aufmerksamkeitsfokus der postulierten Größe in der vermuteten Reihenfolge gesucht haben. Anzumerken ist, dass die Berechnungen der präattentiven Verarbeitungsstufe, die auf *Guided Search* beruhen und im Verlauf der Arbeit nicht variiert wurden, hiermit nicht validiert wurden. Sie sind aber auch nicht kritisch für das Modell, so weit es den Ablauf der Suche beschreibt, sondern eher für seine numerische Berechenbarkeit.

Visuelle Suche mit und ohne Augenbewegungen: Experiment 4

In Kapitel 7 wurde die Frage untersucht, ob das Modell auch geeignet ist, die *verdeckte* visuelle Suche zu beschreiben, wie sie in der Aufmerksamkeitsforschung überwiegend verwendet wird. Die Versuchspersonen müssen hier während des gesamten Suchvorganges den Bildmittelpunkt fixieren, dürfen also nur einen „inneren Aufmerksamkeitsfokus“ bewegen. Im Experiment führte eine Gruppe von Personen die bisherige Aufgabe durch, während eine andere dieselben Suchbilder ohne Augenbewegungen absuchen sollte. Im Ergebnis machte die Gruppe ohne Augenbewegungen mehr Fehler, war aber auch schneller. Die Modellanpassung war für beide Bedingungen gleich gut. Die Werte der Modellparameter unterschieden sich allerdings insofern, als die Verlagerung der Aufmerksamkeit ohne Augenbewegungen schneller war und der Fokus größer. Es wurde geschlossen, dass die „freie“ Gruppe offenbar tatsächlich Augenbewegungen gemacht hatte, die zwar Zeit gekostet hatten, jedoch nötig waren, um die Objekte in einen Bereich besserer Sehschärfe zu bringen. Daraus erklärt sich die kürzere Verlagerungsdauer ohne Augenbewegungen. Der größere Fokus wurde als eine Art „Notstrategie“ interpretiert: Da die Versuchspersonen die Objekte selbst in der schwierigsten Stufe nicht fokussieren durften und die Sehschärfe dementsprechend nicht ausreichte, hätte ein kleinerer Fokus, also ein Suchen in kleineren Gruppen von Objekten, keine Verbesserung der Genauigkeit gebracht (wie in der Gruppe mit Augenbewegungen), sondern nur Zeit gekostet.

Insgesamt musste offen bleiben, inwieweit die Ergebnisse ein Artefakt der schlechteren Sehbedingungen in der verdeckten Suche waren.

Die Anwendung des Modells bei der Lokalisation von Hirnfunktionen

Das in dieser Arbeit entworfene Suchexperiment und das Reaktionszeitmodell wurden in einem Experiment mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) verwendet, um zu untersuchen, welche Hirngebiete an welchen Teilprozessen der visuellen Suche beteiligt sein könnten. Dazu wurde in Kapitel 8 zunächst eine Einführung in die fMRT mit ihren Möglichkeiten und Problemen sowie ein Überblick über die bisher im Bereich der visuellen Aufmerksamkeit erzielten neurophysiologischen Ergebnisse gegeben. In der Auswertung des fMRT-Experimentes wurden die errechneten Modellparameter mit den gemessenen Aktivierungen in verschiedenen Hirngebieten in Beziehung gesetzt. Es wurde dabei vermutet, dass Hirngebiete, die mit dem Prüfen der Objekte (*Merkmalsaufmerksamkeit*) zu tun haben, in ihrer Aktivierung mit dem Parameter „Verweildauer der Aufmerksamkeit“ korrelieren. Dies zeigte sich für ein Gebiet um den posterioren Sulcus frontalis inferior, den horizontalen Sulcus intraparietalis (SIP), extrastriäre visuelle Areale im Bereich des Gyrus lingualis und Gyrus fusiformis und das prä-supplementärmotorische Areal (Prä-SMA). Bei Hirngebieten, deren Aktivierung mit der Anzahl der Verlagerungen korrelierte, wurde ein Zusammenhang mit der *visuell-räumlichen Aufmerksamkeit* vermutet. Solche Gebiete waren der anteriore Sulcus frontalis inferior, ein anteriores Segment des SIP sowie der anteriore Gyrus cinguli. Weiterhin auffällig war eine mit der Suchschwierigkeit stark ansteigende Aktivierung im Cuneus, die aber in ihrem Verlauf mit keinem der beiden Parameter vollständig einher ging. Damit könnte der Cuneus eine Schnittstelle zwischen den beiden Aufmerksamkeitsnetzwerken darstellen, an dem die Merkmalsaufmerksamkeit auf verschiedene räumliche Positionen angewandt wird. In den extrastriären visuellen Arealen und dem horizontalen SIP zeigten sich zudem bei einigen Versuchspersonen mit der Fokusgröße variierende Lateralisierungen der Aktivierung, die Annahmen aus der Literatur bestätigen, nach denen die rechte Hemisphäre eher auf die Verarbeitung globaler Reize, die linke hingegen auf die lokaler Reize spezialisiert ist.

Klinische Anwendung: Differentialdiagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen

In Kapitel 9 wurde in einer klinischen Studie mit 26 hirngeschädigten Patienten geprüft, ob sich die Suchaufgabe mit dem Reaktionszeitmodell als neuropsychologisches Testverfahren zur Spezifizierung von Aufmerksamkeitsstörungen eignet. Eine etwas modifizierte Form der Aufgabe wurde von den Patienten gut bewältigt. Die Werte der Modellparameter der Patienten wurden mit denen gesunder Kontrollprobanden verglichen. In der Auswertung wurden die Patienten aufgrund von ähnlichen Mustern in Abweichungen von der Kontrollgruppe gruppiert. Es ergaben sich vier Gruppen mit jeweils ein bis drei Untergruppen, wobei die Patienten innerhalb jeder Gruppe erstaunliche Übereinstimmungen hinsichtlich Art und Ort der Läsion aufwiesen: Patienten mit Schädel-Hirn-Trauma waren in den Zeitparametern verlangsamt, hatten jedoch eine normale Fokusgröße. Patienten mit einer rechtshirnigen Läsion hatten einen reduzierten Aufmerksamkeitsfokus in der einfachsten Stufe, waren also zu einer Pop-Out-Suche (Überblicken des gesamten Bildes) nicht in der Lage. Bei Patienten mit einer linkshirnigen Läsion war demgegenüber der Aufmerksamkeitsfokus in der schwierigeren Stufe reduziert, sie suchten also die Objekte einzeln ab statt in Gruppen. Zusätzlich zeigte sich bei parietaler Beteiligung der Läsion jeweils eine verlängerte Verlagerungsdauer der Aufmerksam-

keit nach kontraläsional gegenüber ipsiläsional. Die vierte Gruppe bildeten Patienten, die aufgrund einer Beschädigung der Sehbahn an einer Hemianopsie (halbseitigem Gesichtsfeldausfall) litten. Diese Patienten suchten nach kontraläsional mit einem kleineren Fokus als nach ipsiläsional, wobei meist auch die Verlagerungsdauer nach kontraläsional länger war.

Die Kompatibilität der Ergebnisse mit Befunden aus der neuropsychologischen Literatur sowie die gefundenen Zusammenhänge zwischen Läsionen und spezifischen Beeinträchtigungen in den Suchstrategien lassen das Reaktionszeitmodell geeignet erscheinen für eine prozessorientierte Aufmerksamkeitsdiagnostik. Eine solche könnte einen Ausgangspunkt darstellen für maßgeschneiderte Rehabilitationsmaßnahmen.

Offene Fragen

Obwohl das in dieser Arbeit formulierte Modell die präzise Bestimmung von Suchstrategien erlaubt und sich in verschiedenen experimentellen und anwendungsbezogenen Kontexten bestätigt hat, bleibt eine Reihe von Fragen offen. So sind trotz der erfolgreichen Validierung in Kapitel 6 einige Modellannahmen unhinterfragt geblieben. Insbesondere die Annahme, dass Prozesse wie die initiale Wahrnehmung und die motorische Reaktion in ihrem Zeitbedarf konstant sind, unabhängig von der Aufgabenschwierigkeit, darf angezweifelt werden. Das Modell stellt diesbezüglich eine Vereinfachung dar.

Der entscheidende Nachteil des vorliegenden Modells im Vergleich zu bisherigen Modellen der visuellen Suche ist jedoch in seinem eingeschränkten Geltungsbereich zu sehen: Es beschreibt die Suche nach einem bekannten Zielobjekt unter bekannten, homogenen Ablenkerobjekten in einer regelmäßigen und ebenfalls bekannten geometrischen Anordnung, wobei sich das Zielobjekt nur in einem Merkmal von den Ablenkern unterscheidet. Es ist daher notwendig, diesen Geltungsbereich schrittweise zu erweitern, wobei Modifikationen der Modellannahmen und zusätzliche Parameter unvermeidlich sind. Insbesondere ist anzunehmen, dass Versuchspersonen ihren Fokus nicht mehr auf eine bestimmte Größe voreinstellen, wenn das Suchbild weniger vorhersagbar ist. Zu untersuchen wäre, auf welcher Basis dann Gruppen von Objekten gebildet werden.

Auch die Frage nach der Gültigkeit des Modells für verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen (Suche ohne Augenbewegungen) konnte in dieser Arbeit nicht abschließend beantwortet werden, da die verwendete Aufgabe hierfür zu schwierig war. Der Frage sollte weiter nachgegangen werden, da sich das vorliegende Modell in einem interessanten Punkt – nämlich der Annahme einer beschränkten Reichweite der Aufmerksamkeit und einer darauf beruhenden Fokusgröße – von bisherigen Modellen unterscheidet. Diese waren jedoch zumeist für Suchvorgänge innerhalb einer Fixation formuliert worden (z.B. *Guided Search* von WOLFE (1994) und SERR von HUMPHREYS & MÜLLER (1993)).

