

Eberhard Karls Universität Tübingen  
Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft

Wissenschaftliche Arbeit im Fach Biologie für die Zulassung zur  
wissenschaftlichen Prüfung für das Lehramt an Gymnasien

**Quantitative Analyse des *Trade-off* zwischen  
Augenbewegungen und Arbeitsgedächtnis in einem  
Paradigma der vergleichenden Suche**

Petra Leyhr  
16.06.2010

Betreuer:  
Dr. Gregor Hardiess  
Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot

---

## **Erklärung der Selbständigkeit**

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Ausdruck belegt.

Tübingen, den 16. 06. 2010

(Petra Leyhr)

---

## **Danksagung**

Für die Gelegenheit zur Durchführung dieser Zulassungsarbeit und deren Begutachtung möchte ich Herrn Prof. Dr. H. A. Mallot herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Gregor Hardiess für die umfassende Betreuung und Hilfestellung.

Nicht zu vergessen natürlich auch allen Probanden, die an meinen Versuchen teilgenommen haben.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Arbeitsgedächtnis.....	1
1.2	Blickbewegungen .....	3
1.3	Gewichteter Ressourceneinsatz: <i>Trade-off</i> .....	3
1.4	Zielsetzung und Fragestellung.....	7
2	Material und Methoden.....	8
2.1	Versuchsaufbau.....	8
2.2	Versuchsdurchführung.....	9
2.2.1	Vorversuch zur zeitlichen Auflösung.....	9
2.2.2	<i>Trade-off</i> Experimente .....	10
3	Ergebnisse .....	15
3.1	Vorversuch zur zeitlichen Auflösung.....	15
3.2	<i>Trade-off</i> Experimente .....	15
3.2.1	Fehlerrate .....	15
3.2.2	Suchstrategien.....	17
3.2.3	Fehler in der Form .....	17
3.2.4	Fehler in der Farbe .....	19
3.2.5	Vergleich zwischen Form- und Farbfehlertrials .....	21
4	Diskussion.....	23
4.1	Vorversuch zur zeitlichen Auflösung.....	23
4.2	<i>Trade-off</i> Experimente .....	23
4.2.1	Fehlerrate .....	23
4.2.2	Suchstrategien.....	24
4.2.3	Fehler in der Form .....	24
4.2.4	Fehler in der Farbe .....	25
4.2.5	Vergleich zwischen Form- und Farbfehlertrials .....	26
5	Zusammenfassung.....	27
	Literaturverzeichnis.....	28
	Anhang.....	29

## 1 Einleitung

### 1.1 Arbeitsgedächtnis

Bei nahezu allen alltäglichen, uns selbstverständlichen Aufgaben spielt das Arbeitsgedächtnis eine entscheidende Rolle. Ob beim Frühstückstischdecken oder beim Wählen einer Telefonnummer, stets ist unser Arbeitsgedächtnis gefragt aus einer Fülle an akustischen, visuellen und anderen sensorischen Informationen, jene bewusst werden zu lassen, welche in diesem Moment von Relevanz sind. Das Arbeitsgedächtnis ist ein Teil des kognitiven Apparats, welcher unsere aktuellen Wahrnehmungen mit bereits bekannten Gedächtnisinhalten vergleicht und die daraus resultierenden Handlungen beeinflusst. Es stellt also eine Verbindung zwischen unserem Lang- und Kurzzeitgedächtnis bzw. dem sensorischen Immediatgedächtnisses dar.

Bereits 1974 stellten Baddeley und Hitch ihr Multi-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses vor. Dieses Modell wurde schließlich im Jahre 2000 von Baddeley selbst um eine weitere Komponente erweitert (Baddeley 2006) und dient seither als Grundlage für die meisten Untersuchungen zu der Funktionsweise des Arbeitsgedächtnisses. Wie Abbildung 1 zeigt, beinhaltet dieses Konzept drei funktionelle Untereinheiten, welche allesamt unter der Kontrolle der zentralen Exekutive stehen. Diese Untereinheiten trennen sich je nach ihren Aufgabenbereichen in den visuell-räumlichen Notizblock, den episodischen Puffer und die phonologische Schleife. Die phonologische Schleife dient als temporärer Speicher von akustischen Informationen. Bei dem episodischen Puffer handelt es sich um die erst nachträglich in das Konzept des Multi-Komponenten-Arbeitsgedächtnisses eingefügte Untereinheit. Es stellt einen eigenständigen Speicher dar, der Verknüpfungen zwischen den Informationen aus den anderen Modulen des Arbeitsgedächtnisses, oder auch zu Inhalten aus dem Langzeitgedächtnis herstellt. Alle diese Strukturen sind in ihrer Speicherkapazität begrenzt.

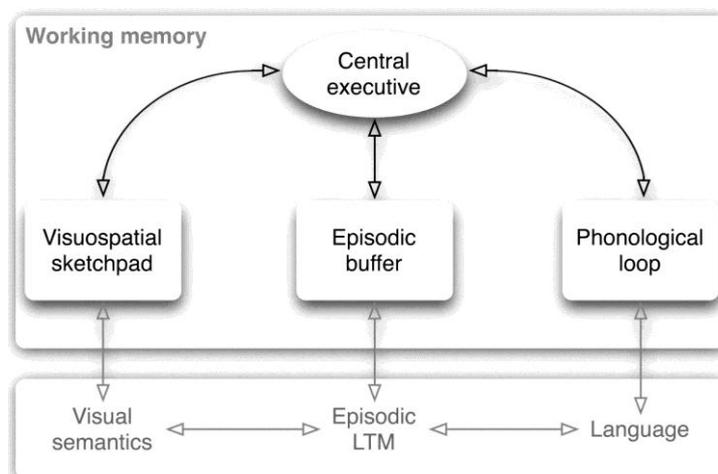


Abbildung 1: Das Multi-Komponenten Modell des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley (2000)

Quelle: Baddeley (2006)

Im Fokus meiner Arbeit stand der visuell-räumliche Notizblock. Seine Aufgabe ist es visuelle und räumliche Informationen temporär zu speichern und zu verarbeiten. Eigentlich handelt es sich hierbei nicht um eine einheitliche Struktur, sondern wie zahlreiche Experimente bereits nachweisen konnten, vielmehr um zwei größtenteils voneinander unabhängige Module. Während der eine Teil für die Verarbeitung von visuellen Informationen, wie etwa der Farbe eines Objekts, zuständig ist, verarbeitet der andere räumliche Informationen zu einem betrachteten Objekt, wie etwa die Position im Raum. Das visuelle Arbeitsgedächtnis, welches in mehreren Publikationen auch als VSTM (visual short-term memory) bezeichnet wird, hat typischerweise eine Speicherkapazität von ungefähr drei bis vier Objekten, mehr oder weniger unabhängig von der Anzahl der Eigenschaften eines Objekts (z.B. Farbe, Form, Größe; Baddeley 2006).

Zu beobachten ist diese begrenzte Speicherverfügbarkeit zum Beispiel an dem Phänomen der Veränderungsblindheit. Hierbei werden Veränderungen in Merkmalen, welche für die Bearbeitung einer Aufgabe irrelevant sind nicht bewusst. Sogar drastische Veränderungen einer Szene können übersehen werden, wenn die Aufmerksamkeit auf anderen Objekten ruht. Das Paradigma der Veränderungsblindheit ist eine der etablierten Methoden der Kognitionswissenschaft zur Abfrage des Arbeitsgedächtnisinhalts. Eine andere Vorgehensweise, um Rückschlüsse auf die im VSTM gespeicherten Informationen ziehen zu können, ist ein Paradigma der vergleichenden visuellen Suche. Hierbei müssen Probanden eine visuelle Umgebung auf Unterschiede zwischen zwei größtenteils identischen Szenen untersuchen. Zum Vergleich zweier Objekte ist es notwendig die Information über diese im Arbeitsgedächtnis verfügbar zu haben. Somit kann durch die in einem Schritt verglichenen Objekte Rückschluss darauf gezogen werden, dass eben diese zum Vergleich herangezogenen Merkmale zum gegebenen Zeitpunkt im VSTM gespeichert waren.

Die Limitierung des visuellen Speichers bringt mit sich, dass relevante Informationen immer wieder neu in das Arbeitsgedächtnis gelangen müssen um somit andere, irrelevante Informationen verdrängen zu können. Einmaliges Betrachten eines Bildes kann nicht dazu führen, dass alle darin enthaltenen Informationen im VSTM gespeichert werden. Nur die wenigen, welche, durch die zentrale Exekutive gesteuert, mit besonderer Aufmerksamkeit bedacht werden, können in den Speicher des Arbeitsgedächtnisses gelangen. Alle anderen Informationen, welche im sensorischen Immediatgedächtnis ebenfalls repräsentiert sind, werden nach einer maximalen Speicherzeit von nur 1 s gelöscht. Nur durch ein erneutes Betrachten des Bildes kann man diese Informationen wieder greifbar machen. Dies erreicht man durch Blickbewegungen auf das Objekt des Interesses. Durch Betrachten dessen können die gefragten Informationen erneut visuell erfasst und anschließend im Arbeitsgedächtnis gespeichert und bearbeitet werden.

### 1.2 Blickbewegungen

Um Informationen aus der Umgebung aufnehmen zu können sind entsprechende Blickbewegungen zu einem relevanten Objekt von Nöten. Nur durch Augen- und Kopfbewegungen gelingt es dem Menschen ein Bild lange genug auf der Retina zu fokussieren, so dass alle enthaltenen Informationen visuell erfasst werden können. Dieses Stabilisieren der Blickrichtung auf ein Objekt bezeichnet man als Fixation. Nur wenn ein Objekt fixiert wird, kann unser visuelles System alle Informationen über dieses Objekt begreifen. Die einfachste Form einer Fixation sind stationäre Fixationen, bei denen das betrachtete Objekt still in Relation zum Körper stehen bleibt. Als *Smooth pursuit* bezeichnet man dagegen Blickbewegungen, bei denen das Auge ein kleines, sich langsam bewegendes Objekt fixiert (Carpenter 1988). Ebenso wichtig, wie die Fixationen zur Informationsaufnahme, sind die Blickverschiebungen, durch die immer wieder neue Objekte registriert werden können. Augenbewegungen, welche zu einer Verschiebung des Blickfeldes führen, werden als Sakkaden bezeichnet. Sie zählen mit Geschwindigkeiten von bis zu  $1000^\circ/\text{s}$  zu den schnellsten Bewegungen des menschlichen Körpers (Carpenter 1988).

Zeichnet man die Augenbewegungen von Probanden auf, so kann man anhand der Fixationen direkte Rückschlüsse darauf ziehen, welche Objekte mit besonderer Aufmerksamkeit bedacht wurden und somit in das visuelle Arbeitsgedächtnis gelangen konnten. Studien in der Vergangenheit konnten bereits zeigen, dass für die aktuell zu bearbeitende Aufgabe relevante Objekte deutlich häufiger fixiert werden, als in derselben Situation vorhandene unbedeutende Gegenstände. Es müssen also neuronale Verhaltensprogramme existieren, die die Kontrolle der Blickbewegungen je nach Relevanz der betrachteten Objekte erlauben (Hayhoe 2005). Unser kognitives System muss fortwährend entscheiden wohin die Augen blicken sollen, welche Informationen aus dem entstehenden Blickfeld relevant sind und welche hiervon gespeichert werden sollen. Im Folgenden soll eines dieser Verhaltensmuster, welches diese Entscheidungen größtenteils unbewusst steuert, erläutert werden.

### 1.3 Gewichteter Ressourceneinsatz: *Trade-off*

Beim Betrachten eines Bildes kommt es immer zu einem feinen Zusammenspiel zwischen der Speicherung im visuellen Arbeitsgedächtnis und Blickbewegungen, welche Informationen direkt zu dem benötigten Zeitpunkt aufgreifen. Durch die begrenzte Kapazität des VSTM können immer nur wenige Inhalte gespeichert und bearbeitet werden. Deshalb sind Blickbewegungen von Nöten um Informationen aus der Umwelt, auch als externer Speicher gedacht, wieder aufzugreifen.

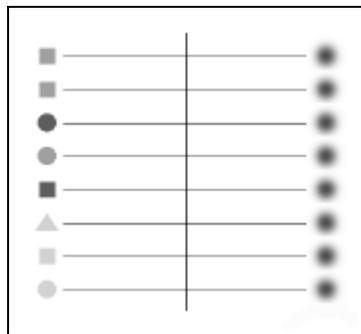
Es sind zwei mögliche Strategietypen bei einer vergleichenden visuellen Suche denkbar. Während bei der einen Strategie der VSTM-Einsatz so gering wie möglich gehalten wird, nutzt die andere die volle Speicherkapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses aus. Der minimale Arbeitsgedächtniseinsatz kann dadurch erreicht werden, dass Blickbewegungen zur Informationsaufnahme nach dem *just-in-time* Prinzip angewendet werden. Eine Mischung beider Taktiken stellt die häufigste Variante von Suchstrategien dar.

Welche Rolle der Einsatz des Arbeitsgedächtnisspeichers bei der Bearbeitung einer visuellen Aufgabe spielt, kann experimentell beeinflusst werden. So auch in den Experimenten von Inamdar und Pomplun (2003). Sie konnten nachweisen, dass es bei der Bearbeitung eines

Paradigmas der vergleichenden Suche zu einem *Trade-off* dieser beiden Strategien kommt. *Trade-off* steht hierbei für einen gewichteten Ressourceneinsatz. Die Versuchspersonen tendierten immer zu jener Strategie, mit dem geringeren Ressourcenverbrauch.

