

**Konjugierte Stimuluseigenschaften und die
Charakterisierung des Arbeitsgedächtnisses in der
vergleichenden visuellen Suche**

Bachelorarbeit

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von

Caroline Weber

Tübingen, August 2017

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass ich diese Arbeit selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.
- dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist.

Tübingen, den _____

(Datum und Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung.....	2
1. Abstract	5
2. Einleitung	5
Das Arbeitsgedächtnis	6
Das Mehrkomponentenmodell nach Baddeley und Hitch.....	7
Neue Modellvorstellung: Die prozessorientierten Modelle	8
Die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses	8
Die Merkmalsintegrationstheorie nach Anne Treisman.....	10
Die Merkmalssuche.....	12
Die vergleichende visuelle Suche	14
Forschung zur Entscheidungsfindung.....	15
3. Material und Methoden	18
Versuchspersonen	18
Versuchsteil 1: Die vergleichende visuelle Suche	18
Versuchsaufbau und Stimuli	18
Prozedur	21
Abhängige Variablen.....	21
Statistische Analyse	22
Versuchsteil 2: Change Detection-Versuch	22
Versuchsaufbau und Stimuli	22
Prozedur	23
Abhängige Variablen.....	23
Statistische Analyse	24

4. Ergebnisse	25
Versuchsteil 1: Vergleichende visuelle Suche	25
Leistung der Versuchspersonen	25
Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Stimuli.....	27
Links / rechts Symmetrie	29
Entscheidungsfindung zwischen Akquisition und Memorierung.....	31
Stabilität der Strategie über die Versuchsdurchläufe	33
Versuchsteil 2: Change Detection-Versuch	35
Kapazität des Arbeitsgedächtnisses in Abhängigkeit von der Set-Größe	36
Korrelation zwischen Gesamtkapazität und Wahl der Strategie.....	37
5. Diskussion	39
Leistung der Versuchspersonen und Stabilität der Strategie	39
Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Stimuli.....	40
Individuelle Entscheidungsfindung zwischen Akquisition und Memorierung	43
Zusammenhang zwischen der Entscheidungsfindung und der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses	44
6. Zusammenfassung	45
7. Literaturverzeichnis	47

1. Abstract

Das Treffen von adäquaten Entscheidungen ist ein kognitiver Prozess, der fortlaufend stattfindet und das Verhalten von Mensch und Tier beeinflusst. Bei einem solchen Entscheidungsprozess muss der Einsatz verschiedener Verhaltensstrategien gegeneinander abgewogen werden. Solche Strategien beinhalten beispielsweise das Akquirieren von Informationen oder die Memorierung im Arbeitsgedächtnis. Hierbei wird eine effiziente Entscheidungsfindung durch zwei Faktoren beeinflusst, die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses und die Verarbeitungszeit. In vorherigen Experimenten wurden bereits Unterschiede bezüglich der Strategieweise zwischen einfachen und konjugierten Objekten festgestellt. Es blieb bisher unklar, auf welchen der beiden oben genannten Faktoren diese Unterschiede zurückzuführen waren. In einem weiterführenden Experiment wurde nun mit Hilfe der vergleichenden visuellen Suche mit zwei bekannten und quantifizierbaren Stimulusqualitäten aus der Merkmalsuche analysiert, welche Verarbeitungsstufe durch Konjunktionen beeinflusst wird. Da kein Einfluss der Art des Stimulus auf die Speicherkapazität aber eine längere Verarbeitungszeit für Konjunktionen nachzuweisen war, beruht der Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Objekten vermutlich auf längeren Wahrnehmungs-, Enkodierungs- und Vergleichszeiten. Wie schon in vorherigen Experimenten konnte auch in diesem Versuch gezeigt werden, dass Versuchspersonen spezifische Strategien während der Entscheidungsfindung verfolgten, die sich individuell stark unterschieden. Die Unterschiede zwischen den Versuchspersonen sind vermutlich auf individuell verschiedene Gewichtungen der mit den Strategien verbundenen Kosten zurückzuführen, die durch unterschiedliche Fähigkeiten der Versuchspersonen erfolgten. Da kein Zusammenhang zwischen der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und der Wahl der Strategie gefunden wurde, bleibt unklar, durch welche Gedächtnisabläufe und Faktoren die Wahl der verwendeten Strategie beeinflusst wird.

2. Einleitung

Jeden Tag begegnen uns Menschen Objekte, denen wir eindeutig einen Namen zuordnen können. So ist es beispielsweise sofort möglich, einen Stift zu benennen. Nicht bewusst ist uns jedoch, dass eigentlich nur Ecken, Farben, Formen oder Bewegungen gesehen werden, die zu Einheiten zusammengesetzt werden und es somit ermöglichen, Objektbezeichnungen aus dem Gedächtnis abzurufen. Um zu verstehen, welche Prozesse im Gehirn bei der Erkennung und Memorierung der Objekte

ablaufen, müssen das Arbeitsgedächtnis und das visuelle System des Menschen genauer betrachtet werden.