Anhang: Mathematische Berechnungen

A 1. Berechnung der Fokusgröße $f_{s,n}$ aus der Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$

Für eine gegebene Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ berechnet sich die Fokusgröße $f_{s,n}$, d.h. die Anzahl der Objektpositionen, die sich innerhalb der Reichweite befinden, aus der Geometrie des Suchbildes. Dabei ist der Zusammenhang zwischen Reichweite und Fokusgröße für die verschiedenen Modellvarianten (vgl. Kapitel 5) unterschiedlich:

Nimmt man eine Suche an, bei der die Aufmerksamkeit den Objekten einzeln zugeteilt wird (Modellannahme (3)), dann gibt die Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ an, wie weit ein Objekt maximal vom Zentrum der Aufmerksamkeit entfernt sein darf, um diese auf sich zu ziehen (im Sinne von „Guided Search“, vgl. Kapitel 4). Die Fokusgröße $f_{s,n}$ ist hier die Zahl der Objekte innerhalb eines Kreises mit dem Radius $r_{s,n}$ um das Zentrum, das jeweils auf einem Objekt liegt (vgl. Abbildung A 1 links).

Nimmt man hingegen an, dass die Aufmerksamkeit Gruppen von Objekten zugeteilt wird, und dass die Gruppengröße im Hinblick auf die Reichweite der Aufmerksamkeit maximal gewählt wird (Annahme (3')), dann ist diese Gruppengröße gleich der Fokusgröße $f_{s,n}$. Sie hängt von der Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ insofern ab, dass eine Objektgruppe nur dann gleichzeitig geprüft werden kann, wenn die von ihr besetzte Fläche im Radius die Reichweite $r_{s,n}$ nicht übersteigt (vgl. Abbildung A 1 rechts). Der Mittelpunkt der Gruppe muss dabei nicht auf einem der Objekte liegen.

Für das in dieser Arbeit verwendete Suchbild errechnet sich $f_{s,n}$ folgendermaßen aus der Geometrie des Suchbildes: n Objekte liegen auf einem Kreisbogen mit dem Radius e („Exzentrizität“) um den Fixationspunkt. Der Zentriwinkel zwischen zwei benachbarten Objekten betrage α . Sei $r_{s,n}$ die Reichweite der Aufmerksamkeit.

Falls $r_{s,n} \geq e$, dann ist $f_{s,n} = n$, da schon zu Beginn der Suche (Aufmerksamkeit auf Fixationspunkt zentriert) alle Objekte innerhalb der Reichweite liegen.

Falls $r < e$, dann sind die beiden Modellvarianten zu unterscheiden:

Variante 1: Modellannahme (3) gilt (Einzelprüfung der Objekte)

Die Aufmerksamkeit wird auf eins der Objekte zentriert. Sei β der Winkel des Kreisabschnittes, den der Kreis mit Radius $r_{s,n}$ aus dem Objektkreis ausschneidet. Dann berechnet sich $f_{s,n}$, die Anzahl der Objektpositionen innerhalb des Kreises mit Radius $r_{s,n}$, als

$$f_{s,n} = \left\lfloor \frac{\beta}{\alpha} \right\rfloor + 1$$

mit

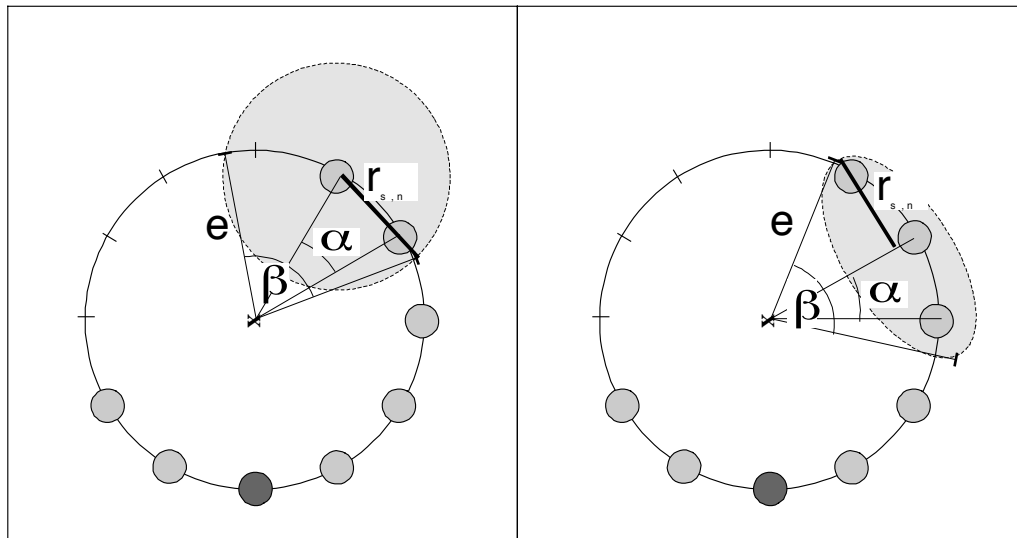


Abbildung A 1. Der Zusammenhang zwischen Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$ und der Fokusgröße $f_{s,n}$ für das in dieser Arbeit verwendete Suchbild, links unter Modellannahme (3) (objektweise Suche), und rechts unter Modellannahme (3') (gruppenweise Suche). Dargestellt ist jeweils der Fall $r < e$ (siehe Text),

$$\frac{r}{2e} = \sin \frac{\beta}{4} \Leftrightarrow \frac{\beta}{4} = \arcsin \frac{r}{2e} \Leftrightarrow \beta = 4 \arcsin \frac{r}{2e},$$

woraus sich

$$f_{s,n} = \left\lfloor \frac{4}{\alpha} \cdot \arcsin \frac{r}{2e} \right\rfloor + 1$$

ergibt.

Variante 2: Modellannahme (3') gilt (Gruppenprüfung der Objekte)

Die Aufmerksamkeit wird derart zentriert, dass innerhalb eines Kreises³² mit dem Radius $r_{s,n}$ maximal viele Objekte liegen. Sei β der Winkel des Kreischnittes, den der Kreis mit Radius $r_{s,n}$ aus dem Objektkreis ausschneidet. Dann berechnet sich $f_{s,n}$, die Anzahl der Objektpositionen innerhalb des Kreises mit Radius $r_{s,n}$, als

$$f_{s,n} = \left\lfloor \frac{\beta}{\alpha} \right\rfloor + 1$$

mit

$$\frac{r}{e} = \sin \frac{\beta}{2} \Leftrightarrow \beta = 2 \arcsin \frac{r}{e}$$

woraus sich

$$f = \left\lfloor \frac{2}{\alpha} \arcsin \frac{r}{e} \right\rfloor + 1$$

ergibt.

³² Die tatsächliche Form des Fokus ergibt sich aus den geometrischen Gegebenheiten des Suchbildes. Im vorliegenden Fall ist er als Ellipse gezeichnet – es könnte sich aber ebenso gut um einen Kreis, eine „Banane“ oder eine Anzahl unzusammenhängender Teilgebiete handeln.

A 2. Berechnung des Erwartungswertes der Anzahl der Suchschritte

Da die Berechnung relativ umfangreich ist, soll sie hier explizit nur für die erste Modellvariante (vgl. Kapitel 4) durchgeführt werden. Für die in Kapitel 5 formulierten Modellvarianten erfolgt sie analog.

In der ersten Modellvariante wurde die mittlere Reaktionszeit in einer experimentellen Bedingung (s, n) (s = Schwierigkeit, beruhend auf der Zielreiz-Ablenker-Ähnlichkeit, und n = Objektanzahl) modelliert als

$$E(RT_{s,n}) = e(p) \cdot p_s + e(x) \cdot x + c$$

wobei p_s die Verweildauer der Aufmerksamkeit auf einem Objekt, x die Verlagerungsdauer der Aufmerksamkeit und c die konstante Zeit bezeichnet. $e(p)$ und $e(x)$ sind dabei die Erwartungswerte der Anzahlen der Schritte p_s bzw. x über alle positiven Durchgänge der experimentellen Bedingung (s, n) . Diese Erwartungswerte resultieren aus zwei unabhängigen Zufallsprozessen:

(1) der Position des Zielobjektes in Bezug auf den Startpunkt der Suche. Diese Zufallsvariable ist gleichverteilt über die Werte 1 bis n .

(2) der Reichweite der Aufmerksamkeit $r_{s,n}$. Diese Zufallsvariable ist normalverteilt (siehe Abschnitt 4.2.1, Modellannahme (2)).

Somit können $e(p)$ und $e(x)$ geschrieben werden als $e(p) = e_2(e_1(p))$ und $e(x) = e_2(e_1(x))$, wobei e_1 und e_2 die Erwartungswerte bezeichnen, die sich aus den mit (1) und (2) bezeichneten Zufallsprozessen ergeben (d.h. $e_1(\dots)$ ist der Erwartungswert der Anzahl der betreffenden Suchschritte über alle Zielreizpositionen, und $e_2(\dots)$ ist der Erwartungswert der betreffenden Suchschritte über alle Reichweiten der Aufmerksamkeit.).