In den Versuchen mussten Probanden zwei Spalten von geometrischen Objekten, welche in drei verschiedenen Farben und Formen dargestellt waren, auf Unterschiede untersuchen. Die insgesamt 192 Durchläufe, wurden dabei in drei unterschiedliche Spaltenabstandsbedingungen unterteilt. Die zu vergleichenden Objekte hatten entweder einen Abstand von 15°, 30° oder 45° zueinander.

Um zu verhindern, dass die Probanden die Stimuli nur mit der retinalen Peripherie erfassen konnten und somit keine Blicksprünge zwischen den Bildhälften nötig gewesen wären, behelfen sie sich eines Tricks. Nur die jeweils gerade betrachtete Bildhälfte wurde scharf abgebildet, während die andere durch Maskierung unscharf gehalten wurde (Vergleiche Abbildung 2). Erst durch eine Sakkade in die maskierte Bildhälfte wurden die Stimuli dieser Spalte nach einer maximalen Verzögerung von 14 ms erkennbar gemacht.



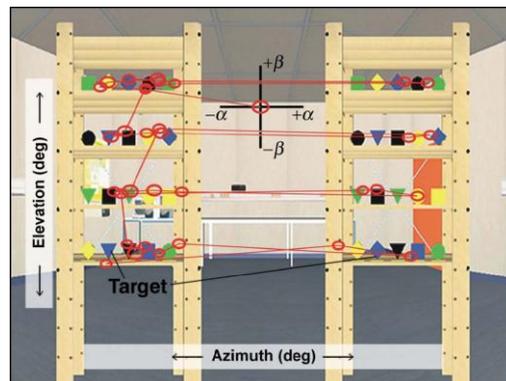
**Abbildung 2:** Beispiel für ein Monitorbild, welches eine Versuchsperson mit Blick auf die linke Bildhälfte zusehen bekam. Quelle: (Inamdar 2003)

Die Auswertung der Blickbewegungen während dieser vergleichenden Suche zeigten bei allen Probanden dieselben signifikanten Ergebnisse: Mit zunehmendem Spaltenabstand nahm die Anzahl der Blicksprünge pro Trial zwischen den beiden Bildhälften ab, wohingegen die Verweildauer innerhalb einer Bildhälfte zunahm. Die Dauer einer Sakkade zwischen den Bildhälften wurde ebenfalls größer mit zunehmendem Spaltenabstand. Dies sind die drei wichtigsten Erkenntnisse aus denen Inamdar und Pomplun auf einen *Trade-off* zwischen Augenbewegungen und Arbeitsgedächtnis schlossen. Die Vergrößerung des Spaltenabstandes führte zu einer Kostenerhöhung für Blicksprünge zwischen den Bildhälften, was sich in der längeren Sakkadendauer widerspiegelte. Durch den verstärkten Ressourcenbedarf wurde die Suchstrategie der Probanden hin zum maximalen VSTM-Einsatz verschoben. Das ließ sich am deutlichsten mit der geringer werdenden Blicksprunganzahl zwischen den Bildhälften belegen. Denn diese impliziert, dass sich zum Zeitpunkt des Wechsels in die andere Bildhälfte, mehr Informationen im Speicher des visuellen Arbeitsgedächtnisses befinden mussten, welche in der anderen Bildhälfte zum Vergleich benötigt wurden. Aber auch die zunehmende Verweildauer innerhalb einer Bildhälfte sprach für einen höheren Zeitverbrauch während der Speicherung im visuellen Arbeitsgedächtnis.

In einem zweiten Versuchsdurchlauf wurde der Ressourcenbedarf für die bildhälftenübergreifenden Sakkaden auf eine andere Weise variiert. Hierbei wurde die ohnehin vorhandene Verzögerung zum Wechseln der Displayeinstellungen nach einem Blicksprung in die maskierte Bildhälfte künstlich verlängert. Der Spaltenabstand war in

diesen Versuchsdurchläufen konstant bei  $30^\circ$ . Das hinausgezögerte Scharfstellen der Stimuli geschah wiederum zu drei unterschiedlichen Bedingungen mit einer Verzögerung von 0 ms (beziehungsweise der unvermeidbaren Verzögerung von maximal 14 ms), 500 ms oder 1000 ms. Diese drei unterschiedlichen Bedingungen brachten ebenfalls, wie schon die variierenden Spaltenabstände, unterschiedliche Suchstrategien mit sich. Die Ergebnisse von Versuch 2 zeigten ebenfalls den *Trade-off* zwischen Augenbewegungen und Einsatz des Arbeitsgedächtnisses. Die Versuchspersonen reagierten auch hier auf die Erhöhung der Blickbewegungskosten, durch die zeitliche Verzögerung, mit einer verstärkten Nutzung des VSTM-Speichers und mit einer Abnahme der bildhälftenübergreifenden Sakkadenanzahl.

Denselben Effekt untersuchten 2008 auch Hardiess, Gillner und Mallot unter Berücksichtigung von Kopf- und Augenbewegungen ebenfalls an einem Paradigma der vergleichenden visuellen Suche. Bei den Versuchen wurden zwei virtuelle Regale mit je 20 Stimuli, welche hier aus viererlei einfachen geometrischen Formen in ebenfalls vier unterschiedlichen Farben bestanden, gefüllt (Vergleiche Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Beispiel für Blickbewegungen einer Versuchsperson während der vergleichenden visuellen Suche. Quelle: (Hardiess 2008)

Es befanden sich 5 Objekte auf jedem der 4 Regalböden. Beide Regale waren, abgesehen von den möglichen Fehlern, identisch aufgebaut. Da die Regale im Abstand von  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  oder  $120^\circ$  zueinander projiziert wurden, waren Kopfbewegungen für die Blicksprünge zwischen den Stimuli beider Seiten unerlässlich. Die aufgezeichneten Augen- und Kopfbewegungen wurden in der Auswertung zu Blickbewegungen zusammengefasst. Dass für die Blickbewegungen je nach Abstandsbedingung unterschiedlicher Ressourcenbedarf bestand, erschließt sich sofort. Auch hier führten größere Stimuliabstände zu einem verstärkten Arbeitsgedächtniseinsatz, der sich sowohl in einer Abnahme der Blicksprünge zwischen den Regalen, als auch in einer Zunahme der Fixationsdauer zeigte. Durch Einbeziehen der Kopfbewegungen kam es zu einer schnelleren Verschiebung der Suchstrategie zum maximalen VSTM-Einsatz. Grund hierfür ist, dass Kopfbewegungen einen höheren Kostenposten darstellten, als Augenbewegungen alleine und somit der Ressourcenbedarf für die Blickbewegungen durch Einbeziehen von Kopfbewegungen erhöht wurde.

Eine weitere Untersuchung zum gewichteten Ressourceneinsatz stammt von Droll und Hayhoe aus dem Jahre 2007. Hierbei mussten Probanden Klötze in einer virtuellen Umgebung nach ihren Merkmalen sortieren (Vergleiche Abbildung 4).

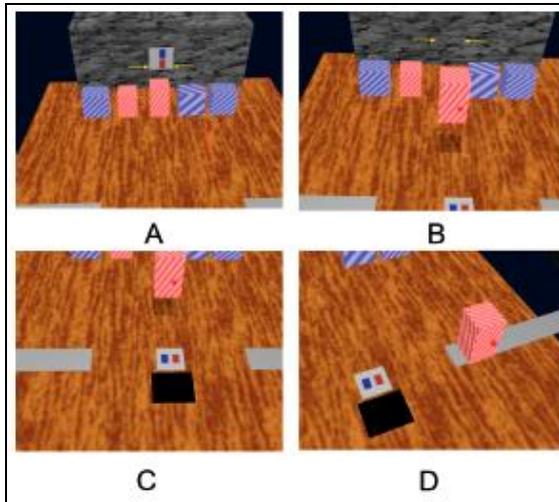


Abbildung 4: Ablauf eines Trials; (A) Die Versuchsperson wählte nach dem Aufnahmekriterium einen der Klötze, welchen sie in (B) anhub und in (C) zu sich nach vorne holte. In (D) entschied der Proband nach dem Ablagekriterium, auf welche Seite der Klotz abgesetzt werden sollte.

Quelle: (Droll 2007)



Abbildung 5: Blickbewegungsabfolgen. Nach Betrachten des Ablagekriteriums folgten entweder direkt das Ablegen des Klotzes(links), oder aber zunächst eine weitere Fixation auf den Klotz (rechts).

Quelle: (Droll 2007)

Es standen 5 Klötze, welche die Merkmale Farbe, Breite, Höhe und Textur in je zwei unterschiedlichen Ausprägungen tragen konnten, pro Trial zur Auswahl. Zunächst gab es ein bestimmtes Auswahlkriterium für die Aufnahme einer der Klötze, wie z.B. „rot gefärbt“. Dieser gewählte Klotz musste dann nach einem vorgegebenen Ablagekriterium sortiert werden. Hierbei gab es zwei unterschiedliche Versuchsbedingungen. In einem Teil der Versuchsdurchläufe waren vor Trialbeginn sowohl das Aufnahmekriterium, als auch das Ablagekriterium bekannt. Bei der Bearbeitung der anderen Trials war nur das Aufnahmekriterium bekannt, während das Ablagekriterium erst kurz vor der Ablageentscheidung präsentiert wurde. Das Interesse lag darauf, ob die Probanden vor ihrer Ablageentscheidung den Klotz noch einmal fixieren mussten oder die Entscheidung auf Basis der im Arbeitsgedächtnis gespeicherten Merkmalsinformation gefällt wurde. Abbildung 5 zeigt die unterschiedlichen Blickbewegungsabfolgen. Im links dargestellten Fall muss die Information, welche relevant zur Ablageentscheidung war, bereits bei der Aufnahme des Klotzes gespeichert worden sein. Im Gegensatz hierzu zeigt das rechte Bild eine erneute Fixation des Klotzes, um die relevante Information aufzugreifen. Diese Versuche zeigten, dass die Probanden in den Trials, vor deren Beginn ihnen bereits die relevanten Merkmale mitgeteilt wurden, die Ablageentscheidung überwiegend auf Basis des gespeicherten Arbeitsgedächtnisinhaltes fällten. Bei der unbekanntem Bedingung hätten die Versuchspersonen sich alle 4 Merkmale des Klotzes merken müssen, um eine direkte Entscheidung treffen zu können. Dies war allerdings nur selten der Fall. Meist wurde hier eine erneute Fixation des Klotzes zur Aufnahme der relevanten Information gemacht. Das Ergebnis zeigte auch hierbei einen *Trade-off* zwischen Blickbewegungen und Arbeitsgedächtnis-Ausnutzung. Die Bearbeitungsstrategien wurden nicht durch

unterschiedliche Kosten für eine erneute Fixation beeinflusst, sondern vielmehr mit der Vorhersehbarkeit der Nützlichkeit einzelner Informationen.

In diesem Versuch war außerdem noch eine *change detection* Aufgabe eingebaut. Die Probanden waren angewiesen, einen Klotz dessen Merkmale sich während des Trials änderten in einen virtuellen Papierkorb zu werfen. Diese Veränderungen blieben häufiger unentdeckt, wenn es sich um ein irrelevantes Merkmal in einem Trial mit bekanntem, als in einem Trial mit unbekanntem Ablagekriterium handelte. Dies zeigt, wie aufgabenspezifisch die Entscheidung zur Speicherung eines Merkmals von unserem kognitiven System gefällt wird. Die beobachteten Ergebnisse der *change detection* Aufgabe entsprachen dem oben beschriebenen Phänomen der Veränderungsblindheit

Die eindringlichsten Ergebnisse aller oben genannten Untersuchungen können folgendermaßen benannt werden:

- a) Der *Trade-off* zwischen Augenbewegungen und dem Einsatz des Arbeitsgedächtnisses kann experimentell durch äußere Parameter sehr einfach und gezielt gesteuert werden. Dies spricht für ein intrinsisches Verhalten.
- b) Eine sehr geringe Variabilität der angewendeten Suchstrategien zwischen den Probanden spricht für ein tiefgreifendes und stabiles Verhaltensmuster.
- c) Probanden sind sich der unterschiedlich angewendeten Strategien nicht bewusst. Dies spricht dafür, dass der *Trade-off* eine, dem Bewusstseinsprozess nicht unmittelbar zugängliche, Entscheidung des kognitiven Systems darstellt (Vergleiche Droll 2007).

### 1.4 Zielsetzung und Fragestellung

Die Motivation für die im Folgenden beschriebenen Versuche war zum einen, die Beobachtungen von Inamdar und Pomplun aus dem Jahre 2003 zu replizieren. Ein ähnlicher Versuchsaufbau, allerdings mit anderen technischen Hilfsmitteln, sollte vergleichbare Ergebnisse liefern, wie die im obigen Absatz beschriebenen.

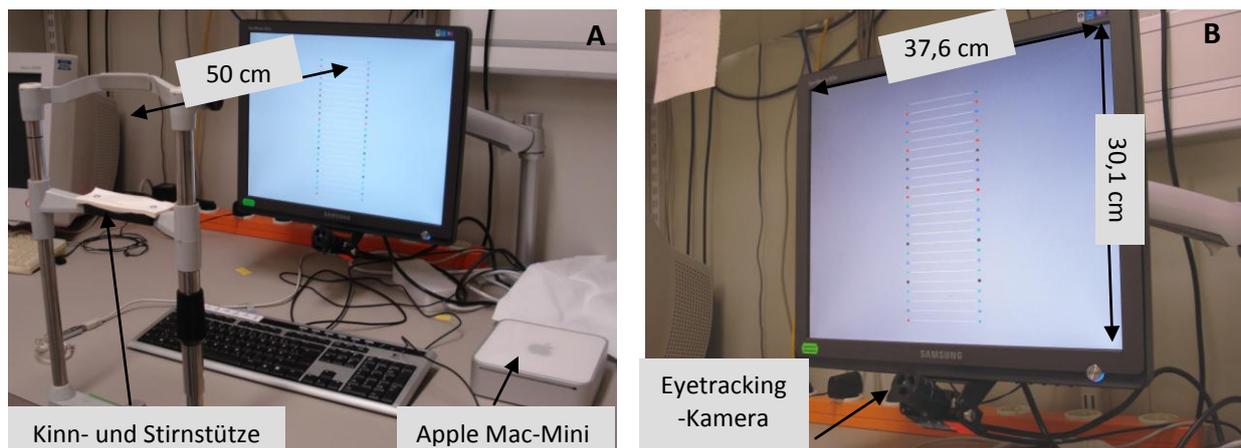
Zum anderen wurde das Experiment von Inamdar und Pomplun mit der Differenzierung zwischen Form- und Farbfehlertrials erweitert. Zwar gab es in deren Experiment ebenfalls Fehler in Farbe als auch Form der geometrischen Objekte, doch wurde keine getrennte Auswertung vorgenommen. Unser Augenmerk soll nun darauf liegen, ob eine Reduzierung der aufgabenrelevanten Informationen auf nur eines der beiden Merkmale unterschiedliche Ergebnisse hervorbringt.