Zu (1): Berechnung von $e_1(x)$ und $e_1(p)$, d.h. der Erwartungswerte der Anzahl der Verlagerungs- bzw. Verweilschritte über alle Zielreizpositionen (die Abfolge der Schritte ist detailliert in Abschnitt 4.2.1 und Abbildung 13 beschrieben):

Sei f die Fokusgröße (Anzahl Objekte innerhalb der Reichweite der Aufmerksamkeit, s.o.), und sei $i := \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor$ die Anzahl Objekte, die übersprungen werden, wenn die Aufmerksamkeit vom Zielobjekt angezogen und direkt dorthin bewegt wird. Für einen Durchgang mit einer gegebenen Reichweite der Aufmerksamkeit und somit einer gegebenen Fokusgröße sind drei mögliche Fälle zu unterscheiden:

Fall 1: $f \leq 2$ (vollständig serielle Suche)

In Abhängigkeit von der Zielreizposition in Bezug zum Suchbeginn beträgt die Anzahl der Schritte und ihre Wahrscheinlichkeit

Zielreizposition	Wahrscheinlichkeit	Anzahl von Schritten x	Anzahl von Schritten p
1	$1/n$	1	1
2	$1/n$	2	2
...
n	$1/n$	n	n

Somit ergeben sich die Erwartungswerte der Schrittzahlen als

$$e_1(x) = (1 + 2 + \dots + n) \cdot \frac{1}{n} = \frac{n \cdot (n+1)}{2} \cdot \frac{1}{n} = \frac{n+1}{2}$$

$$e_1(p) = \frac{n+1}{2}$$

Fall 2: $3 \leq f \leq \lceil \frac{\pi}{\alpha} \rceil$ (teilserielle Suche)

In Abhängigkeit von der Zielreizposition in Bezug zum Suchbeginn beträgt die Anzahl der Schritte und ihre Wahrscheinlichkeit

Zielreizposition	Wahrscheinlichkeit	Anzahl von Schritten x	Anzahl von Schritten p
1	$1/n$	1	1
2	$1/n$	2	1
3	$1/n$	$3-i+1$	$3-i$
4	$1/n$	$4-i+1$	$4-i$
...
n	$1/n$	$n-i+1$	$n-i$

Somit ergeben sich die Erwartungswerte der Schrittzahlen als

$$e_1(x) = (1 + 2 + (3-i+1) + (4-i+1) + \dots + (n-i+1)) \cdot \frac{1}{n} = \frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot (i+1)}{n}$$

$$= \frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot \left\lfloor \frac{f-1}{2} \right\rfloor + 1}{n}$$

$$e_1(p) = (1 + 1 + (3-i) + (4-i) + \dots + (n-i)) \cdot \frac{1}{n} = \frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot i + 1}{n}$$

$$= \frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot \left\lfloor \frac{f-1}{2} \right\rfloor + 1}{n}$$

Fall 3: $f \geq \lceil \frac{\pi}{\alpha} \rceil + 1$ (Pop-Out-Suche)

In Abhängigkeit von der Zielreizposition in Bezug zum Suchbeginn beträgt die Anzahl der Schritte und ihre Wahrscheinlichkeit

Zielreizposition	Wahrscheinlichkeit	Anzahl von Schritten x	Anzahl von Schritten p
1	$1/n$	1	1
2	$1/n$	1	1
...
n	$1/n$	1	1

Somit ergeben sich die Erwartungswerte der Schrittzahlen als

$$e_1(x) = 1$$

$$e_1(p) = 1$$

Zusammenfassung:

$$e_1(x) = \begin{cases} \frac{n+1}{2}, & \text{falls } f \leq 2 \\ \frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot \left(\lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1\right)}{n}, & \text{falls } 3 \leq f \leq \lceil \frac{\pi}{\alpha} \rceil \\ 1, & \text{falls } f \geq \lceil \frac{\pi}{\alpha} \rceil + 1 \end{cases}$$

$$e_1(p) = \begin{cases} \frac{n+1}{2}, & \text{falls } f \leq 2 \\ \frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot \left(\lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1\right)}{n}, & \text{falls } 3 \leq f \leq \lceil \frac{\pi}{\alpha} \rceil \\ 1, & \text{falls } f \geq \lceil \frac{\pi}{\alpha} \rceil + 1 \end{cases}$$

Zu (2): Berechnung von $e_2(e_1(x))$ und $e_2(e_1(p))$, der Erwartungswerte der eben berechneten Erwartungswerte über alle Reichweiten der Aufmerksamkeit:

Die Reichweite der Aufmerksamkeit r ist normalverteilt mit einem Mittelwert $\mu(r)$ und einer Standardabweichung $\sigma(r)$. Sei $f(r)$ die Dichte dieser Normalverteilung und $F(r)$ die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung von r . Abbildung A 2 verdeutlicht, wie sich die Wahrscheinlichkeiten für Fokusgrößen f (und die entsprechenden Suchstrategien) aus der Wahr-

scheinlichkeitsdichte $f(r)$ ergeben. Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Erwartungswertberechnung verwendet.

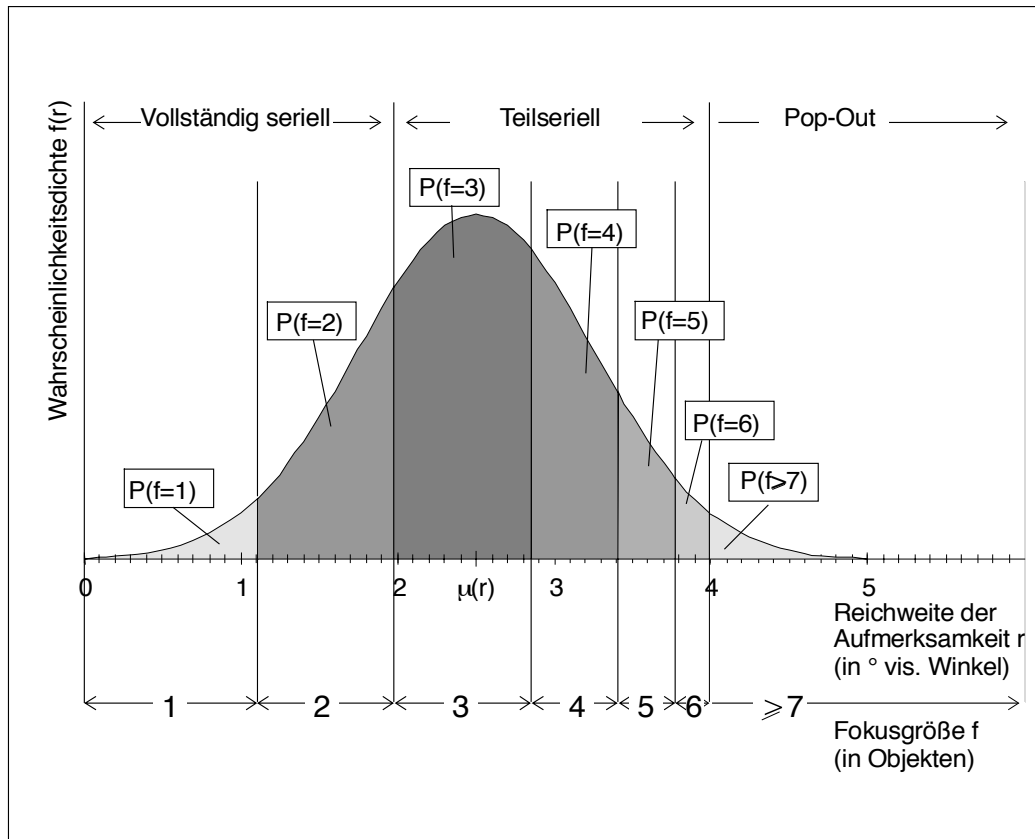


Abbildung A 2. Wahrscheinlichkeitsdichte der Aufmerksamkeit und daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Fokusgrößen und Suchstrategien.

Die Erwartungswerte $e_2(e_1(x))$ und $e_2(e_1(p))$ ergeben sich aus den oben berechneten $e_1(x)$ und $e_1(p)$, indem die Anzahl der Schritte für die oben genannten drei Fälle jeweils mit der Wahrscheinlichkeit dieser Fälle gewichtet und aufsummiert wird. Diese Wahrscheinlichkeit entnehme man Abbildung A 2.

$$\begin{aligned}
 e(x) &= e_2(e_1(x)) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot P(f \leq 2) + \left(\frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1}{n} \right) \cdot P(3 \leq f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) + 1 \cdot P(f \geq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot P(f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) - \frac{(n-2) \cdot \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1}{n} \cdot P(3 \leq f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) + P(f \geq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot P(f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) + P(f \geq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) - \frac{n-2}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left(\lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot P(f = i) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot \int_{-\infty}^e f(r) dr + \int_e^{\infty} f(r) dr - \frac{n-2}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left(\lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot \int_{e \cdot \sin\left(\frac{i-1}{2} \cdot \alpha\right)}^{e \cdot \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \alpha\right)} f(r) dr \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot F(e) + (1 - F(e)) - \frac{n-2}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left(\lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot (F(e \cdot \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \alpha\right)) - F(e \cdot \sin\left(\frac{i-2}{2} \cdot \alpha\right))) \\
 &= 1 + \frac{n-1}{2} \cdot F(e) - \frac{n-2}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left(\lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot (F(e \cdot \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \alpha\right)) - F(e \cdot \sin\left(\frac{i-2}{2} \cdot \alpha\right)))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e(p) &= e_2(e_1(p)) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot P(f \leq 2) + \left(\frac{n+1}{2} - \frac{(n-2) \cdot \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1}{n} \right) \cdot P(3 \leq f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) + 1 \cdot P(f \geq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot P(f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) - \frac{(n-2) \cdot \lfloor \frac{f-1}{2} \rfloor + 1}{n} \cdot P(3 \leq f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) + P(f \geq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot P(f \leq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) + P(f \geq \lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor) - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left((n-2) \cdot \lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot P(f = i) \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot \int_{-\infty}^e f(r) dr + \int_e^{\infty} f(r) dr - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left((n-2) \cdot \lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot \int_{e \cdot \sin\left(\frac{i-1}{2} \cdot \alpha\right)}^{e \cdot \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \alpha\right)} f(r) dr \\
 &= \frac{n+1}{2} \cdot F(e) + (1 - F(e)) - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left((n-2) \cdot \lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot (F(e \cdot \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \alpha\right)) - F(e \cdot \sin\left(\frac{i-2}{2} \cdot \alpha\right))) \\
 &= 1 + \frac{n-1}{2} \cdot F(e) - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=3}^{\lfloor \frac{\pi}{\alpha} \rfloor} \left((n-2) \cdot \lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor + 1 \right) \cdot (F(e \cdot \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \alpha\right)) - F(e \cdot \sin\left(\frac{i-2}{2} \cdot \alpha\right)))
 \end{aligned}$$

Literaturverzeichnis

- ABEL, L.A., TROOST, B.T. & DELL'OSSO, L.F. (1983). The effects of age on normal saccadic characteristics and their variability. *Vision Research*, **23**, 33-37.
- AGUIRRE, G.K., ZARAHN, E. & D'ESPOSITO, M. (1998). The variability of human, BOLD hemodynamic responses. *Neuroimage*, **8**, 360-369.
- ALLPORT, D.A. (1987). Selection for action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. In: H. HEUER & A.F. SANDERS (Hrsg.), *Perspectives on perception and action*, 395-419, Hillsdale: Erlbaum.
- ALLPORT, D.A. (1993). Attention and control: Have we been asking the wrong question? In: D.E. MEYER & S. KORNBLUM (Hrsg.), *Attention and performance*, **14**, 183-218. Cambridge, MA:MIT Press.
- ALLPORT, D.A., ANTONIS, B. & REYNOLDS, P. (1972). On the division of attention: A disproof of the single channel hypothesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **24**, 225-235.
- ANDERSEN, R.A. (1995). Encoding of Intention and Spatial Location in the Posterior Parietal Cortex. *Cerebral Cortex*, **5**, 457-469.
- ANDERSEN, R.A. (1999). Attention to intentions in the posterior parietal cortex. In: *3rd Annual Vision Research Conference: Pre-attentive and attentive Mechanisms in Vision, Abstract Book*, 71. Amsterdam: Elsevier.
- ARGUIN, M. & BUB, D. (1993). Modulation of the directional attention deficit in visual neglect by hemispatial factors. *Brain & Cognition*, **22**, 148-160.
- ARGUIN, M., JOANETTE, Y. & CAVANAGH, P. (1993). Visual Search for Feature and Conjunction Targets with an Attention Deficit. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **5**, 436-452.
- ASHBRIDGE, E., WALSH, V. & COWEY, A. (1997). Temporal aspects of visual search studied by trans-cranial magnetic stimulation. *Neuropsychologia*, **35**, 1121-1131.
- AUGUSTINE, J.R. (1996). Circuitry and functional aspects of the insular lobe in primates including humans. *Brain Research Reviews*, **22**, 229-244.
- BABINSKY, R., SPISKE, K., NEUFERT, C., ENGEL, H. & MARKOWITSCH, H.J. (1996). Attentional Dysfunctions Following Left Parietal Infarction. *Neurology, Psychiatry and Brain Research*, **4**, 139-142.

- BÄCKER, A. & PERAL, E. (1999). Does visual search have a memory? A mathematical framework suggests current experimental paradigm is not conclusive. In: *3rd Annual Vision Research Conference: Pre-attentive and attentive Mechanisms in Vision, Abstract Book*, 134. Amsterdam: Elsevier.
- BEASON-HELD, L.L., PURPURA, K.P., KRASUSKI, J.S., MAISOG, J.M., DALY, E.M., MANGOT, D.J., DESMOND, R.E., OPTICAN, L.M., SCHAPIRO, M.B. & VANMETER, J.W. (1998). Cortical regions involved in visual texture perception: A fMRI study. *Cognitive Brain Research*, **7**, 111-118.
- BEATTY, J. (1988). Pupillometric signs of selective attention in man. In: G.C. GALBRAITH, M.L. KIETZMAN u.a. (Hrsg.), *Neurophysiology and psychophysiology: Experimental and clinical applications*. Hillsdale: Erlbaum.
- BEHRMANN, M., WATT, S., BLACK, S.E. & BARTON, J.J.S. (1997). Impaired Visual Search in Patients with Unilateral Neglect – An Oculographic Analysis. *Neuropsychologia*, **35**, 1445-1458.
- BERENSON, M.L. (1976). A useful k sample test for monotonic relationships in completely randomized designs. *SCIMA-Journal of Management Science and applied Cybernetics*, **5**, 2-16.
- BERENSON, M.L. (1982). A comparison of several k sample tests for ordered alternatives in completely randomized designs. *Psychometrika*, **47**, 265-280.
- BISIACH, E. & VALLAR, G. (1988). Hemineglect in Humans. In: F. BOLLER & J. GRAFMAN (Hrsg.). *Handbook of Neuropsychology*, Vol. I. Amsterdam: Elsevier.
- BOCH, R.A. & GOLDBERG, M.E. (1989). Participation of prefrontal neurons in the preparation of visually guided eye movements in the rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, **61**, 1064-1084.
- BOYNTON, G.M., ENGEL, S.A., GLOVER, G.H. & HEEGER, D.J. (1996). Linear Systems Analysis of Functional Magnetic Resonance Imaging in Human V1. *The Journal of Neuroscience*, **16**, 4207-4221.
- BREFCZYNSKI, J.A. & DEYOE, E.A. (1999). A physiological correlate of the 'spotlight' of visual attention. *Nature Neuroscience*, **2**, 370-374.
- BRENT, M. (1973). *Algorithms for minimization without derivatives*. New York: Prentice Hall.
- BROADBENT, D.E. (1958). *Perception and communication*. London, New York: Pergamon Press.
- BRUCE, C.J. & GOLDBERG, M.E. (1985). Primate frontal eye fields. I. Single neurons discharging before saccades. *Journal of Neurophysiology*, **53**, 603-635.
- BUSHNELL, M.C., GOLDBERG, M.E. & ROBINSON, D.L. (1981). Behavioral enhancement of visual responses in monkey cerebral cortex. I. Modulation in posterior parietal cortex related to selective visual attention. *Journal of Neurophysiology*, **46**, 755-772.

- CARRASCO, M., EVERT, D.L., CHANG, I. & KATZ, S. M. (1995). The eccentricity effect: Target eccentricity affects performance on conjunction searches. *Perception & Psychophysics*, **57**, 1241-1261.
- CAVE, K.R. & WOLFE, J.M. (1990). Modeling the role of parallel processing in visual search. *Cognitive Psychology*, **22**, 225-271.
- CHEAL, M.L. & LYON, D.R. (1992). Attention in visual search: multiple search classes. *Perception & Psychophysics*, **52**, 113-138.
- CHUN, M.M. & WOLFE, J.M. (1996). Just say no: How are visual searches terminated when there is no target present. *Cognitive Psychology*, **30**, 39-78.
- CLARK, V.P., MAISOG, J.M. & HAXBY, J.V. (1998). fMRI study of Face Perception and Memory Using Random Stimulus Sequences. *Journal of Neurophysiology*, **79**, 3257-3265.
- CLARK, V.P., PARASURAMAN, R., KEIL, K., KULANSKY, R., FANNON, S., MAISOG, J.M., UNGERLEIDER, L.G. & HAXBY, J.V. (1997). Selective attention to face identity and color studied with fMRI. *Human Brain Mapping*, **5**, 293-297.
- COHEN, A. & IVRY, R.B. (1991). Density effects in conjunction search: Evidence for a coarse location mechanism of feature integration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **17**, 891-901.
- CORBETTA, M. (1998). Frontoparietal cortical networks for directing attention and the eyes to visual locations: Identical, independent, or overlapping neural systems? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95**, 831-838.
- CORBETTA, M., AKBUDAK, E., CONTURO, T.E., SNYDER, A.Z., OLLINGER, J.M., DRURY, H.A., LINENWEBER, M.R., PETERSEN, S.E., RAICHLE, M.E., VAN ESSEN, D.C. & SHULMAN, G.L. (1998). A common network of functional areas for attention and eye movements. *Neuron*, **21**, 761-773.
- CORBETTA, M., MIEZIN, F.M. SHULMAN, G.L., & PETERSEN, S.E. (1993). A PET study of visuospatial attention. *The Journal of Neuroscience*, **13**, 1202-1226.
- CORBETTA, M., MIEZIN, F.M., DOBMEYER, S., SHULMAN, G.L. & PETERSEN, S.E. (1991). Selective and divided attention during visual discriminations of shape, color, and speed: functional anatomy by positron emission tomography. *Journal of Neuroscience*, **11**, 2383-2402.
- COSLETT, H.B., STARK, M., RAJARAM, S. & SAFFRAN, E.M. (1995). Narrowing the Spotlight – A Visual Attentional Disorder in Presumed Alzheimer’s Disease. *Neurocase*, **1**, 305-318.
- COULL, J.T. & FRITH, C.D. (1998). Differential activation of right superior parietal cortex and intraparietal sulcus by spatial and nonspatial attention. *Neuroimage*, **8**, 176-187.
- COULL, J.T., FRACKOWIAK, R.S.J. & FRITH, C.D. (1998). Monitoring for target objects: activation of right frontal and parietal cortices with increasing time on task. *Neuropsychologia*, **36**, 1325-1334.