Zu erwarten wäre eine kürzere Bearbeitungszeit für einen Trial mit Farbfehler, im Vergleich zu einem Formfehlertrial, durch eine schnellere und einfachere Verarbeitung des Merkmals Farbe begründet. Ebenfalls wäre zu erwarten, dass sich die Suchstrategie in den Farbfehlertrials schneller hin zur maximalen VSTM-Ausnutzung verschiebt, weil Farbinformation durch schnellere Verarbeitung einfacher gespeichert werden kann.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Versuchsaufbau

Die Versuchspersonen saßen während des gesamten Experiments vor einem Bildschirm, an dessen Unterseite eine Eyetracking-Kamera befestigt war (Vergleiche Abbildung 6B). Der Bildschirm war 37,6 cm hoch, 30,1 cm breit und hatte eine Auflösung von 1280 x 1024 Pixel. Es wurde ein *SAMSUNG SyncMaster931BF* Monitor verwendet. Die Probanden befanden sich in einem Abstand von 50 cm zum Bildschirm. Da die Versuchsteilnehmer möglichst still sitzen mussten, um eine genaue Augenbewegungsmessung zu gewährleisten, diente eine Kinn- und Stirnstütze als Stabilisierungshilfe. Bei dem verwendeten Eyetracker handelte es sich um das *EYEGAZE SYSTEM* von *LC Technologies, Inc.* Er hatte eine zeitliche Auflösung von 60 Hz, lieferte also Daten mit Messabständen von ca. 16,67 Sekunden. Das Programm *EyetrackerApp*, welches die Stimulibilder abspielte und gleichzeitig die Daten des Eyetracker verarbeitete und in eine Textdatei abspeicherte lief auf einem *Apple Mac-Mini* Rechner unter dem Betriebssystem *Windows XP Professional*.



**Abbildung 6A:** Foto des Versuchsaufbaus. Bildschirm mit Kinn- und Stirnstütze im Vordergrund.

**Abbildung 6B:** Bildschirm mit der montierten Eyetracking-Kamera an der Unterseite.

Da für die Versuche ein möglichst breites Blickfeld auf dem Monitor nötig war, musste der Abstand zwischen Bildschirm und Versuchsperson so minimal wie möglich gehalten werden. Die Eyetracking-Kamera hatte allerdings einen kegelförmigen Aufzeichnungsbereich, mit einem maximalen Öffnungswinkel von 40° (Vergleiche Abbildung 7). Je näher man also den Bildschirm an die Versuchsperson herangeholt hat, desto mehr Fläche des Monitors wurde durch Blickbewegungen außerhalb dieses Tracking-Kegels betrachtet. Wie Abbildung 8 zeigt, bleiben die beiden oberen Monitorecken bei einem Bildschirmabstand von 50 cm gerade noch in diesem 40° Öffnungswinkel. Sobald man diesen Bereich überschreitet, werden die Augenbewegungen fehlerhaft gemessen. Die maximale Ausreizung des Messbereichs brachte allerdings mit sich, dass immer wieder Augenbewegungen aus diesem herausführten

und somit manche Trials, wie später noch näher erläutert wird, nicht mit in die Auswertung einfließen konnten.

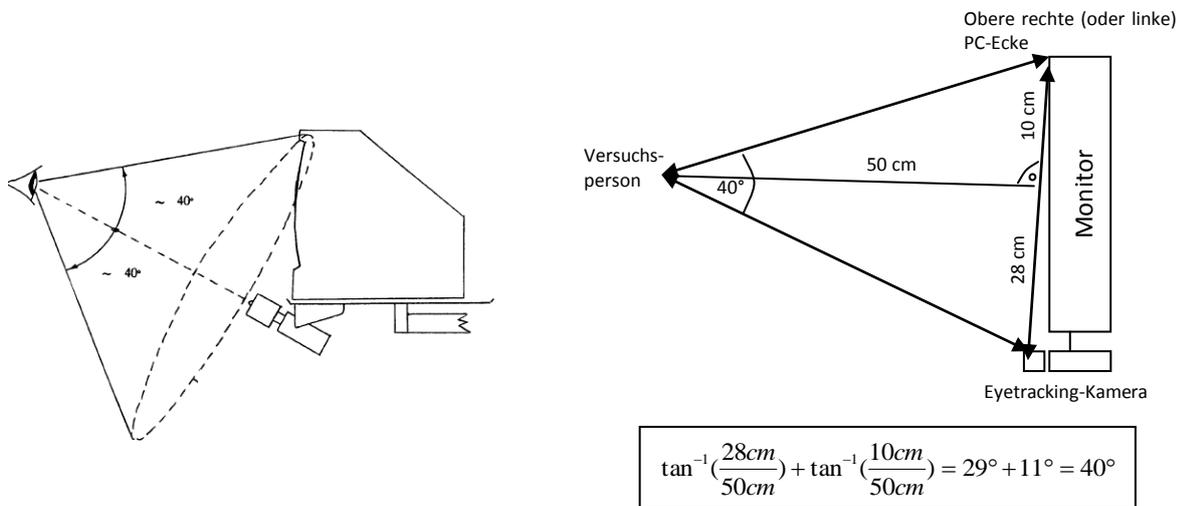


Abbildung 7: Grenzbereich der Eyetracking-Kamera.  
Quelle: (UsersManual)

Abbildung 8: Berechnungen zum maximalen Abstand zwischen Monitor und Versuchsperson.

## 2.2 Versuchsdurchführung

### 2.2.1 Vorversuch zur zeitlichen Auflösung

Bevor mit den eigentlichen Versuchen zum *Trade-off* zwischen Augenbewegungen und Arbeitsgedächtnis begonnen werden konnte, musste sichergestellt sein, dass die zeitliche Auflösung des gesamten Systems fehlerfrei war. Hierzu wurde von einem Metronom ein 2-Sekundentakt vorgegeben, in welchem 30 Punkte eines Testbildes fixiert wurden (Vergleiche Abbildung 9). Die Punkte wurden der Reihe nach in 5 Zeilen von links nach rechts fixiert. Nach diesem Schema wurden von insgesamt zwei Durchläufen die Augenbewegungen ermittelt und, wie später noch näher erläutert wird auf Fixationen hin analysiert.

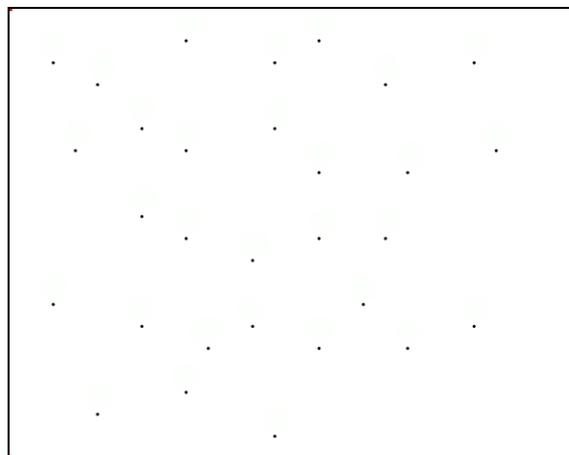


Abbildung 9: Testbild zur Kontrolle der zeitlichen Auflösung des Eyetracking-Systems.

### 2.2.2 Trade-off Experimente

#### 2.2.2.1 Versuchsablauf

Zur Untersuchung des gewichteten Ressourceneinsatzes, wurde wie bereits bei Inamdar und Pomplun ein Paradigma der vergleichenden visuellen Suche gewählt. Ein Aufgabenbild bestand aus zwei Spalten mit je einem Stimulus pro Zeile (Vergleiche Abbildung 10). Bei den Stimuli handelte es sich um 4 unterschiedliche, einfache geometrische Formen (Dreieck, Quadrat, Kreis und Raute), welche wiederum in 4 verschiedenen Farben (Blau, Rot, Grün, Schwarz) dargestellt sein konnten. Die Stimulispalten hatten entweder einen Abstand von  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  oder  $30^\circ$  (bzw. 300, 620 oder 983 Pixel) voneinander. Insgesamt waren pro Spalte 24 Stimuli vorhanden, welche eine Größe von  $0,32^\circ$  und einen vertikalen Abstand von  $1,18^\circ$  zueinander hatten. Die Stimuli einer Zeile waren durch eine feine weiße Linie verbunden, um den Versuchspersonen die Orientierung zu erleichtern. Sowohl die Verteilung der Form, als auch der Farbe erfolgte randomisiert. Die Aufgabenbilder wurden ebenfalls mit einer Auflösung von  $1280 \times 1024$  Pixeln mit Hilfe der MATLAB<sup>®</sup> Software (MathWorks Company, Natick, USA) erstellt.

Um zu verhindern, dass die Objekte mit der retinalen Peripherie verglichen werden konnten, wurden die Stimuli leicht verschwommen dargestellt. Damit wurde erreicht, dass nur ein Fokussieren mit der Fovea ein eindeutiges Erkennen der Form möglich machte. Eine realtime-Verschaltung, wie sie in den Versuchen von Inamdar und Pomplun zu diesem Zweck verwendet wurde, war mit unseren technischen Mitteln nicht möglich. Denn nimmt man eine mittlere Sakkadengeschwindigkeit von  $400^\circ/\text{s}$  an, so resultiert für eine  $10^\circ$ -Sakkade eine Dauer von gerade einmal 25 ms. In dieser Zeitspanne könnte unser Eyetracker, mit einer zeitlichen Auflösung von 60 Hz, maximal 2 Messwerte liefern (zum Vergleich bei Inamdar und Pomplun lief der verwendete Eyetracker mit 500 Hz). Des Weiteren kam ein Tracker-Delay von ca. 2 Frames hinzu, der dazu führte, dass die Messwerte erst nach ca. 33 ms für die Eyetracking-Software auswertbar waren. Eine realtime-Verschaltung hätte also eine zu große zeitliche Verzögerung mit sich gebracht.

Es gab Aufgabenbilder mit keinem, einem oder zwei Unterschieden zwischen beiden Spalten. Auch die Positionierung der Fehler erfolgte durch das MATLAB<sup>®</sup>-Programm randomisiert. Insgesamt wurden pro Versuchsperson 45 Trials bearbeitet: Pro Abstands- und Fehlerbedingung 5 Stück. Die Versuchspersonen waren in zwei Gruppen aufgeteilt: Die einen hatten nur Farbfehler in den Aufgabenbildern versteckt, die anderen hingegen nur Formfehler. Die Versuchspersonen wussten vor Bearbeitung der Trials, welcher Gruppe sie angehörten.

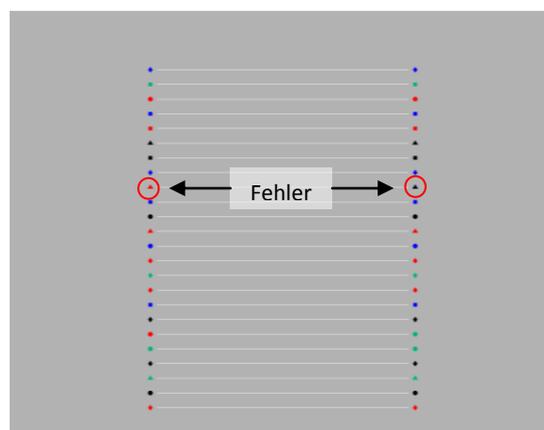
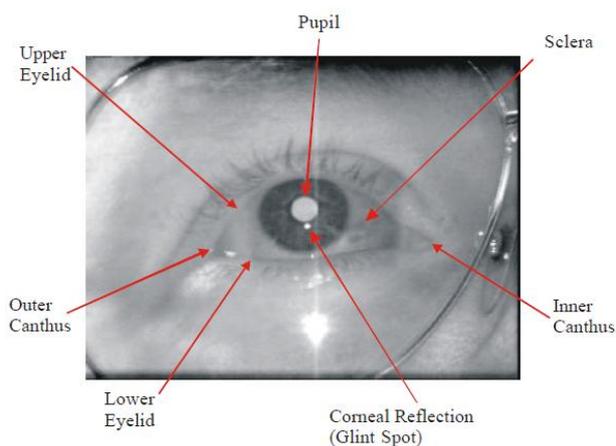


Abbildung 10: Aufgabenbild bei mittlerem Spaltenabstand und einem versteckten Fehler in der Farbe.