- CRAMON, D.Y. & BUBLAK, P. (1997). Zur Funktion des räumlich-visuellen Arbeitsgedächtnisses. In: B. ROCKSTROH, T. ELBERT & H. WATZL (Hrsg.), *Impulse für die klinische Psychologie*, 29-41. Göttingen: Hogrefe.
- CREMONA-MEEYARD, S.L. & GEFFEN, G.M. (1994). Event-related potential indices of visual attention following moderate to severe closed head injury. *Brain injury*, **8**, 541-558.
- CRICK, F. & KOCH, C. (1990). Some reflections on visual awareness. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, **55**, 953-962.
- CRONIN-GOLOMB, A. & BRAUN, A.E. (1997). Visuospatial Dysfunction and Problem-Solving in Parkinson's Disease. *Neuropsychology*, **11**, 44-52.
- DECKEL, A.W. (1994). Carbon monoxide poisoning and frontal lobe pathology: Two case reports and a discussion of the literature. *Brain injury*, **8**, 345-356.
- DEHAENE, S. (1989). Discriminability and dimensionality effects in visual search for featural conjunctions: A functional pop out. *Perception & Psychophysics*, **46**, 72-80.
- DESIMONE, R. & DUNCAN, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, **18**, 193-222.
- DEUBEL, H. & SCHNEIDER, W.X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, **36**, 1827-1837.
- DEYOE, E.A., BANDETTINI, P., NEITZ, J., MILLER, D. & WINANS, P. (1994). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) of the human brain. *Journal of Neuroscience Methods*, **54**, 171-187.
- DEYOE, E.A., CARMAN, G.J., BANDETTINI, P., GLICKMAN, S., WIESER, J., COX, R., MILLER, D. & NEITZ, J. (1996) Mapping striate and extrastriate visual areas in human cerebral cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93**, 2382-2386.
- DISTLER, C., BOUSSAOU, D., DESIMONE, R. & UNGERLEIDER, L.G. (1993). Cortical connections of inferior temporal area TEO in macaque monkeys. *Journal of Comparative Neurology*, **334**, 125-150.
- DRIVER, J., MATTINGLEY, J.B., RORDEN, C. & DAVIS, G. (1997). Extinction as a Paradigm Measure of Attentional Bias and restricted Capacity Following Brain Injury. In: P. Thier & H.O. Karnath (Hrsg.): *Parietal Lobe Contributions to Orientation in 3D Space*. Heidelberg: Springer.
- DUNCAN, J. & HUMPHREYS, G.W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, **96**, 433-458.
- DUNCAN, J. (1981). Directing attention in the visual field. *Perception & Psychophysics*, **30**, 90-93.

-
- DYMOND, R., NORRIS, D., POLLMANN, S. & ZYSSET, S. (1999). Application of Double Voxel Functional Spectroscopy to Event-Related Cognitive Experiments. *Magnetic Resonance in Medicine*, **41**, 217-223.
- EFRON, R. & YUND, E.W. (1996). Spatial Nonuniformities in visual search. *Brain and Cognition*, **31**, 331-368.
- EGETH, H.E. & YANTIS, S. (1997). Visual attention: Control, representation and time course. *Annual Review of Psychology*, **48**, 269-297.
- EGLIN, M., ROBERTSON, L.C. & KNIGHT, R.T. (1991). Cortical substrates supporting visual search in humans. *Cerebral Cortex*, **1**, 262-272.
- EGLIN, M., ROBERTSON, L.C., KNIGHT, R.T. & BRUGGER, P. (1994). Search deficits in neglect patients are dependent on size of visual scene. *Neuropsychology*, **8**, 451-463.
- ENGEL, F.L. (1976). Visual conspicuity, visual search and fixation tendencies of the eye. *Vision Research*, **17**, 95-108.
- ENNS, J.T. (1990). Three-dimensional features that pop out in visual search. In: D. BROGAN (Hrsg.), *Visual search*. London: Taylor and Francis.
- ERIKSEN, C.W. & COLLINS, J.F. (1969). Temporal course of selective attention. *Journal of Experimental Psychology*, **80**, 251-264.
- ERIKSEN, C.W. & YEH, Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **11**, 583-597.
- ESTES, W.K. & TAYLOR, H.A. (1966). Visual detection in relation to display size and redundancy of critical elements. *Perception & Psychophysics*, **1**, 9-16.
- FELLEMAN, D.J. & VAN ESSEN, D.C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate Cerebral Cortex , **1**, 1-47.
- FIEZ, J.A., RAICHLE, M.E., MIEZIN, F.M., PETERSEN, S.E., TALLAL, P. & KATZ, W.F. (1995). PET Studies of Auditory and Phonological Processing: Effects of Stimulus Characteristics and Task Demands. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **7**, 357-375.
- FILOTEO, J.V., DELIS, D.C., DEMADURA, T.L., SALMON, D.P. ET AL. (1994). Abnormally rapid disengagement of covert attention to global and local stimulus levels may underlie the visuoperceptual impairment in Parkinson's patients. *Neuropsychology*, **8**, 210-217.
- FILOTEO, J.V., WILLIAMS, B.J., RILLING, L.M. & ROBERTS, J.W. (1997). Performance of Parkinson's disease patients on the Visual Search and Attention Test: Impairment in single-feature but not dual-feature visual search. *Archives of Clinical Neuropsychology*, **12**, 621-634.

- FINK, G.R., HALLIGAN, P.W., MARSHALL, J.C., FRITH, C.D., FRACKOWIAK, R.S.J & DOLAN, R.J. (1996). Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature*, **382**, 626-628.
- FINK, G.R., DOLAN, R.J., HALLIGAN, P.W., MARSHALL, J.C. & FRITH, C.D. (1997). Space-based and object-based visual attention: shared and specific neural domains. *Brain*, **120**, 2013-2028.
- FLYNN, F.G., BENSON, D.F. & ARDILAS, A. (1999). Anatomy of the insula – functional and clinical correlates. *Aphasiology*, **13**, 55-78.
- FOLK, C.L. & EGETH, H. (1989). Does the identification of simple features require serial processing? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **15**, 97-110.
- FRISTON, K.J., JOSEPHS, O., REES, G. & TURNER, R. (1998). Nonlinear Event-Related Responses in fMRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, **39**, 41-52.
- GOTTLIEB, J., POWELL, K.D. & GOLDBERG, M. (1999). The interactions of saccades and attention in the parietal lobe. In: *3rd Annual Vision Research Conference: Pre-attentive and attentive Mechanisms in Vision, Abstract Book*, 72. Amsterdam: Elsevier.
- GRATTON, G. (1997). Attention and probability effects in the human occipital cortex: an optical imaging study. *Neuroreport*, **8**, 1749-1753.
- GREENWOOD, P.M., PARASURAMAN, R. & ALEXANDER, G.E. (1997). Controlling the focus of spatial attention during visual search – effects of advanced aging and Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, **11**, 3-12.
- GROSSBERG, S. (1994). 3-D-vision and figure-ground separation by visual cortex. *Perception & Psychophysics*, **55**, 48-120.
- GROSSBERG, S., MINGOLLA, E. & ROSS, W.D. (1994). A Neural Theory of Attentive Visual Search: Interactions of Boundary, Surface, Spatial, and Object Representations. *Psychological Review*, **101**, 470-489.
- HADJIKHANI, N. & ROLAND, P.E. (1998). Cross-Modal Transfer of Information between the Tactile and the Visual Representations in the Human Brain: A Positron Emission Tomographic Study. *The Journal of Neuroscience*, **18**, 1072-1084.
- HEIDE, W. & KÖMPF, D. (1997). Cortical bedingte Störungen der Okulomotorik. In: G. HUFFMANN, H.J. BRAUNE, C. FRITZ & W. RÖSSY (Hrsg.), *Vegetativum, Schlaf, Schmerz. Einhorn*.
- HEIDE, W., BLANKENBURG, M., ZIMMERMANN, E. & KÖMPF, D. (1995). Cortical Control of Double-Step Saccades: Implications for Spatial Orientation. *Annals of Neurology*, **38**, 739-748.

-
- HEINZE, H.J., HINRICHS, H., SCHOLZ, M., BURCHERT, W. & MANGUN, G.R. (1998). Neural mechanisms of global and local processing – a combined PET and ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **10**, 485-498.
- HEINZE, H.J., MUNTE, T.F., GOBIET, W., NIEMANN, H. & RUFF, R.M. (1992). Parallel and Serial Visual Search after Closed Head Injury – Electrophysiological Evidence for Perceptual Dysfunctions. *Neuropsychologia*, **30**, 495-514.
- HIKOSAKA, O., SAKAMOTO, M., & USUI, S. (1989). Functional properties of monkey caudate neurons. I. Activities related to saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology*, **61**, 780-798.
- HILLYARD, S.A. & ANLLO-VENTO, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95**, 781-787.
- HOOGE, I.T.C. & ERKELENS, C.J. (1996). Control of fixation duration in a simple search task. *Perception & Psychophysics*, **58**, 969-976.
- HOROWITZ, T. & WOLFE, J.M. (1998). Visual search has no memory. *Nature*, **394**, 575-577.
- HUMPHREYS, G., RIDDOCH, M.J., QUINLAN, P.T., PRICE, C.J. & DONNELLY, N. (1992). Parallel pattern processing and visual agnosia. Special Issue: Object perception and scene analysis. *Canadian Journal of Psychology*, **46**, 377-416.
- HUMPHREYS, G.W. & MÜLLER, H.J. (1993). Search via recursive rejection (SERR): A connectionist model of visual search. *Cognitive Psychology*, **25**, 43-110.
- HUMPHREYS, G.W., QUINLAN, P.T. & RIDDOCH, M.J. (1989). Grouping processes in visual search: Effects with single- and combined-feature targets. *Journal of Experimental Psychology: General*, **118**, 258-279.
- HUSAIN, M., SHAPIRO, K., MARTIN, J. & KENNARD, C. (1997). Abnormal Temporal Dynamics of Visual Attention in Spatial Neglect Patients. *Nature*, **385**, 154-156.
- JACOBS, A.M. (1987). Towards a model of eye movement control in visual search. In: J.K. O'REGAN & A. LEVY-SCHOEN (Hrsg.), *Eye movements: From physiology to cognition*. Amsterdam: North-Holland.
- KAHNEMAN, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- KANWISHER, N., MCDERMOTT, J. & CHUN, M.M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience*, **17**, 4302-4311.
- KARNATH, H.O. (1994). Spatial Limitation of Eye-Movements During Ocular Exploration of Simple Line-Drawings in Neglect Syndrome. *Cortex*, **30**, 319-330.

- KAWASHIMA, R., SATOH, K., GOTO, R., INOUE, K., ITOH, M. & FUKUDA, H. (1998). The role of the left inferior temporal cortex for visual pattern discrimination – A PET study. *Neuroreport*, **9**, 1581-1586.
- KERKHOFF, G., MUNSINGER, U. & MEIER, E.K. (1994). Neurovisual rehabilitation in cerebral blindness. *Archives of Neurology*, **51**, 474-481.
- KERKHOFF, G., MUNSINGER, U., HAAF, E., EBERLE-STRAUSS, G. & STOGERER, E. (1992). Rehabilitation of Homonymous Scotomas in Patients with Postgeniculate Damage of the Visual System – Saccadic Compensation Training. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **4**, 245-254.
- KIM Y.H., GITELMAN, D.R., NOBRE, A.C., PARRISH, T.B., LABAR, K.S. & MESULAM, M.M. (1999). The large-scale neural network for spatial attention displays multifunctional overlap but differential asymmetry. *Neuroimage*, **9**, 269-277.
- KLEIN, R. & FARRELL, M. (1989). Search performance without eye movements. *Perception & Psychophysics*, **46**, 476-482.
- KLEINSCHMIDT, A. & FRAHM, J. (1997). Linking Cerebral Blood Oxygenation to Human Brain Function: Current Issues for Human Neuroscience by Magnetic Resonance Neuroimaging. In: A. VILLRINGER & U. DIRNAGEL (Hrsg.), *Optical Imaging of Brain Function and Metabolism 2*, 221-233. New York, London: Plenum Press.
- KOSSLYN, S.M. (1994). *Image and Brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- KRENDEL, E.S. & WODINSKY, J. (1960). Visual search in an unstructured visual field. *Journal of the Optical Society of America*, **50**, 562-568.
- KRUGGEL, F. & LOHMANN, G. (1996). BRIAN (brain image analysis) – a toolkit for the analysis of multimodal brain datasets. In: H. Lemke, M. Vannier, K. Inamura & A. Farman (Hrsg.), *Computer Assisted Radiology. Proceedings of the International Symposium on Computer and Communication Systems for Image Guided Diagnostics and Therapy, Paris*. Amsterdam: Elsevier.
- KULJIS, R.O. (1994). Lesions in the Pulvinar in Patients with Alzheimer's Disease. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology*, **53**, 202-211.
- KWAK, H., DAGENBACH, D. & EGETH, H. (1991). Further evidence for a time-independent shift of the focus of attention. *Perception & Psychophysics*, **49**, 473-480.
- KWONG, K., BELLIVEAU, J., CHESLER, D., GOLDBERG, I., WEISSKOFF, R., PONCELET, B., KENNEDY, D., HOPPEL, B., COHREN, M., TURNER, R., CHENG, H., BRADY, T. & ROSEN, B. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **89**, 5675-5679.

- LADAVAS, E., CARLETTI, M. & GORI, G. (1994). Automatic and voluntary orienting of attention in patients with visual neglect: Horizontal and vertical dimensions. *Neuropsychologia*, **32**, 1195-1208.
- LE, T.H., PARDO, J.V. & HU, X.P. (1998). 4 T-fMRI study of nonspatial shifting of selective attention – cerebellar and parietal contributions. *Journal of Neurophysiology*, **79**, 1535-1548.
- LEE, DK., KOCH, C. & BROWN, J. (1997). Spatial vision threshold in the near absence of attention. *Vision Research*, **37**, 2409-2418.
- LEZAK, M.D. (1995). *Neuropsychological assessment* (3rd ed.). New York: Oxford University Press.
- LUNA, B., THULBORN, K.R., STROJWAS, M.H., MCCURTAIN, B.J., BERMAN, R.A., GENOVESE, C.R. & SWEENEY, J.A. (1998). Dorsal Cortical Regions Subserving Visually Guided Saccades in Humans – an fMRI Study. *Cerebral Cortex*, **8**, 40-47.
- MACKWOTH, N.H., KAPLAN, I.T. & METLAY, W. (1964). Eye movements during vigilance. *Perceptual and Motor Skills*, **20**, 549-554.
- MADDOX, W.T., FILOTEO, J.V., DELIS, D.C. & SALMON, D.P. (1996). Visual selective attention deficits in patients with Parkinson's disease – a quantitative model-based approach. *Neuropsychology*, **10**, 197-218.
- MALACH, R., REPPAS, J.B., BENSON, R.R., KWONG, K.K., JIANG, H., KENNEDY, W.A., LEDDEN, P.J., BRADY, T.J., ROSEN, B.R. & TOOTELL, R.B.H. (1995). Object-related activity revealed by functional magnetic resonance imaging in human occipital cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **92**, 8135-8139.
- MANGUN, G.R., HOPFINGER, J.B., KUSSMAUL, C.L., FLETCHER, E.M. & HEINZE, H.J. (1997). Covariations in ERP and PET measures of spatial selective attention in human extrastriate visual cortex. *Human Brain Mapping*, **5**, 273-279.
- MARTINEZ, A., MOSES, P., FRANK, L., BUXTON, R. ET AL. (1997). Hemispheric asymmetries in global and local processing: Evidence from fMRI. *Neuroreport*, **8**, 1685-1689.
- MCKEEFRY, D.J. & ZEKI, S. (1997). The position and topography of the human colour centre as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Brain*, **120**, 2229-2242.
- MEIENBERG, O. (1983). Clinical examination of saccadic eye movements in hemianopia. *Neurology*, **33**, 1311-1315.
- MEIENBERG, O., ZANGEMEISTER, W.H., ROSENBERG, M., HOYT, W.F. & STARK, L. (1981). Saccadic Eye Movement Strategies in Patients with Homonymous Hemianopia. *Annals of Neurology*, **9**, 537-544.

- MENON, R.S., LUKNOWSKY, D.C. & GATI, J.S. (1998). Mental Chronometry Using Latency-Resolved Functional fMRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95**, 10902-10907.
- MESULAM, M.M. (1981). A Cortical Network for Directed Attention and Unilateral Neglect. *Annual of Neurology*, **10**, 309-325.
- MESULAM, M.M. (1990). Large-scale Neurocognitive Networks and Distributed Processing for Attention, Language and Memory. *Annual of Neurology*, **28**, 597-613.
- MILNER, A.D. & GOODALE, M.A. (1993). Visual pathways to perception and action. In: T.P. Hicks, S. Molotchnikoff & T. Ono (Hrsg.), *Progress in Brain Research*, **95**. Amsterdam: Elsevier.
- MORAWSKI, , T.B., DRURY, C.G. & KARWAN, M.H. (1980). Predicting search performance for multiple targets. *Human Factors*, **22**, 707-718.
- MORDKOFF, T.J., YANTIS, S. & EEGH, H.E. (1990). Detecting conjunctions of color and form in parallel. *Perception & Psychophysics*, **48**, 157-168.
- MORROW, L.A. (1994). Cuing attention: Disruption following organic solvent exposure. *Neuropsychology*, **8**, 471-476.
- MÜLLER, H.J. & HUMPHREYS, G.W. (1991). Luminance-increment detection: Capacity-limited or not? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **17**, 107-124.
- MÜLLER, H.J. & RABBITT, P.M.A. (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**, 315-330.
- MÜLLER, H.J., HELLER, D. & ZIEGLER, J. (1995). Visual search for singleton feature targets within and across feature dimensions. *Perception & Psychophysics*, **57**, 1-17.
- MÜLLER, H.J., HUMPHREYS, G.W. & DONNELLY, N. (1994). Search via Recursive Rejection (SERR): Visual Search for Single and Dual Form-Conjunction Targets. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **20**, 235-258.
- NAKAYAMA, K. & SILVERMAN, G.H. (1986). Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, **320**, 264-265.
- NAKAYAMA, K. (1999). Preattentive vision: ready for retirement? In: *3rd Annual Vision Research Conference: Pre-attentive and attentive Mechanisms in Vision, Abstract Book*, 53. Amsterdam: Elsevier.
- NEISSER, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York: Appleton, Century, Crofts.
- NEUMANN, O. (1987). Beyond Capacity: A functional view of attention. In: H. HEUER & A.F. SANDERS (Hrsg.), *Perspectives on perception and action*, 395-419, Hillsdale: Erlbaum.