## 2 Material und Methoden

Die Probanden wurden zu Beginn des Versuchs mit dem allgemeinen Ablauf vertraut gemacht. Die Versuchsperson setzte sich möglichst bequem mit einer Hand an der Leertaste der Tastatur, dem Kinn auf der unteren und der Stirn an der oberen Stütze angelegt vor den Bildschirm. Die Messung der Augenbewegungen erfolgte nach der *Pupil Center Corneal Reflection (PCCR)* Methode. Hierbei wurde von einer in der Mitte der Kameralinse befindlichen LED-Leuchtdiode ein schwacher Infrarotstrahl auf das aufzuzeichnende Auge gerichtet. Dieser Strahl wurde auf der Cornea reflektiert und erschien als kleiner, heller Punkt, dem sogenannten *glint spot* auf dem Auge. Die Eyetracking-Kamera zeichnete dann ein Bild auf, das wie in Abbildung 11A diesen *glint spot* und die Pupille zeigte. Aus dem Abstandsverhältnis zwischen Pupillenmitte und dem *glint spot* konnte das Eyetracking-Programm einen Blickpunkt, aus horizontaler und vertikaler Koordinate berechnen. Zur Eichung des Systems benötigte das Programm natürlich Kalibrierungsdaten, welche Aufschluss über Abstandsbeziehung beim Betrachten festgelegter Punkte auf dem Bildschirm gaben. Diese Kalibrierung erfolgte für jeden Proband vor Beginn der Versuche. Nach richtiger Positionierung der Eyetracking-Kamera und Einstellen der richtigen Fokusebene eines Auges, musste die Versuchsperson 9 Punkte auf dem Bildschirm fixieren. Diese Kalibrierungsdaten dienten im Folgenden als Rechengrundlage für das Eyetracking-Programm. Ein Beispiel für einen Kalibrierungsscreen zeigt Abbildung 11B.



**Abbildung 11A:** Beispiel eines von der Kamera aufgezzeichneten Bildes.  
Quelle: (UsersManual)



**Abbildung 11B:** Beispiel für einen Kalibrierungsscreen.

Auf die Kalibrierung folgten die 45 Trials des Experimentes. Mit Hilfe der Leertaste direkt vor der Versuchsperson konnte diese selbst einen Trial beenden und den nächsten beginnen. War die Versuchsperson der Meinung die Fehleranzahl in einem Trial zu kennen, so betätigte sie die Leertaste, um ein graues Pausenbild auf den Monitor zu bekommen. Während dieses Pausenbildes teilte der Versuchsteilnehmer die erkannte Fehleranzahl mit, welche von dem Versuchsleiter notiert wurde. Durch erneutes Drücken der Leertaste konnte das Pausenbild wieder beendet werden.

Vor jedem Aufgabenbild erschien 2 Sekunden lang ein Fixationskreuz direkt in der Mitte (640,512 Pixelkoordinate) der Bildschirmfläche, welches die Probanden angewiesen waren zu fixieren. Das Fixationskreuz wurde automatisch von der *EyetrackerApp*-Software nach 2 Sekunden durch das nächste Aufgabenbild ersetzt.

Die Versuchspersonen konnten jederzeit während des Pausenbildes eine Erholungsphase einschieben. Wurde hierbei der Kopf bewegt, so wurde vor Fortsetzung der Versuche eine erneute Kalibrierung des Systems vorgenommen. Alle diese eingespielten Bilder hatten einen grauen Hintergrund, um zu verhindern, dass die Pupille sich nach der Kalibrierung, welche auf schwarzem Hintergrund durchgeführt wurde, durch einen zu hellen Bildhintergrund zu stark verkleinerte.

### **2.2.2.2 Versuchspersonen**

An der Studie nahmen insgesamt 31 Probanden, im Alter zwischen 19 und 37 Jahren, teil. Es handelte sich ausschließlich um Studenten oder Bedienstete der Universität Tübingen. Unter den Probanden waren sowohl Brillen- als auch Kontaktlinsenträger, deren Augenbewegungen mit unserem Eyetracking-System in den meisten Fällen problemlos gemessen werden konnten. Keiner der Probanden kannte die Zielsetzungen des Versuchs, um deren Unvoreingenommenheit zu garantieren. Die Teilnahme wurde finanziell mit 8€ pro Stunde entlohnt. Die Versuchspersonen wurden über Aushänge an den Universitätsgebäuden akquiriert. Von den 31 Probanden wurden nur die Daten von 25 Teilnehmern mit in die Auswertungen einbezogen. Bei zwei Versuchspersonen gab es, wie die spätere Analyse zeigte, Probleme mit der Augenbewegungsmessung. Die anderen vier Probanden wurden aufgrund ihrer stark von den Ergebnissen der übrigen Teilnehmer abweichenden Ergebnisse als Ausreißer deklariert und somit für die Gesamtauswertungen außen vor gelassen [Wert des Ausreißers > (Mittelwert ohne Ausreißer + 2\*Standardabweichung ohne Ausreißer)].

### 2.2.2.3 Datenanalyse

Das von der *EyetrackerApp*-Software erstellte Rohdatenfile (Vergleiche Abbildung 12) gibt die für die folgende Auswertung relevanten Parameter an.

```

Experiment 1 --- BEGIN

Gazepoint Data File, 13:15:33 03/01/2010
Raw Gazepoint Data (60 Hz Sampling Rate):

```

samp indx	Eye Found (t/f)	Gazepoint X (pix)	Gazepoint Y (pix)	Pupil Diam (mm)	Eyeball-Position X (mm) Y (mm) Z (mm)			Focus Range (mm)	Mark Cnt	Last Mark Time (sec)	Gaze Time (sec)	Report Time (sec)
Trial 1 : 1 = Fixation ; 2 = blurred_FarbeTrialnummer1												
619	1	646	433	4.05	4.4	-2.7	-1.9	734.1	0	0.0000	441.3500	441.3715
620	1	650	432	4.07	4.4	-2.7	-1.8	734.1	1	441.3559	441.3665	441.3876
621	1	652	432	4.05	4.3	-2.7	-2.1	734.1	1	441.3559	441.3831	441.4045
622	1	649	432	4.07	4.3	-2.7	-2.0	734.1	1	441.3559	441.3997	441.4208
623	1	646	435	4.05	4.3	-2.7	-2.1	734.1	1	441.3559	441.4163	441.4376
624	1	648	436	4.06	4.3	-2.7	-2.1	734.1	1	441.3559	441.4328	441.4539
625	1	651	431	4.04	4.3	-2.7	-2.2	734.1	1	441.3559	441.4493	441.4719
626	1	652	427	4.06	4.3	-2.6	-2.2	734.1	1	441.3559	441.4659	441.4870
627	1	650	424	4.06	4.3	-2.6	-2.1	734.1	1	441.3559	441.4825	441.5038
628	1	649	422	4.07	4.3	-2.6	-1.9	734.1	1	441.3559	441.4990	441.5201
629	1	650	428	4.06	4.3	-2.6	-1.9	734.1	1	441.3559	441.5156	441.5370

Abbildung 12: Von der *EyetrackerApp*-Software erstelltes Rohdatenfile.

Das Rohdatenfile wurde mit Hilfe eines MATLAB®-Programms ausgewertet. Hierfür wurden zunächst die Daten in das Programm eingelesen.

Aus den jeweils letzten 20 Werten der 2 Sekunden langen Anfangsfixationen (vor jedem Trial) wurde der Median gebildet. Durch Vergleich dieser so ermittelten Koordinate mit den tatsächlichen Pixelwerten auf dem Monitor (640,512) wurde ein Offset-Wert errechnet. Dieser Wert wurde von allen folgenden Blickkoordinaten abgezogen. Diese Maßnahme war nötig, da sich in Vorversuchen eine Verschiebung der ermittelten Koordinaten nach rechts unten im Vergleich zu den tatsächlich fixierten Bildpunkten zeigte.

Zur Fixationsanalyse wurde die Blickgeschwindigkeit zwischen zwei Messwerten ermittelt. Lag diese unter 50°/s so wurde dieser Messwert als möglicher Teil einer Fixation erkannt. Da aber eine Dauer von mindestens 120 ms für eine Fixation vorausgesetzt wurde, stellte das Programm erst im Falle von mehr als 7 Messwerten in Folge, die unter diese Geschwindigkeitsgrenze gefallen waren, eine Fixation fest. Beide Kriterien ergaben sich aus den physiologischen Grundlagen von Augenbewegungen. Aus allen aufeinanderfolgenden Fixationsmesswerten wurde anschließend der Mittelwert gebildet.

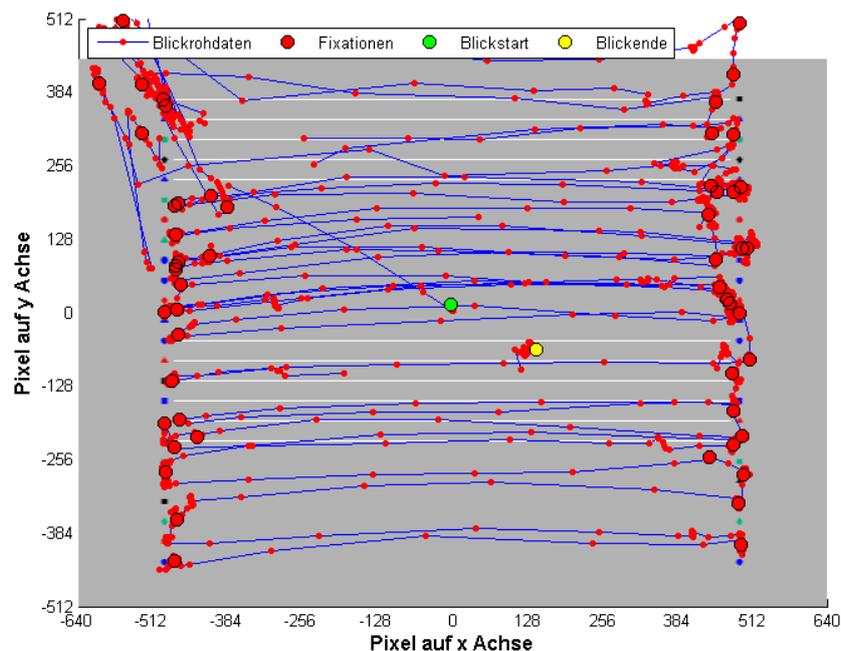
Zusätzlich wurden Fixationen, welche zwischen den Spalten lagen und somit mit Sicherheit keine Fixationen auf Stimuli sein konnten, gelöscht. Hierbei könnte es sich um Fixationen auf die weißen Verbindungslinien, oder komplett aufgabenfremde Fixationen, handeln. Deshalb wurden Fixationen im Bereich von 570 bis 710 horizontalem Pixelwert bei den Trials mit kleinem Spaltenabstand, zwischen 440 und 840 bei mittlerem Spaltenabstand und zwischen den Pixelwerten 250 bis 1030 bei großem Spaltenabstand, entfernt. In Fällen, in denen klar zu erkennen war, dass es sich trotz der großen Entfernung zu den Stimuli dennoch um eine Fixation eines relevanten Objektes handeln musste, wurde diese natürlich nicht entfernt.

Messausfälle wurden von dem Eyetracking-Programm ebenfalls registriert. Hierfür diente die mit *Eye Found* bezeichnete Spalte im Rohdatenfile. Eine eingetragene 0 zeigte dabei einen Messausfall an, der z.B. durch Blinzeln der Versuchsperson oder einen Blicksprung aus dem Messbereich der Kamera heraus, entstehen konnte und jeweils zu einem Ausfall der Pupillen- oder *glint spot*-Registrierung führte. Trials mit einer Messausfallrate über 5% wurden komplett aus der Gesamtauswertung herausgenommen.

Ebenso nicht in die Gesamtauswertung mit einbezogen wurden alle Trials mit 2 versteckten Fehlern. Falls bereits nach wenigen Blicksprüngen zwei Fehler entdeckt wurden, so konnte die Versuchsperson den Trial bereits beenden, ohne alle weiteren Stimuli noch zu betrachten. Somit war bei den 2-Fehlertrials nicht garantiert, dass alle Stimuli betrachtet wurden.

Auch Trials in denen offensichtlich ein Problem mit der Messung der Augenbewegungen vorlag, wurden manuell aus der Analyse aussortiert (Vergleiche Abbildung 13). Da auf Basis der verfälschten Messwerte keine wirklichkeitsgetreue Fixationsanalyse durchgeführt werden konnte, wurden Trials dieser Art entfernt. Vermutlich wurde in diesen Fällen durch leichte Bewegungen des Kopfes der Tracking-Bereich verlassen. Dafür spricht, dass sich die Fehler in den oberen Ecken häuften, welche sich im Grenzbereich des zuvor erwähnten Tracking-Kegels befanden.

Mit in die Auswertungen aufgenommen wurden, im Gegensatz zu den Untersuchungen von Inamdar und Pomplun (2003), Trials mit Falschbenennungen der Fehleranzahl. Diese Trials auszusortieren, war in diesem Versuch nicht nötig, da die Auswertungen der Blickbewegungen zeigten, dass die Suchstrategie hiervon nicht beeinflusst worden war.



**Abbildung 13:** Beispiel für eine fehlerhafte Augenbewegungsmessung. Blickkoordinaten in den oberen Randbereichen des Aufgabenbildes wurden nicht richtig ermittelt, da die Augenbewegungen den Messbereich der Eyetracking-Kamera verlassen hatten. Da hier keine exakte Fixationsanalyse garantiert werden konnte, wurde dieser Trial nicht in die Auswertung mit eingerechnet.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vorversuch zur zeitlichen Auflösung

Die Auswertung der Fixationsdauer und die Gesamtbearbeitungsdauer sollten Aufschluss darüber geben, ob die von der Software ermittelten Daten den tatsächlichen Werten entsprachen. Die mittlere Fixationsdauer lag bei allen 60 Fixationspunkten bei ca. 1980,5 ms also knapp unter den vom Metronom vorgegebenen 2 s.

Die Gesamtbearbeitungszeit eines Aufgabenbildes von jeweils ca. 61039,2 ms  $\approx$  61 s entsprach ungefähr den 30\*2 s, die zu erwarten waren. Abbildung 14 zeigt eine der Blickbewegungsauswertungen.