-
- NEUMANN, O. (1990). Visual attention and action. In: O. NEUMANN & W. PRINZ (Hrsg.), *Relationships between perception and action: Current approaches*, 227-267. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer.
- NEUMANN, O. (1992). Theorien der Aufmerksamkeit: Von Metaphern zu Mechanismen. *Psychologische Rundschau*, **43**, 83-101.
- NOBRE, A.C., SEBESTYEN, G.N., GITELMAN, D.R., MESULAM, M.M., FRACKOWIAK, R.S.J. & FRITH, C.D. (1997). Functional localization of the system for visuospatial attention using positron emission tomography. *Brain*, **120**, 515-533.
- NOTHDURFT, H.C. (1998). Probing attentional shifts in visual search. *Perception (Supplement)*, **27**, 38.
- OGAWA, S. & LEE, T. (1990). Magnetic resonance imaging of blood vessels at high fields: in vivo and in vitro measurements and image simulation. *Magnetic Resonance in Medicine*, **16**, 9-18.
- PARASURAMAN, R., GREENWOOD, P.M. & ALEXANDER, G.E. (1995). Selective impairment of spatial attention during visual search in Alzheimer's disease. *Neuroreport*, **6**, 1861-1864.
- PASHLER, H. (1987). Detecting conjunctions of color and form: Reassessing the serial search hypothesis. *Perception & Psychophysics*, **41**, 191-201.
- PAUS, T. (1996). Review. Location and function of the human frontal eye-field: A selective review. *Neuropsychologia*, **34**, 475-483.
- PETERSEN, S.E., ROBINSON, D.L. & KEYS, W. (1985). Pulvinar nuclei of the behaving rhesus monkey: visual responses and their modulation. *Journal of Neurophysiology*, **54**, 867-886.
- PETERSEN, S.E., ROBINSON, D.L. & MORRIS, J.D. (1987). Contributions of the pulvinar to visual spatial attention. *Neuropsychologia*, **25**, 97-105.
- PETIT, L., COURTNEY, S.M., UNGERLEIDER, L.G. & HAXBY, J.V. (1998). Sustained activity in the medial wall during working memory delays. *Journal of Neuroscience*, **18**, 9429-9437.
- PIERROT-DESEILLIGNY, C. (1994). Saccade and Smooth-Pursuit Impairment After Cerebral Hemispheric Lesions. *European Neurology*, **34**, 121-134.
- POLLMANN, S. & ZAIDEL, E. (1998). The role of corpus callosum in visual orienting: importance of interhemispheric visual transfer. *Neuropsychologia*, **36**, 763-774.
- POLLMANN, S., WEIDNER, R., MÜLLER, H.J. & VON CRAMON, D.Y. (eingereicht). A fronto-posterior network involved in visual dimension changes. *Journal of Cognitive Neuroscience*.
- POSNER, M.I. & PETERSEN, S.E. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*, **13**, 25-42.

- POSNER, M.I. & SNYDER, C.R.R. (1975). Attention and cognitive control. In: R. SOLSO (Hrsg.), *Information processing and cognition: The Loyola symposium*, 55-85. Potomac: Erlbaum.
- POSNER, M.I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **32**, 3-25.
- RAFAL R.D. & POSNER, M.I. (1987). Deficits in human visual spatial attention following thalamic lesions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **84**, 7349-7353.
- RIBOT, T. (1906). *Psychologie d'attention*. Paris: Felix Alcan.
- RICHER, F. & BEATTY, J. (1987). Contrasting Effects of Response Uncertainty on the Task-Evoked Pupillary Response and Reaction Time. *Psychophysiology*, **24**, 258-262.
- RICHMOND, B.J. & SATO, T. (1987). Enhancement of inferior temporal neurons during visual discrimination. *Journal of Neurophysiology*, **58**, 1292-1306.
- RIZZO, M. & ROBIN, D.A. (1996). Bilateral Effects of Unilateral Visual Cortex Lesions in Human. *Brain*, **119**, 951-963.
- ROBERTSON, L., TREISMAN, A., FRIEDMAN-HILL, S. & GRABOWECKY, M. (1997). The interaction of spatial and object pathways: Evidence from Balint's syndrome. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **9**, 295-317.
- ROBINSON, D.A. (1964). The mechanisms of human saccadic eye movement. *Journal of Physiology*, **174**, 245-264.
- ROLAND, P. (1993). *Brain activation*. New York: Wiley-Liss.
- ROSEN, A.C., RAO, S.M., CAFFARA, P., SCAGLIOI, A., BOBHOLZ, J.A., WOODLEY, S.J., HAMMEKE, T.A., CUNNINGHAM, J.M., PRIETO, T.E. & BINDER, J.R. (1999). Neural Basis of Endogenous and Exogenous Spatial Orienting: A Functional MRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **11**, 135-152.
- RUBIN, E. (1921). *Die Nichtexistenz der Aufmerksamkeit. Bericht über den 9. Kongreß für experimentelle Psychologie (Jena)*, 211-212.
- RUFF, R.M., NIEMANN, H., ALLEN, C.C., FARROW, C.E. ET AL. (1992). The Ruff 2 and 7 Selective Attention Test: A neuropsychological application. *Perceptual & Motor Skills*, **75**, 1311-1319.
- SAGI, D. & JULESZ, B. (1985). Fast noninertial shifts of attention. *Spatial Vision*, **2**, 141-149.
- SAKAI, K., WATANABE, E., ONODERA, Y., UCHIDA, I., KATO, H., YAMAMOTO, E., KOIZUMI, H. & MIYASHITA, Y. (1995). Functional mapping of the human colour centre with echo-planar magnetic resonance imaging. *Proceedings of the Royal Society of London (Biology)*, **261**, 89-98.

-
- SANDERS, A.F. & NEUMANN, O. (1996). *Einleitung*. In: O. NEUMANN & A.F. SANDERS (Hrsg.), *Aufmerksamkeit*. Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, Serie II, Band 2, 1-6.
- SCHEIER, C., KHURANA, B., ITTI, L., KOCH, C. & SHIMOJO, S. (1999). VISUAL SEARCH: AMNESIC OR MEMORY-DRIVEN? In: *3rd Annual Vision Research Conference: Pre-attentive and attentive Mechanisms in Vision, Abstract Book*, 130. Amsterdam: Elsevier.
- SCHNEIDER, W. & SHIFFRIN, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search and attention. *Psychological Review*, **84**, 1-66.
- SCINTO, L.F.M., DAFFNER, K.R., CASTRO, L. & WEINTRAUB, S. (1994). Impairment of Spatially Directed Attention in Patients with Probable Alzheimer's Disease as Measured by Eye-Movements. *Archives of Neurology*, **51**, 682-688.
- SERENO, M.I., DALE, A.M., REPPAS, J.B., KWONG, K.K., BELLIVEAU, J.W., BRADY, T.J., ROSEN, B.R. & TOOTELL, R.B.H. (1995). Borders of Multiple Areas in Humana Revealed by Functional Magnetic Resonance Imaging. *Science*, **268**, 889-893.
- SHIFFRIN, R.M. & SCHNEIDER, W. (1997).). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, **84**, 127-190.
- SHULMAN, G.L., REMINGTON, R.W. & MCLEAN, J.P. (1979). Moving attention through visual space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **5**, 522-526.
- SNYDER, L.H., BATISTA, A.P. & ANDERSEN, R.A. (1997). Coding of intention in the parietal cortex. *Nature*, **386**, 167-170.
- SOMERS, D.C., DALE, A.M., SEIFFERT, A.E. & TOOTELL, R.B.H. (1999). Functional MRI reveals spatially specific attentional modulation in human primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **96**, 1663-1668.
- SPITZER, H., DESIMONE, R., & MORAN, J. (1988). Increased attention enhances both behavioral and neuronal performance. *Science*, **240**, 338-340.
- SPRREN, O. & STRAUSS, E. (1998). *A Compendium of Neuropsychological Tests*. New York: Oxford University Press.
- STABLUM, F., LEONARDI, G., MAZZOLDI, M., UMILTA, C. ET AL. (1994). Attention and control deficits following closed head injury. *Cortex*, **30**, 603-618.
- STARK, M.E., GRAFMAN, J. & FERTIG, E. (1997). A restricted 'spotlight' of attention in visual object recognition. *Neuropsychologia*, **9**, 1233-1249.
- STERNBERG, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, **153**, 652-654.
- STERNBERG, S. (1969). Memory-scanning: Mental processes revealed by reaction-time experiments. *American Scientist*, **57**, 421-457.