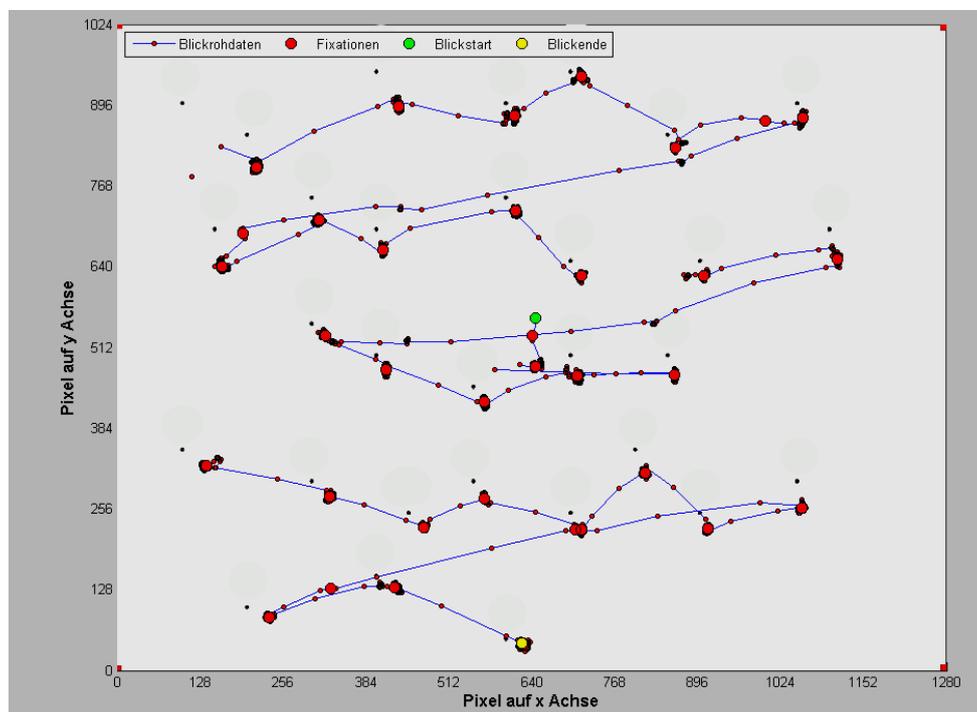


Abbildung 14: Blickbewegungsauswertung. Insgesamt wurden 30 Bildpunkte fixiert.

### 3.2 Trade-off Experimente

#### 3.2.1 Fehlerrate

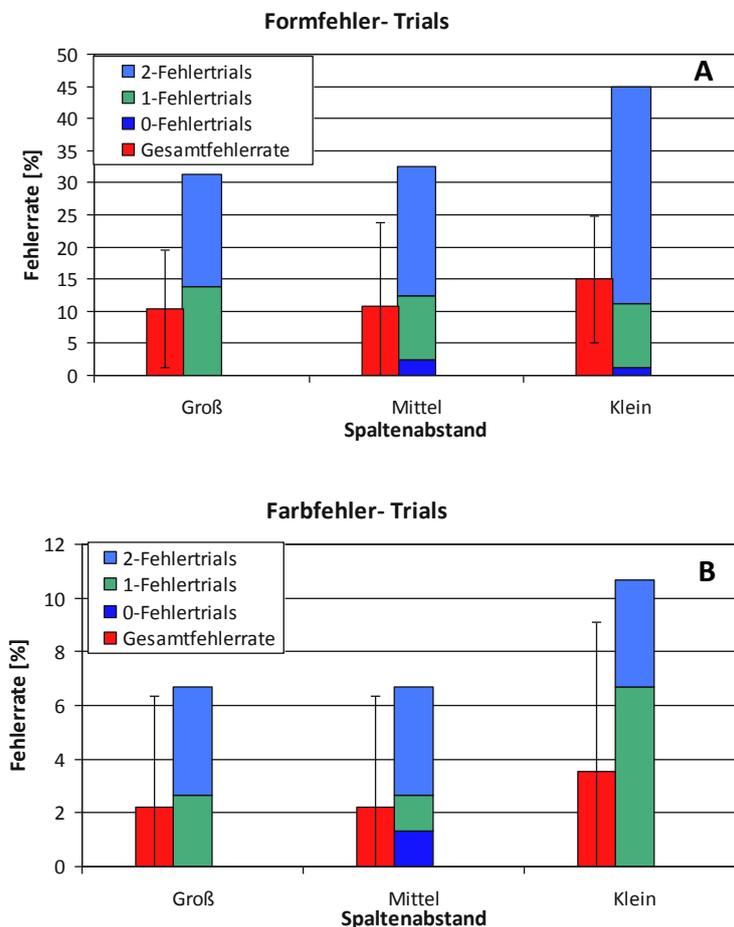
Die von der Versuchsperson erkannten Fehler zwischen den Stimuli der linken und rechten Spalte entsprachen nicht in allen Fällen der tatsächlichen Fehleranzahl. Nahezu alle falsch benannten Fehleranzahlen gingen darauf zurück, dass einzelne Fehler nicht entdeckt wurden. Nur knapp 6% aller falschen Antworten kamen dadurch zustande, dass eine höhere Fehleranzahl genannt wurde, als tatsächlich in diesem Aufgabenbild vorhanden war.

Die Diagramme in Abbildung 15 zeigen die Gesamtfehlerraten gemittelt über alle Versuchspersonen für jede der drei Abstandsbedingungen. Ebenfalls dargestellt sind die unterschiedlichen Fehlerraten pro Fehler- und Abstandsbedingung. Diese Werte verdeutlichen, welchen Anteil die einzelnen Fehlerbedingungen an der Gesamtfehlerrate

hatten. Es wurde ersichtlich, dass die Gesamtfehlerraten zwischen 2,2% und 3,6% bei den Farbfehlertrials lagen, wohingegen die Formfehlertrials durchweg mit höheren Fehlerraten von bis zu 15% abgeschnitten haben. Des Weiteren kann man erkennen, dass die meisten Fehler bei der Bearbeitung von 2-Fehlertrials passierten, abgesehen von der 10°-Abstandsbedingung der Farbfehlertrials in welcher die Fehlerrate für die 1-Fehlertrials höher lag. Wie zu erwarten war ist die Fehlerrate bei den 0-Fehlertrials für alle Bedingungen sehr gering. Dies hängt auch mit dem oben beschriebenen Sachverhalt zusammen, dass häufiger Fehler übersehen, als fiktive ergänzt wurden.

Die hohen Standardabweichungen zeigen auch hier wieder eine große Streuung innerhalb der Versuchspersonen. Während ein Proband eine Gesamtfehlerrate von 28,9% erzielte, erreichten andere sogar 0%.

Es ließ sich außerdem bei beiden Versuchsgruppen der Trend zu einer höheren Fehlerrate mit abnehmendem Spaltenabstand erkennen. Die geringste Fehlerrate wurde bei den Aufgaben mit maximalem Spaltenabstand erreicht.



**Abbildung 15:** Für die Formfehlertrials (A) wird die Gesamtfehlerrate gemittelt über alle Versuchspersonen mit Standardabweichung für alle drei Abstandsbedingungen aufgezeigt. Die zweite Säule gibt die Fehlerraten pro Fehlerbedingung an, verdeutlicht also, welchen Anteil die verschiedenen Fehlerbedingungen zu der Gesamtfehlerrate beitrugen. Abbildung (B) zeigt dieselben Werte für die Farbfehlertrials.

### 3.2.2 Suchstrategien

Da zu Beginn jedes Trials ein Kreuz in der Mitte der Bildschirmfläche fixiert werden sollte, starteten die Augenbewegungen stets im Zentrum des Monitors. Sobald das Aufgabenbild erschien schwenkte der Blick in nahezu allen Fällen auf den obersten Stimulus der linken Spalte. Von dieser Suchstrategie gab es nur eine Ausnahme, bei der die Versuchsperson häufiger den rechten, als den linken obersten Stimulus zu Beginn fixierte.

Auf die erste Fixation folgten bei allen Probanden oszillierende Blicksprünge zwischen den Stimulispalten.

### 3.2.3 Fehler in der Form

Das Hauptaugenmerk lag bei diesen Versuchen auf dem *Trade-off* zwischen Blickbewegungen und VSTM-Einsatz. Hierfür wurde als erstes die mittlere Anzahl an Blicksprüngen zwischen den Stimulispalten pro Trial ausgewertet. Der Parameter Spaltenabstand zeigte jedoch keinen signifikanten Einfluss bezüglich der Anzahl der Blicksprünge zwischen den Bildhälften pro Trialdurchgang (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,22) = 2,63$ ;  $p = 0,095$ ;  $\eta_p^2 = 0,19$ ). Es ließ sich zwar der Trend zur Abnahme der Blicksprunganzahl mit zunehmendem Spaltenabstand erkennen, wie in Abbildung 16A zu erkennen ist, doch bedingt durch eine kleine Stichprobengröße ( $n$ ) ist der Effekt nicht signifikant. Dennoch zeigt die Effektstärke mit einem Wert von 0,19 einen großen Effekt an. Die große Spannbreite von mindestens 8 bis hin zu 53 spaltenübergreifenden Blicksprüngen in einem Trial macht die enorm große Standardabweichungen, wie sie in Abbildung 16A eingezeichnet sind, verständlich.

Der Spaltenabstand wirkte sich nach unseren Ergebnissen auf die durchschnittliche Dauer einer Fixation ebenfalls nicht signifikant aus (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,22) = 1,75$ ;  $p = 0,197$ ;  $\eta_p^2 = 0,14$ ). Abbildung 16B zeigt dennoch, dass die Tendenz zur Abnahme der Fixationsdauer bei kleiner werdendem Spaltenabstand vorhanden war. Hier ließ sich wieder ein großer Effekt anhand der Effektstärke von 0,14 aufzeigen. Aber wie für die Blicksprunganzahl, gab es auch hier enorme Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchspersonen. Es konnten Fixationen von 226,09 ms bis zu 1293,59 ms beobachtet werden.

Wie auch in den Experimenten von Hardiess, Gillner & Mallot (2008) hatte die Abstandsbedingung keinen Einfluss auf die mittlere Anzahl der Fixationen pro Trial, wie sich in Abbildung 16C erkennen lässt (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,22) = 0,67$ ;  $p = 0,521$ ;  $\eta_p^2 = 0,06$ ). Dies zeigt sich nicht nur durch  $p > 0,5$  sondern auch in der geringen Effektstärke 0,06. Die Anzahl der Fixationen pro Trial schwankte für die einzelnen Versuchspersonen zwischen 20 und 75.

Hochsignifikanten Einfluss hatte der Spaltenabstand hingegen auf die durchschnittliche Gesamtbearbeitungsdauer pro Trial (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,22) = 28,37$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,72$ ). Je weiter die Stimuli voneinander entfernt waren, desto mehr Zeit verstrich bis zur Antwort. Dies belegt Abbildung 16D. Die Gesamtbearbeitungszeit für ein Aufgabenbild lag zwischen 9,6 s und 36,62 s.

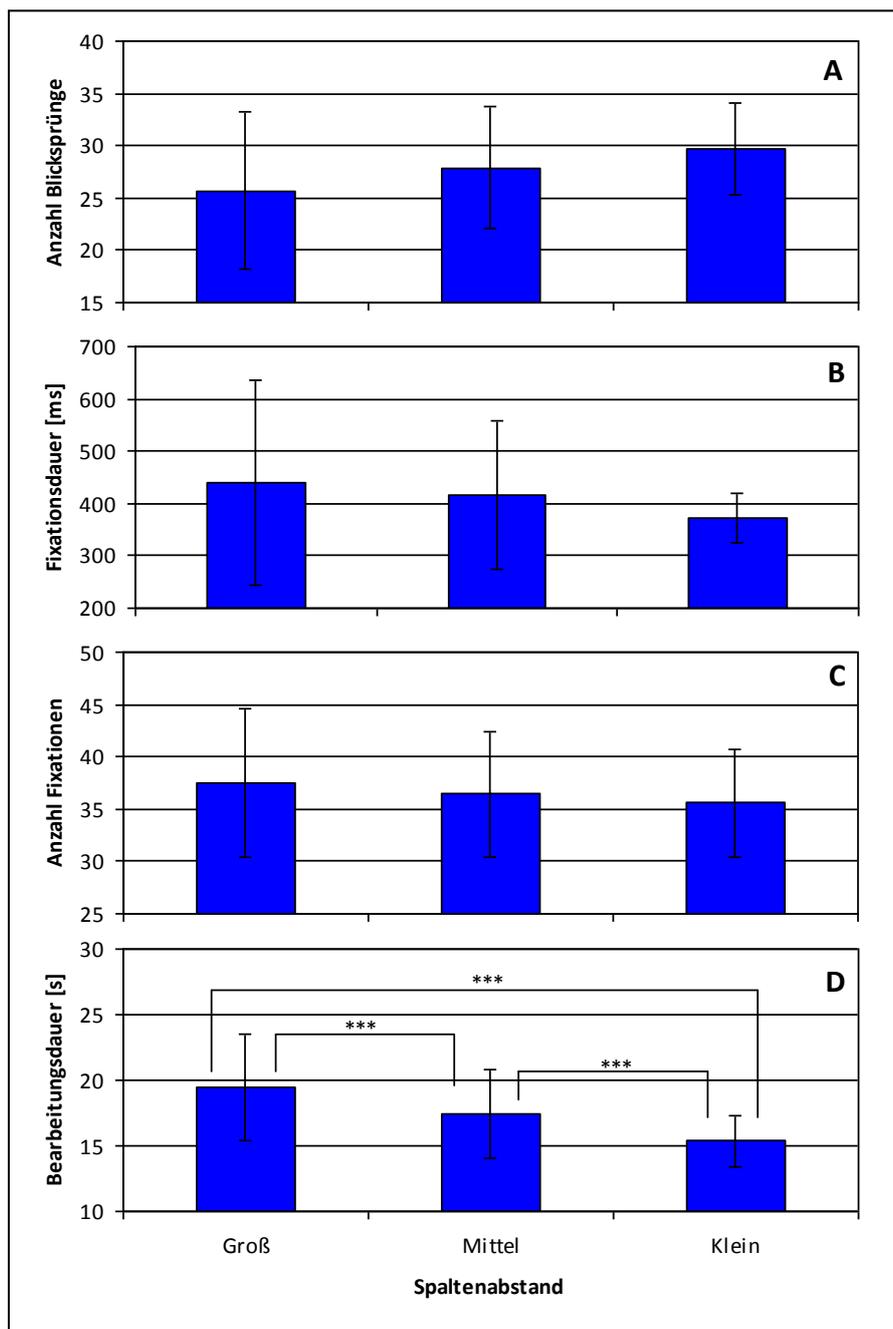


Abbildung 16: Anzahl der Blicksprünge zwischen den Bildhälften (A), Fixationsdauer (B), Fixationsanzahl pro Trial (C) und die Gesamtbearbeitungszeit pro Trial (D) gemittelt über alle Probanden der Formfehler-Trials.