- STRINGER, A.Y. (1996). *A Guide to Adult Neuropsychological Diagnosis*. Philadelphia: Davis.
- TALAIRACH, J. & TOURNOUX, P. (1988). *Co-Planar Stereotactic Atlas of the Human Brain. 3-Dimensional Proportional System: An Approach to Cerebral Imaging*. Stuttgart: Thieme.
- THAISS, L. & DEBLAISER, R. (1992). Visual Agnosia: A Case of reduced Attentional 'Spotlight'? *Cortex*, **28**, 601-621.
- THEEUWES, J. (1992). Perceptual selectivity for color and form. *Perception & Psychophysics*, **51**, 599-606.
- THEEUWES, J. (1993). Visual selective attention: A theoretical analysis. *Acta Psychologica*, **83**, 93-154.
- THEEUWES, J., KRAMER, A.F. & ATCHLEY, P. (1999). Attentional effects on preattentive vision: Spatial precues affect the detection of simple features. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 341-347.
- TOOTELL, R.B.H., DALE, A.M., SERENO, M.I. & MALACH, R. (1996). New images from human visual cortex. *Trends in Neuroscience*, **19**, 481-489.
- TOOTELL, R.B.H., HADJIKHANI, N., HALL, E.K., MARRETT, S., VANDUFFEL, W., VAUGHAN, J.T. & DALE, A.M. (1998). The retinotopy of visual spatial attention. *Neuron*, **21**, 1409-1422.
- TOWNSEND, J.T. (1971). A note on the identification of parallel and serial processes. *Perception & Psychophysics*, **10**, 161-163.
- TREISMAN, A. & GELADE, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, **12**, 97-136.
- TREISMAN, A. & GORMICAN, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, **95**, 15-48.
- TREISMAN, A. & SATO, S. (1990). Conjunction search revisited. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 459-478.
- TSAL, Y. (1983). Movement of attention across the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **9**, 523-530.
- UNGERLEIDER, L., COURTNEY, S. M. & HAXBY, J.V. (1998). A neural system for human visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95**, 883-890.
- UNGERLEIDER, L.G. & MISHKIN, M. (1982). Two cortical visual systems. In: D.J. INGLE, M.A. GOODALE & R.J.W. MANSFIELD (Hrsg.), *Analysis of Visual Behavior*, 549-586. Cambridge, MA: MIT Press.
- UNGERLEIDER, L.G. & HAXBY, J.V. (1994). 'What' and 'where' in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology*, **4**, 157-165.

-
- VAN DER HEIJDEN, A.H.C. (1992). *Selective attention in vision*. London: Routledge & Kegan Paul.
- VAN DER HEIJDEN, A.H.C. (1993). The role of position in object selection in vision. *Psychological Research*, **56**, 44-58.
- VAN ZOMEREN, A.H. & BROUWER, W.H. (1994). *Clinical Neuropsychology of Attention*. Oxford: University Press.
- VECERA, S.P. & BEHRMANN, M. (1997). Spatial attention does not require preattentive grouping. *Neuropsychology*, **11**, 30-43.
- VILLRINGER, A. (1997). Understanding Functional Neuroimaging Methods Based on Neurovascular Coupling. In: A. VILLRINGER & U. DIRNAGEL (Hrsg.), *Optical Imaging of Brain Function and Metabolism 2*, 177-193. New York, London: Plenum Press.
- WALKER, R. & FINDLAY, J.M. (1996). Saccadic Eye-Movement Programming in Unilateral Neglect. *Neuropsychologia*, **34**, 493-508.
- WALKER, R., FINDLAY, J.M., YOUNG, A.W. & LINCOLN, N.B. (1996). Saccadic Eye-Movements in Object-Based Neglect. *Cognitive Neuropsychology*, **13**, 569-615.
- WARD, R. & DUNCAN, J. (1996). The slow time-course of visual attention. *Cognitive Psychology*, **30**, 79-109.
- WATANABE, T., HARNER, A.M., MIYAUCHI, S., SASAKI, Y., NIELSEN, M., PALOMO, D. & MUKAI, I. (1998). Task-dependent influences of attention on the activation of human primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95**, 11489-11492.
- WEINSTEIN, A., TROSCIANKO, T. & CALVERT, J. (1997). Impaired visual search mechanisms in Parkinson's disease (PD): A psychophysical and event-related potentials study. *Journal of Psychophysiology*, **11**, 33-47.
- WILLIAMS, L.G. (1966). The effect of target specification on objects fixated during visual search. *Acta Psychologica*, **27**, 315-318.
- WOLFE, J.M. (1994). Guided Search 2.0.: A revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, **1**, 202-238.
- WOLFE, J.M. (1996). Visual search: A review. In H. Pashler (Ed.), *Attention*. London: University College London Press.
- WOLFE, J.M. (1998). What can 1 million trials tell us about visual search. *Psychological Science*, **9**, 33-39.
- WOLFE, J.M., CAVE, K.R. & FRANZEL, S.L. (1989). Guided Search: An alternative to the Feature Integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **15**, 419-433.

- WRIGHT, M.J., BURNS, R.J., GEFFEN, G.M. & GEFFEN, L.B. (1990). Covert orientation of visual attention in Parkinson's disease: An impairment in the maintenance of attention. *Neuropsychologia*, **28**, 151-159.
- WURTZ, R.H. & GOLDBERG, M.E. (1972). The primate superior colliculus and the shift of visual attention. *Investigative Ophthalmology*, **11**, 441-449.
- WURTZ, R.H., GOLDBERG, M.E. & ROBINSON, D.L. (1987). Neuronale Grundlagen der visuellen Aufmerksamkeit. In: *Wahrnehmung und visuelles System*. Heidelberg: Spektrum, 58-67.
- ZELINSKY, G.J. & SHEINBERG, D.L. (1997). Eye movements during parallel-serial visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23**, 244-262.
- ZELINSKY, G.J. (1996). Using eye saccades to assess the selectivity of search movements. *Vision Research*, **36**, 2177-2187.
- ZELINSKY, G.J., RAO, R.P.N., HAYHOE, M.M. & BALLARD, D.H. (1997). Eye movements reveal the spatiotemporal dynamics of visual search. *Psychological Science*, **8**, 448-453.
- ZIHL, J. & VON CRAMON, D.Y. (1986). *Zerebrale Sehstörungen*. Stuttgart: Kohlhammer.
- ZIHL, J. (1995). Visual scanning behavior in patients with homonymous hemianopia. *Neuropsychologia*, **3**, 287-303.
- ZIMMERMANN, P. & FIMM, B. (1993). *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP), Version 1.0*. Würselen: Psychologische Testsysteme.
- ZINGALE, C.M. & KOWLER, E. (1987). Planning sequences of saccades. *Vision Research*, **27**, 1327-1341.

Lebenslauf

Name: Gisela Müller-Plath
Anschrift: Thomas-Müntzer-Straße 4, 99084 Erfurt
geboren am: 25.09.1963 in Hamburg
Eltern: Gerhard Müller, Wissenschaftlicher Oberrat; Liselotte Müller, Lehrerin
Familienstand: verheiratet

Schulausbildung:

1969 - 1973 Grundschule in Hamburg-Bergstedt
1973 - 1982 Gymnasium Buckhorn in Hamburg-Volksdorf
Mai 1982 Abitur

Erstes Studium:

1982 - 1989 Studium in Mathematik und Sport, ab 1983 auch in Latein, an der
Christian-Albrechts-Universität Kiel und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Februar 1989 Erstes Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien
1989 - 1990 Fortsetzung des Lateinstudiums

Referendariat:

1990 - 1992 Referendariat am Studienseminar Neumünster
mit Lehrtätigkeit in Mathematik und Sport am Gymnasium Bad Bramstedt
Juni 1992 Zweites Staatsexamen in Mathematik und Sport für das Lehramt an Gymnasien

Zweites Studium:

1992 - 1997 Studium der Psychologie an der Christian-Albrechts-Universität Kiel
April 1997 Diplom in Psychologie

Wissenschaftliche Tätigkeiten:

1988 - 1990 Studentische Hilfskraft am Institut für Sport und Sportwissenschaft der Universität Kiel
1993 - 1994 Studentische Hilfskraft am Institut für Psychologie der Universität Kiel
1995 - 1996 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Psychologie der Universität Kiel
1997 - 1999 Doktorandin am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung Leipzig
seit 1999 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Psychologie der Universität Halle

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich das Folgende:

1. Ich versichere, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde und dass die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht worden sind.
2. Von folgenden Personen erhielt ich Unterstützungsleistungen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts:
 - PROF. DR. D. YVES VON CRAMON,
Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung, Leipzig,
 - PD DR. STEFAN POLLMANN,
Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung, Leipzig,

Zudem standen mir andere wissenschaftliche und technische Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für neuropsychologische Forschung und der Tagesklinik für kognitive Neurologie der Universität Leipzig bei der Diskussion inhaltlicher, methodischer und technischer Fragen und Probleme sowie bei der Datenerhebung hilfreich zur Seite.

3. Ich versichere, dass außer den in 2. genannten keine weiteren Personen bei der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte Personen haben weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die in Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Gisela Müller-Plath

Erfurt, den 22. Juli 1999

MPI SERIES IN COGNITIVE NEUROSCIENCE

- 1 Anja Hahne
Charakteristika syntaktischer und semantischer Prozesse bei der auditiven Sprachverarbeitung: Evidenz aus ereigniskorrelierten Potentialstudien
- 2 Ricarda Schubotz
Erinnern kurzer Zeitdauern: Behaviorale und neurophysiologische Korrelate einer Arbeitsgedächtnisfunktion
- 3 Volker Bosch
Das Halten von Information im Arbeitsgedächtnis: Dissoziationen langsamer corticaler Potentiale
- 4 Jorge Jovicich
An investigation of the use of Gradient- and Spin-Echo (GRASE) imaging for functional MRI of the human brain
- 5 Rosemary C. Dymond
Spatial Specificity and Temporal Accuracy in Functional Magnetic Resonance Investigations
- 6 Stefan Zysset
Eine experimentalpsychologische Studie zu Gedächtnisabrufprozessen unter Verwendung der funktionellen Magnetresonanztomographie
- 7 Ulrich Hartmann
Ein mechanisches Finite-Elemente-Modell des menschlichen Kopfes
- 8 Bertram Opitz
Funktionelle Neuroanatomie der Verarbeitung einfacher und komplexer akustischer Reize: Integration haemodynamischer und elektrophysiologischer Maße