Abbildung 17 zeigt Beispielblickbewegungen einer Versuchsperson für alle drei Abstandsbedingungen. Diese Versuchsperson zeigte deutlich den oben beschriebenen Trend zur Abnahme der spaltenübergreifenden Blicksprünge für einen größer werdenden Stimuliabstand.

### 3 Ergebnisse

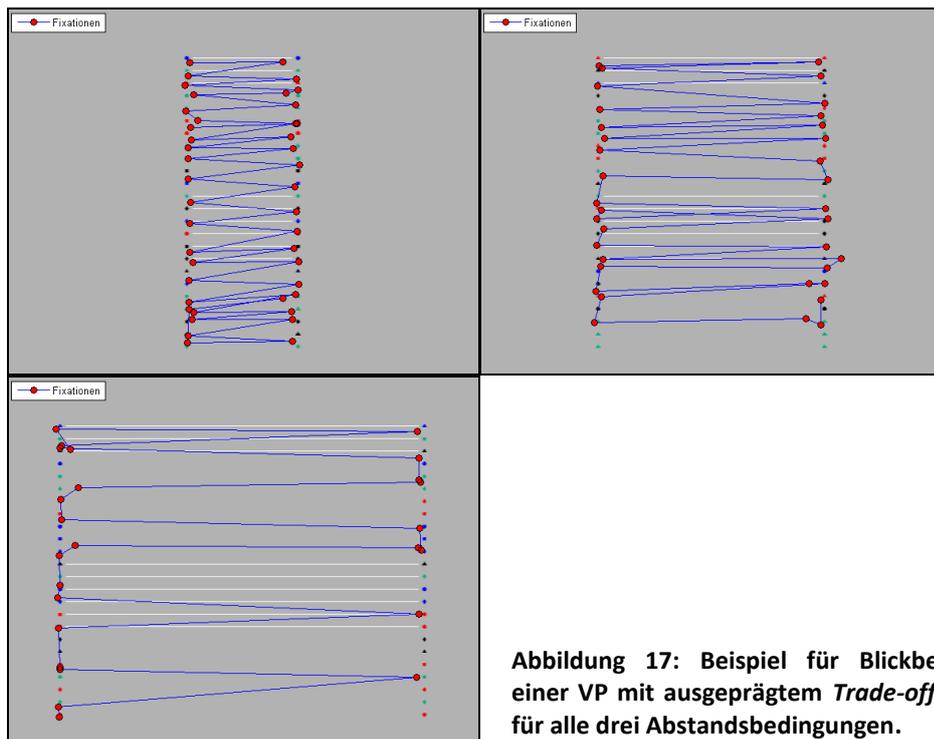


Abbildung 17: Beispiel für Blickbewegungen einer VP mit ausgeprägtem *Trade-off* Verhalten für alle drei Abstandsbedingungen.

#### 3.2.4 Fehler in der Farbe

Für die Farbfehlertrials wurden dieselben Werte betrachtet, wie bereits zuvor für die Formfehlertrials. Genau wie für die Formfehler-Trials hatte der Parameter Spaltenabstand auch hier keinen signifikanten Einfluss bezüglich der Blicksprunganzahl (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,24) = 3,34$ ;  $p = 0,053$ ;  $\eta_p^2 = 0,22$ ). Die Effektstärke zeigte aber einen großen Effekt mit 0,22. Unsere Experimente zeigten somit den Trend, wie bereits von Inamdar und Pomplun (2003) beobachtet, dass die Anzahl der Blicksprünge zwischen den Bildhälften zwischen der  $10^\circ$  und der  $30^\circ$  Bedingung, so wie zwischen der  $20^\circ$  und der  $30^\circ$  Bedingung, abnimmt. Allerdings ließ sich keine Abnahme der bildhälftenübergreifenden Sakkaden zwischen der  $10^\circ$  und  $20^\circ$  Bedingung feststellen (Vergleiche Abbildung 18A). Manche Versuchspersonen konnten ein Aufgabenbild mit nur 8 Blicksprüngen zwischen den Spalten lösen, andere benötigten hierzu bis zu 55. Diese enorme Spannweite macht deutlich, warum hier kein signifikantes Ergebnis erzielt werden konnte.

Für die mittlere Dauer einer Fixation ließ sich, wie in Abbildung 18B dargestellt, keinerlei Effekt bedingt durch die Abnahme des Spaltenabstandes erkennen (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,24) = 0,04$ ;  $p = 0,965$ ;  $\eta_p^2 = 0,00$ ). Auch bei der mittleren Dauer einer Fixation gab es große Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden. Die geringsten Werte lagen bei 214,86 ms, wohingegen die maximale mittlere Fixationslänge eines Probanden bei 732,61 ms lag. Dies zeigte sich in der hohen Standardabweichung, welche in Abbildung 18B eingezeichnet ist.

Abbildung 18C zeigt die mittlere Anzahl der Fixationen, welche zur Lösung einer Aufgabe benötigt wurden. Die Probanden benötigten hierfür zwischen 14 und 68 Fixationen. Die Abstandsbedingung zeigte auch für diesen Wert keinen signifikanten Einfluss (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,24) = 3,35$ ;  $p = 0,052$ ;  $\eta_p^2 = 0,22$ ). Aber dennoch war

### 3 Ergebnisse

der Trend erkennbar, dass die Anzahl der Fixationen mit abnehmendem Spaltenabstand ebenfalls abnahm. Hierfür sprach auch die große Effektstärke von 0,22.

Signifikanten Einfluss hatte die Abstandsbedingung auf die Gesamtbearbeitungszeit (1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung,  $F(2,24) = 11,08$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta_p^2 = 0,48$ ). Ein vergrößerter Spaltenabstand führte zu einer längeren Gesamtbearbeitungsdauer (Vergleiche Abbildung 18D). Für die Bearbeitung eines Trials wurden mindestens 5,58 s und höchstens 30,07 s benötigt.

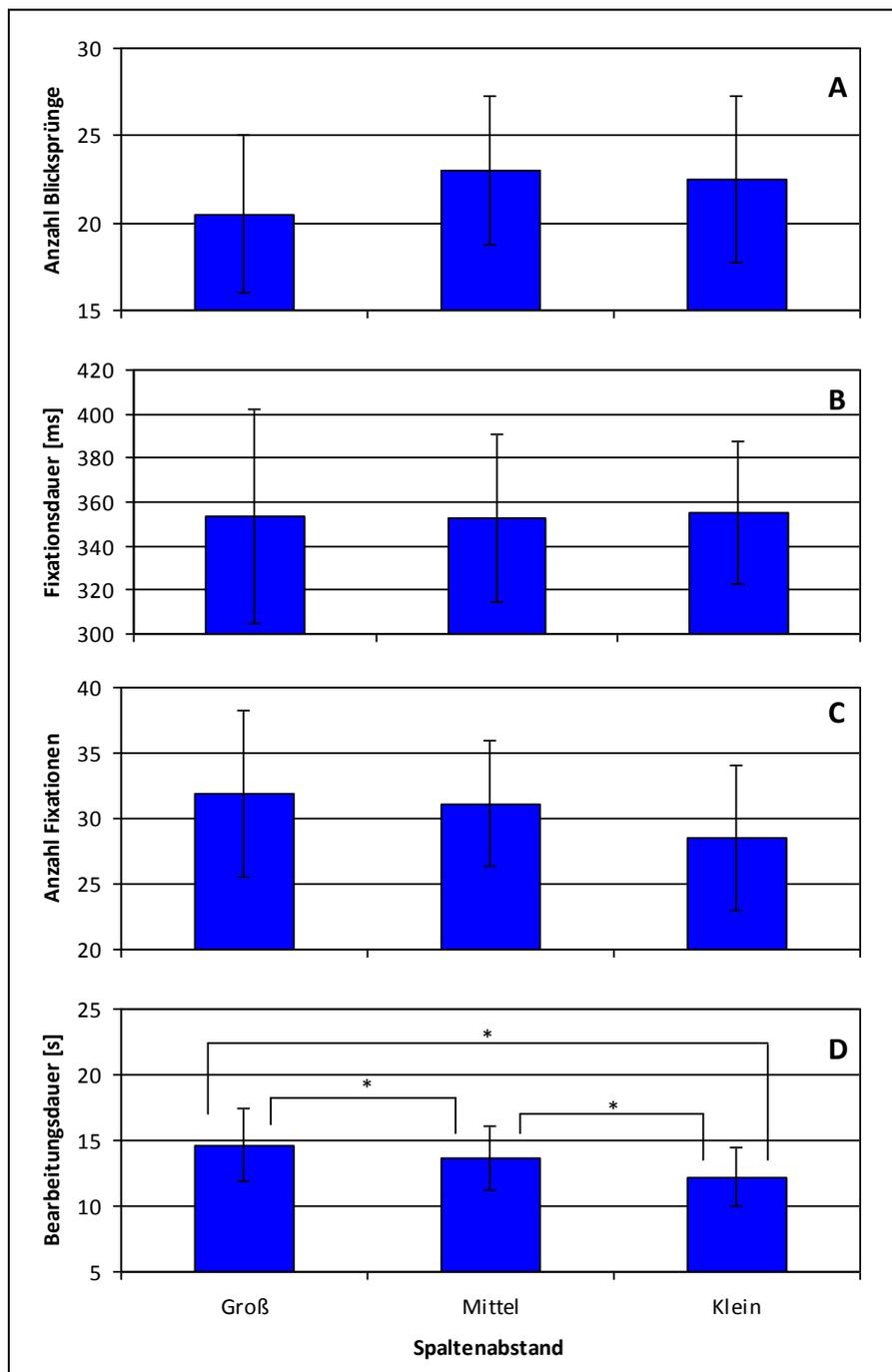


Abbildung 18: Anzahl der Blicksprünge zwischen den Bildhälften (A), Fixationsdauer (B), Fixationsanzahl pro Trial (C) und die Gesamtbearbeitungsdauer pro Trial (D) gemittelt über alle Probanden der Farbfehler-Trials.

### 3.2.5 Vergleich zwischen Form- und Farbfehlertrials

Von großem Interesse für diese Experimente war der Vergleich zwischen Form- und Farbfehlertrials. Hierfür wurde ebenfalls die mittlere Anzahl der bildhälftenübergreifenden Blicksprünge betrachtet. Abbildung 19A verdeutlicht, dass diese Werte in den Farbfehlertrials für alle Spaltenabstände unterhalb derer für die Formfehlertrials lagen. Die Unterschiede waren mit einer mittleren Differenz von 5,8 Blicksprüngen sogar als signifikant zu betrachten (T-Test: Spaltenabstand „Groß“:  $t(23) = 2,12$ ;  $p < 0,05$ ; Spaltenabstand „Mittel“:  $t(23) = 2,41$ ;  $p < 0,05$ ; Spaltenabstand „Klein“:  $t(23) = 3,88$ ;  $p < 0,001$ ).

Die Betrachtung der durchschnittlichen Fixationsdauer lieferte hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Form- und Farbfehlertrials (T-Test: Spaltenabstand „Groß“:  $t(23) = 1,54$ ;  $p = 0,138$ ; Spaltenabstand „Mittel“:  $t(23) = 1,54$ ;  $p = 0,138$ ; Spaltenabstand „Klein“:  $t(23) = 1,02$ ;  $p = 0,318$ ). Wie aber Abbildung 19B zeigt, waren auch hier die ermittelten Werte in den Trials, welche Farbfehler beinhalteten, geringer als in jenen mit Formfehlern. Die Dauer einer Fixation in den Formfehlertrials lag im Durchschnitt ungefähr 54 ms über der Fixationsdauer in einem Aufgabenbild mit Farbfehler.

Darüber hinaus wurden in den Farbfehlertrials im Mittel 6 Fixationen weniger zur Aufgabebearbeitung benötigt. Dieser Unterschied erreichte wiederum Signifikanzniveau, wie in Abbildung 19C dargestellt ist (T-Test: Spaltenabstand „Groß“:  $t(23) = 2,09$ ;  $p < 0,05$ ; Spaltenabstand „Mittel“:  $t(23) = 2,43$ ;  $p < 0,05$ ; Spaltenabstand „Klein“:  $t(23) = 3,29$ ;  $p < 0,01$ ).

Ein weiterer Unterschied zwischen Form- und Farbfehlersuche zeigte sich durch eine 3,9 Sekunden längere mittlere Gesamtbearbeitungsdauer für Aufgabenbilder mit Formfehlern. Aus Abbildung 19D kann man ablesen, dass es sich hierbei um eine sehr signifikante Beobachtung handelte (T-Test: Spaltenabstand „Groß“:  $t(23) = 3,51$ ;  $p < 0,01$ ; Spaltenabstand „Mittel“:  $t(23) = 3,26$ ;  $p < 0,01$ ; Spaltenabstand „Klein“:  $t(23) = 3,70$ ;  $p < 0,01$ ).

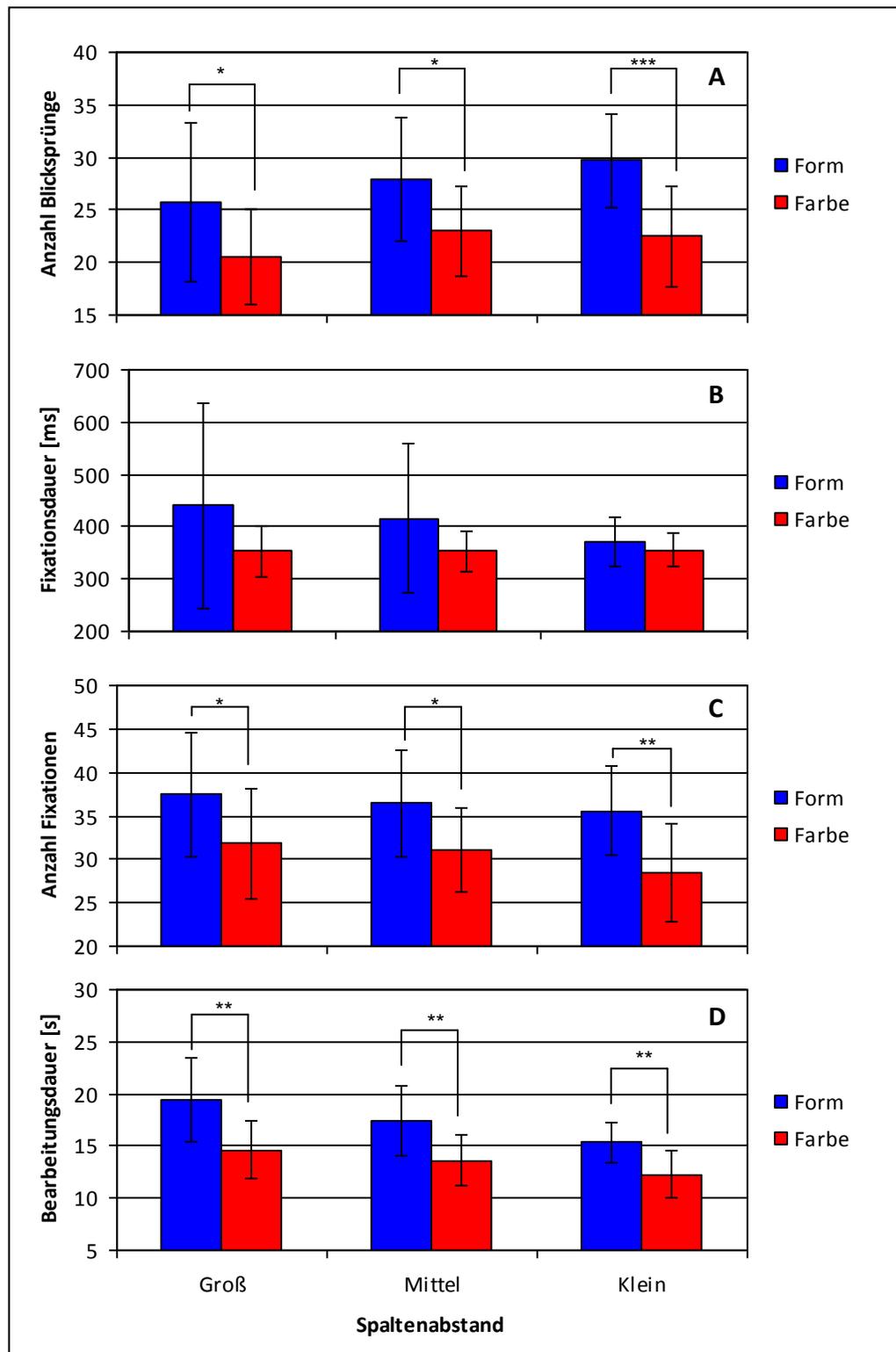


Abbildung 19: Vergleich zwischen den Form- und Farbfehler-Trials bezüglich Anzahl der Blicksprünge zwischen den Bildhälften (A), Fixationsdauer (B), Fixationsanzahl pro Trial (C) und die Gesamtbearbeitungszeit pro Trial (D). Signifikanzen wurden mit Hilfe von T-Tests ermittelt.

## 4 Diskussion

### 4.1 Vorversuch zur zeitlichen Auflösung

Der Vortest zur zeitlichen Auflösung des Eyetrackers zeigte, dass es zu keiner Verzerrung der gemessenen Werte kam. Sowohl die Dauer der einzelnen Fixationen, als auch die Gesamtbearbeitungszeit lieferten Werte im erwarteten Bereich.

Die etwas höher als 60 s ( $30 \text{ Bildpunkte} * 2 \text{ s} = 60 \text{ s}$ ) ausgefallene Gesamtbearbeitungsdauer, rührte daher, dass die anfängliche Orientierung auf dem Bildschirm nach Verschwinden des Eichkreuzes mit in die Gesamtbearbeitungszeit eingeflossen war.

Der 2-Sekunden-Takt des Metronoms gab vor, wann eine Sakkade zum nächsten Bildpunkt gemacht werden sollte. Ein 2 s-Intervall beinhaltete also den Blicksprung auf den Bildpunkt und dessen Fixation. Damit war auch die, knapp unterhalb der zwei Sekunden liegende, durchschnittliche Länge einer Fixation von ca. 1980,5 ms zu erklären.

Die Ergebnisse zeigten also, dass es keine Fehlerquelle bezüglich der zeitlichen Auflösung in der Eyetracking-Software gab.

Die in Abbildung 14 dargestellt Blickbewegungsauswertung zeigt die im Kapitel Datenanalyse erwähnte Verschiebung der Messwerte nach rechts unten. Diese Ungenauigkeit wurde in den darauffolgenden *Trade-off* Versuchen durch das beschriebene Verfahren korrigiert. Für die Auswertungen zum Test der zeitlichen Auflösung, war dies ohne Relevanz.

### 4.2 Trade-off Experimente

#### 4.2.1 Fehlerrate

Die Auswertungen der Fehlerraten zeigten einen ganz deutlich Trend: Die Fehlerraten in den Formfehlertrials lagen um ein Vielfaches höher, als die Fehlerraten der Farbfehlertrials. Diese Beobachtung sprach dafür, dass die Objekteigenschaft Farbe für die Probanden einfacher zu erfassen war. Vermutlich spielte hier ebenfalls eine Rolle, dass die Aufgabenbilder leicht unscharf abgebildet wurden, um das periphere Erfassen der Objekte zu vermeiden. Das hatte natürlich stärkeren Einfluss auf die klare Abgrenzung der Formen untereinander, als auf die Farbunterschiede zwischen den Objekten.

Aber auch ohne diesen Unterschied wäre eine höhere Fehlerrate für die Formerkennung zu erwarten gewesen. Der Grund hierfür liegt in der einfacheren Verarbeitung von Farbeindrücken in unserem Sehsystem. Der Farbeindruck wird bereits in der Retina, je nach gereiztem Zapfentyp, festgelegt. Zur weiteren Identifizierung der Farbe eines Objektes sind weniger Verschaltungsprozesse in der Sehbahn von Nöten, als zur Formerkennung. Für die Erkennung einer geometrischen Form ist eine vergleichsweise hohe räumliche Auflösung nötig. Unsere Formen unterschieden sich jeweils nur um wenige Pixel voneinander, was die Differenzierung z.B. zwischen einem Kreis und einer Raute sehr schwierig machte.

Die Tatsache, dass bei den 10°-Abstandtrials die meisten Falschbenennungen stattfanden, ließ sich vermutlich auf ein schnelleres und damit auch oberflächigeres Absuchen zurückführen. Dies belegten auch die geringeren Bearbeitungszeiten für die kleinen Spaltenabstände. Bei Aufgaben mit maximalem Stimuliabstand ließen sich die Probanden im Schnitt mehr Zeit zur Suche und machten daher auch seltener Fehler.

Die 2-Fehlertrials wurden unter den Fehlerbedingungen am häufigsten falsch beantwortet. Zum einen, weil bei zwei versteckten Fehlern die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu übersehen größer war, als bei nur einem versteckten Fehler. Möglicherweise spielte aber auch die Tatsache eine Rolle, dass nach der Entdeckung eines Fehlers im Aufgabenbild, die Intensität mit der nach weiteren Fehlern gesucht wurde abnahm.

### 4.2.2 Suchstrategien

Dass fast alle Probanden mit dem obersten Stimulus der linken Spalte die vergleichende Suche begannen, hat seinen Ursprung sicherlich in der gewohnten Leserichtung der Europäer. Auch bei Lesetexten oder Bildgeschichten beginnt man in der oberen linken Ecke. Der Proband, welcher sowohl rechts als auch links oben seine erste Fixation machte, war sich nach eigenen Angaben während der Bearbeitung der Trials dessen nicht bewusst. Daher konnte er auch keinen Grund für dieses abweichende Verhalten nennen.

### 4.2.3 Fehler in der Form

Die Studie von Inamdar und Pomplun (2003) stellte einen *Trade-off* zwischen Augenbewegungen und Arbeitsgedächtnis fest. Dieser *Trade-off* zeigte sich in ihren Auswertungen hauptsächlich in zwei Parametern. Zum einen in einer Abnahme der Sakkadenanzahl zwischen den Bildhälften, zum anderen in einer Zunahme der Verweildauer innerhalb einer Hälfte, jeweils hervorgerufen durch eine Erhöhung des Stimuliabstandes. In unserer Auswertung der Formfehlertrials zeigten sich diese Trends ebenfalls. Wobei hier die Verweilzeit innerhalb einer Hälfte durch die mittlere Fixationsdauer ersetzt wurde. Eine längere Fixationsdauer war ein Hinweis darauf, dass in dieser Zeit mehr Inhalte in das visuelle Arbeitsgedächtnis abgelegt wurden. Die Anzahl an bildhälftenübergreifenden Sakkaden gab ebenfalls Aufschluss darüber, wie viele Stimuli zum Zeitpunkt des Blicksprungs im VSTM gespeichert sein mussten, um diese auf der anderen Seite zum Vergleich heranzuziehen.

Also deuteten unsere Ergebnisse bezüglich der Anzahl der Blicksprünge und der Fixationsdauer auf einen erhöhten Arbeitsgedächtniseinsatz durch zunehmenden Ressourcenbedarf für Blicksprünge zwischen den Stimulispalten hin. Die Unterschiede erreichten keine Signifikanz, was an der geringen Probandenanzahl und der großen Streuung innerhalb der Versuchspersonen lag. In unserem Versuch wurde im Vergleich zu den Ergebnissen von Inamdar und Pomplun (2003), welche eine Bearbeitungszeit von ca. 8,5 s gemessen hatten, eine deutlich höhere Antwortzeit von ungefähr 17,4 s festgestellt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Probanden die Fehlersuche nicht so zügig wie möglich durchführten, wie die eigentliche Anweisung lautete. Zwar waren in unseren Aufgabenbildern 4 Stimuli pro Seite mehr zu betrachten, doch dürfte sich dies nicht in einer so starken Zunahme der Bearbeitungszeit äußern.

Ein weiterer Grund für die höhere Bearbeitungszeit könnte sicherlich auch die oben bereits erwähnte Schwierigkeit bei der Identifikation der Formen gewesen sein. Beide angeführten Gründe würden ebenfalls das *Trade-off* Verhalten beeinflussen. Das wären weitere mögliche Gründe, warum die Auswertung der Blicksprunganzahl und Fixationsdauer keine signifikanten Unterschiede, sondern nur Trends zwischen den Abstandsbedingungen lieferte.

Die Anzahl der Fixationen pro Trial blieb über alle Abstandsbedingungen mit ungefähr 36,5 nahezu konstant. Diese Beobachtung machten auch Hardiess, Gillner und Mallot (2008) in ihren Untersuchungen zum *Trade-off* Verhalten. Zusammen mit der sinkenden Anzahl an bildhälftenübergreifenden Sakkaden, zeigte diese Beobachtung, dass die Anzahl an Sakkaden innerhalb einer Bildhälfte zugenommen haben mussten.

Nur die Unterschiede in den Gesamtbearbeitungszeiten zwischen den drei Abstandsbedingungen erreichten Signifikanzniveau. Mit zunehmendem Spaltenabstand wurden die Antwortzeiten ebenfalls größer. Begründet werden kann dieses Ergebnis wohl am besten durch ein Zusammenspiel der Tendenz zu größerer Fixationsdauer und einem höheren Zeitverbrauch für Blicksprünge zwischen den weiter entfernten Stimuli. Der gesteigerte Zeitverbrauch für die Sakkaden lag zum einen in einer größeren Distanz, die zurückgelegt werden musste, aber zum anderen auch in einer durch größere Ungenauigkeit beim Generieren von Sakkaden hervorgerufenen Zunahme von Ausgleichssakkaden. Alles zusammengenommen führte zu einer signifikanten Zunahme der Gesamtbearbeitungszeit bei steigendem Spaltenabstand. Obwohl die Blicksprünge zwischen den Bildhälften in den Aufgaben mit größerem Spaltenabstand seltener vorkamen, so muss der gesteigerte Zeitverbrauch dies entsprechend ausgeglichen haben.

Die Blickbewegungen in Abbildung 17 zeigen ein besonders stark vom *Trade-off* geprägtes Suchverhalten einer Versuchsperson über alle drei Abstandsbedingungen. Der Vergleich zwischen den unterschiedlichen Abstandsbedingungen machte klar, dass vor jedem Blicksprung in die andere Bildhälfte eine je nach Suchstrategie unterschiedliche Anzahl an Stimulieigenschaften im visuellen Arbeitsgedächtnis gespeichert worden sein muss. Während ein großer Stimuliabstand, mit einem hohen Kosteneinsatz für Blicksprünge verbunden, zu einer Verschiebung der Suchstrategie hin zur maximalen VSTM-Nutzung führte, wurde bei den 10°-Abständen das Aufgabenbild selbst als externer Speicher genutzt, auf welchen jederzeit wieder durch einen Blicksprung zugegriffen werden konnte. Die unterschiedlichen Suchstrategien waren den Probanden allerdings nicht bewusst. Im Gegenteil: Mehrere Probanden sagten nach der Versuchsteilnahme, dass sie den Eindruck hatten die meisten Blicksprünge zur Bearbeitung der 30°-Trials benötigt zu haben.

### 4.2.4 Fehler in der Farbe

Die Farbfehlertrials sollten zum *Trade-off* Verhalten dieselben Trends liefern, wie die Formfehlertrials. Wiederum durch sehr große Unterschiede unter den Probanden wurde für die Blicksprunganzahl sowie die mittlere Fixationsdauer kein signifikanter Einfluss der Abstandsbedingung festgestellt. Für die bildhälftenübergreifenden Sakkaden ließ sich wiederum ein Trend zur Zunahme der Anzahl mit kleiner werdendem Spaltenabstand betrachten. Eine Ausnahme stellt hier der Schritt zwischen der 10° und 20° Bedingung dar. Hingegen ist für die Fixationsdauer noch nicht einmal ein Trend in Richtung des erwarteten Ergebnisses sichtbar.

Betrachtet man aber die Anzahl der Fixationen, welche in dieser Versuchsgruppe, entgegen der Erwartungen, für abnehmenden Stimuliabstand geringer wurde, so findet sich schnell eine mögliche Erklärung. Womöglich wurde durch die Auswertung mit Hilfe des MATLAB®-Programmes unter bestimmten Umständen eine Fixation auf ein Objekt fälschlicherweise in zwei kürzere Fixationen aufgetrennt. Am häufigsten müsste das für die Trials mit großem Spaltenabstand der Fall gewesen sein. Denn hier lag die Anzahl der Fixationen über und die Dauer einer Fixation unter dem durch Vergleich mit den anderen Abstandsbedingungen zu erwartenden Wert.

Auch in dieser Versuchsgruppe konnten nur signifikante Ergebnisse bei der Betrachtung der Gesamtbearbeitungszeit erreicht werden. Hier spielten die Zunahme der Fixationsanzahl und die Dauer einer Sakkade zwischen den Bildhälften zusammen. Auch hier muss wieder der größere Zeitverbrauch für die bildhälftenübergreifenden Sakkaden ausgeglichen haben, dass es eigentlich insgesamt weniger dieser Blicksprünge gab.

### 4.2.5 Vergleich zwischen Form- und Farbfehlertrials

Der Vergleich zwischen den Versuchsgruppen mit Form- und Farbfehlertrials zeigte für die Anzahl der Blicksprünge zwischen den Bildhälften einen signifikanten Unterschied über alle drei Abstandsbedingungen. Für die Suche nach Farbfehlern wurden weniger bildhälftenübergreifende Sakkaden benötigt, was für eine schnellere Verschiebung der Suchstrategie hin zur stärkeren VSTM-Nutzung spricht. Dies belegt, dass die Speicherung von Farbinformation weniger Ressourcen in Anspruch nimmt, als es für Formeigenschaften der Fall ist.

Die mittlere Dauer einer Fixation in Farbfehlertrials lag ebenfalls unter der in den Formfehlertrials. Zur Farberkennung ist weniger kostenintensive konvergente Verschaltung der visuellen Neuronen nötig, als es zur Identifizierung einer geometrischen Form bedarf. Mit kostenintensiv ist hier sowohl ein zeitlicher Mehrverbrauch, als auch ein höherer Energiebedarf gemeint. Daher kann die Objekteigenschaft Farbe deutlich schneller erkannt und gespeichert werden. Dem entgegen wirkte wohl die oben erwähnte schnellere Verschiebung hin zu einer maximalen VSTM-Ausnutzung, welche zu einer Zunahme der Fixationsdauer führte. Daher wurde zwischen den Trials mit Farb- und denen mit Formfehler kein signifikanter Unterschied gemessen.

Auch die Anzahl der Fixationen lag für die Farbsuche signifikant unter der in den Formfehlertrials ermittelten Fixationsanzahl. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass für die Farberkennung keine Fokussierung direkt auf die Fovea nötig war. Im Vergleich hierzu aber die Form der geometrischen Objekte fast ausschließlich mit einer direkten Fixation erfasst werden konnte. Somit waren für die Formfehlersuche mehr Fixationen von Nöten.

Die Gesamtbearbeitungszeit fasste auch hier alle beobachteten Unterschiede zusammen, so dass auch dieser Wert für die Farbfehlersuche sehr signifikant unterhalb dessen der Formfehlertrials lag. Dies ergibt sich natürlicherweise aus dem Zusammenwirken von einer geringeren Anzahl an zeitintensiven Sakkaden zwischen den Bildhälften, einer geringeren mittleren Fixationsdauer und einer geringeren Anzahl an Fixationen.

### 5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die gestellten Zielsetzungen erfüllt werden konnten. Es konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung des Ressourcenbedarfs, sowohl im Hinblick auf Zeit- als auch Energieverbrauch, zu einer stärkeren Nutzung des Arbeitsgedächtnisspeichers in visuellen Aufgabenstellungen führte. Andererseits kann man die Suchstrategie durch Senken der Augenbewegungskosten, zum Beispiel durch Verringerung des Stimuliabstandes, auch hin zu einer verstärkten Nutzung des externen Gedächtnisses „Umwelt“ verschieben. Dieses Abwägen des Ressourceneinsatzes muss eine unbewusste aber stabile Verhaltensweise sein.

Auch die erwarteten Unterschiede zwischen der Farb- und Formfehlersuche ließen sich durch die Versuche belegen. Nicht nur, dass sich sowohl in den Form- als auch den Farbfehlertrials ein Trend zum *Trade-off* Verhalten zwischen Blickbewegungen und Einsatz des visuellen Arbeitsgedächtnisspeichers zeigte, sondern auch die schnellere und einfachere Verarbeitung von Farbinformation wurde deutlich. Auch das daraus resultierende schnellere Verschieben der Suchstrategie hin zur maximalen VSTM-Ausnutzung und Einschränken der Augenbewegungen zeigte sich beim Vergleich der Farb- und Formfehlertrials.

## Literaturverzeichnis

- Baddeley 2003      BADDELEY, A. D. (2003): Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews, Neuroscience*, 2003, 4, 829-839
- Baddeley 2006      BADDELEY, A. D., REPOVŠ, G. (2006): The multi-component model of working memory: Explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience*, 2006, 139, 5-21
- Carpenter 1988      CARPENTER, R. H. S. (1988): Movements of the eyes. *Pion Limited* (2<sup>nd</sup> edition)
- Droll 2007          DROLL, J. A., HAYHOE, M. M. (2007): Trade-offs between gaze and working memory use. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2007, 33(6), 1352-1365
- Hardiess 2008      HARDIESS, G., GILLNER, S., MALLOT, H.A. (2008): Head and eye movements and the role of memory limitations in a visual search paradigm. *Journal of vision*, 2008, 8, 1-13
- Hayhoe 2005      HAYHOE, M., BALLARD, D. (2005): Eye movements in natural behavior. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 2005, 9(4), 188-194
- Inamdar 2003      INAMDAR, S. , POMPLUN, M. (2003): Comparative search reveals the tradeoff between eye movements and working memory use in visual tasks, *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 599-604
- Jonides 2008      JONIDES, J., LEWIS, R.L., NEE, D.E., LUSTIG, C.A., BERMAN, M.G., SLEDGE MOORE, K. (2008): The Mind and Brain of Short-Term Memory. *Annual Review of Psychoogy.*, 2008, 59, 139-224
- UsersManual      Bedienungsanleitung (DevelopmentSystemUsersManual) der Eyetracking-Kamera *EYEGAZE SYSTEM* von *LC Technologies, Inc.*

## Anhang 1: Instruktion der Probanden in den Formfehlertrials

### Versuchsablauf

#### Kalibrierung:

Hierbei müssen sie nur die nacheinander erscheinenden Punkte auf dem Bildschirm fixieren.

#### Versuch:

Nach der Kalibrierung des Eyetracking-Systems beginnt das Experiment. Nach der Kalibrierung sollten Sie **möglichst regungslos** sitzen bleiben.

Zunächst sehen Sie einen grauen Bildschirm. Dieser graue Bildschirm erscheint auch während des Experiments immer wieder und hat für Sie die Bedeutung einer kurzen Pause. Erst wenn Sie sich bereit fühlen die nächste Aufgabe zu bearbeiten, drücken Sie die **Leertaste** und es erscheint für 2 Sekunden ein Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Dieses Kreuz fixieren Sie! Nach Ablauf der 2 Sekunden erscheint direkt ein Aufgabenbild.

Ihre Aufgabe besteht dann darin zügig in dem Bild nach Unterschieden zwischen der linken und der rechten Spalte zu suchen. Es können entweder **kein, ein oder zwei Unterschiede** in einem Bild enthalten sein. Der Unterschied besteht aber immer in der geometrischen **Form der Objekte** (Dreieck, Raute, Kreis, Quadrat). Die Farbe spielt für Sie keine Rolle.

Durch erneutes Drücken der Leertaste erscheint wieder der graue „Pausenscreen“. In dieser Phase nennen Sie mir die erkannte Fehlerzahl. Wenn Sie erneut die Leertaste drücken, beginnt die nächste Aufgabe wieder mit dem Fixationskreuz...

Insgesamt werden 45 Aufgaben bearbeitet. Sollten Sie während des Experiments das Bedürfnis haben sich zu bewegen oder eine bequemere Position einzunehmen, dann geben Sie mir bitte in einer der Pausephasen Bescheid.

Viel Spaß

## Anhang 2: Instruktion der Probanden in den Farbfehlertrials

### Versuchsablauf

#### Kalibrierung:

Hierbei müssen sie nur die nacheinander erscheinenden Punkte auf dem Bildschirm fixieren.

#### Versuch:

Nach der Kalibrierung des Eyetracking-Systems beginnt das Experiment. Nach der Kalibrierung sollten Sie **möglichst regungslos** sitzen bleiben.

Zunächst sehen Sie einen grauen Bildschirm. Dieser graue Bildschirm erscheint auch während des Experiments immer wieder und hat für Sie die Bedeutung einer kurzen Pause. Erst wenn Sie sich bereit fühlen die nächste Aufgabe zu bearbeiten, drücken Sie die **Leertaste** und es erscheint für 2 Sekunden ein Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Dieses Kreuz fixieren Sie! Nach Ablauf der 2 Sekunden erscheint direkt ein Aufgabenbild.

Ihre Aufgabe besteht dann darin zügig in dem Bild nach Unterschieden zwischen der linken und der rechten Spalte zu suchen. Es können entweder **kein, ein oder zwei Unterschiede** in einem Bild enthalten sein. Der Unterschied besteht aber immer in der **Farbe der Objekte** (schwarz, rot, grün, blau). Die Form spielt für Sie keine Rolle.

Durch erneutes Drücken der Leertaste erscheint wieder der graue „Pausenscreen“. In dieser Phase nennen Sie mir die erkannte Fehlerzahl. Wenn Sie erneut die Leertaste drücken, beginnt die nächste Aufgabe wieder mit dem Fixationskreuz...

Insgesamt werden 45 Aufgaben bearbeitet. Sollten Sie während des Experiments das Bedürfnis haben sich zu bewegen oder eine bequemere Position einzunehmen, dann geben Sie mir bitte in einer der Pausenphasen Bescheid.

Viel Spaß

## Anhang 3: Probandeninformation

### Probandeninformation zum Experiment

Experiment: Arbeitsgedächtnis und Augenbewegungen  
Name der Versuchsleiter: Gregor Hardiess, Petra Leyhr

Sie werden an einem Experiment bezüglich einer Mustervergleichsaufgabe teilnehmen, bei dem der Einsatz des Arbeitsgedächtnisses untersucht wird. Während des Experimentes werden ihre Augenbewegungen mit Hilfe eines Tracking-Gerätes registriert. Das Registrieren der Augenbewegungen ist nicht invasiv, kann nicht zu Schäden führen und hat keine Nebenwirkungen.

Ihre persönlichen, während dieser Studie erhobenen, Daten werden im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen - in anonymisierter Form - veröffentlicht und am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft gespeichert.

Die Teilnahme erfolgt freiwillig und kann zu jedem Zeitpunkt ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden.

Tübingen, den \_\_\_\_\_  
Unterschrift

### Einverständniserklärung zur Teilnahme

Name der Versuchsperson (in Druckbuchstaben): \_\_\_\_\_

Ich erkläre mich bereit, an dem o.g. Experiment teilzunehmen.

Ich habe den Text der Probandeninformation und dieser Einverständniserklärung gelesen und verstanden. Aufgetretene Fragen wurden mir verständlich und vollständig beantwortet. Ich hatte ausreichend Zeit, Fragen zu stellen und mich für oder gegen eine Teilnahme zu entscheiden.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine persönlichen, während dieser Studie erhobenen, Daten im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen - in anonymisierter Form - veröffentlicht und am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft gespeichert werden.

Tübingen, den \_\_\_\_\_  
Unterschrift