Das Arbeitsgedächtnis

Das Arbeitsgedächtnis ist für fast alle Alltagssituationen von besonderer Bedeutung, da dieses jede Art der Repräsentation beinhaltet, beispielsweise visuelle, verbale, auditorische oder räumliche Repräsentationen. Es behält Informationen in einem einfach zugänglichen Zustand für einige Sekunden bis Minuten (Eriksson et al. 2015) und hilft dem Menschen, sich sinnvoll zu verhalten und Aufgaben zu lösen (Ma et al. 2014). Der Mensch kann somit aktiv relevante Informationen zum Lösen einer Aufgabe behalten und Verbindung zu irrelevanten Informationen verhindern. Der gezielte Einsatz der temporär gespeicherten Information hängt hierbei von der Zielsetzung (*goal*) der Aufgabe (*task*) und vom Kontext in dem die Aufgabe gestellt wird ab (Eriksson et al. 2015). Das Arbeitsgedächtnis unterstützt eine Vielzahl an Verhaltensweisen von der Wahrnehmung über die Problemlösung bis hin zur Aktionssteuerung (Ma et al. 2014) und resultiert aus der Interaktion von Aufmerksamkeit, Prospektion, Wahrnehmungs- und Langzeitgedächtnisrepräsentationen (Eriksson et al. 2015). Eine bedeutende Eigenschaft des Arbeitsgedächtnisses ist der Erhalt von Informationen auch ohne weiteren sensorischen Input. Da die im Arbeitsgedächtnis enthaltenen Informationen vorausschauend zur Lösung einer Aufgabe genutzt werden, wird oftmals der Begriff „Arbeitsgedächtnis“ der alternativen und eher klassischen Bezeichnung „Kurzzeitgedächtnis“ vorgezogen (Eriksson et al. 2015). Das Arbeitsgedächtnis rekrutiert die Funktionen mehrerer Hirnareale, abhängig von der Art der Information, die erhalten und bearbeitet werden soll. Das Arbeitsgedächtnis wird hauptsächlich als Zusammenwirken des präfrontalen Cortex, welcher Aufmerksamkeitsfunktionen ausübt, mit den Basalganglien und spezialisierten Bereichen für bestimmte Repräsentationen verstanden (Eriksson et al. 2015). Der präfrontale Cortex ist sowohl in Prozesse des Arbeitsgedächtnisses als auch in die des Langzeitgedächtnisses involviert.

Das Mehrkomponentenmodell nach Baddeley und Hitch

Es existieren verschiedene Modellvorstellungen des Arbeitsgedächtnisses. Das wohl bekannteste Modell wurde von Baddeley und Hitch (1974) entworfen und wird als Mehrkomponentenmodell bezeichnet. Da mehrere verschiedene Aufgaben unterschiedlichen Typs gleichzeitig gelöst werden können, stellt das Arbeitsgedächtnis kein einheitliches System dar, sondern besteht aus einzelnen kognitiven Elementen, die miteinander interagieren (Abbildung 1). Die einzelnen Komponenten werden von Baddeley als zentrale Exekutive, phonologische Schleife, räumlich-visueller Notizblock und episodischer Puffer bezeichnet (Baddeley 2000). Die phonologische Schleife ist für das Speichern sprachlicher Informationen verantwortlich, wohingegen der räumlich-visuelle Notizblock vorübergehend räumliche und visuelle Informationen speichert und Informationen aus dem Langzeitgedächtnis kommend manipuliert (Baddeley 2000). Der räumlich-visuelle Notizblock dient demnach zur Lösung visuell-räumlicher Probleme und ist für die räumliche Orientierung zuständig. Somit stellt er ein Teilelement des visuellen Arbeitsgedächtnisses dar. Sowohl die phonologische Schleife, als auch der räumlich-visuelle Notizblock, bestehen aus einem passiven Kurzzeitspeicher und einem aktiven Rehearsal-Mechanismus, der die Gedächtnisinhalte durch Wiederholung immer wieder auffrischt und sie so vor dem Verfall bewahrt. Kontrolliert und koordiniert wird der Informationsfluss in den oben genannten Speichern durch die zentrale Exekutive, die zusätzlich in Verbindung mit dem Langzeitgedächtnis steht (Eriksson et al. 2015). Die zentrale Exekutive dient ausschließlich der zielgerichteten Verarbeitung der Informationen und übernimmt selbst keine Speicherfunktion. Der episodische Puffer wurde erst nachträglich von Baddeley als zusätzliche Komponente zum Mehrkomponentenmodell hinzugefügt und dient als multimodales Speichersystem, als Sicherheitsspeicher (Baddeley 2000). Er speichert Episoden temporär ab und kommuniziert mit den anderen Komponenten des Arbeitsgedächtnisses und dem episodischen Langzeitgedächtnis, welches Episoden und Ereignisse mit persönlichem raumzeitlichen Bezug enthält. Er steht jedoch ebenfalls unter der Kontrolle der zentralen Exekutive (Baddeley 2000;Abbildung 1).

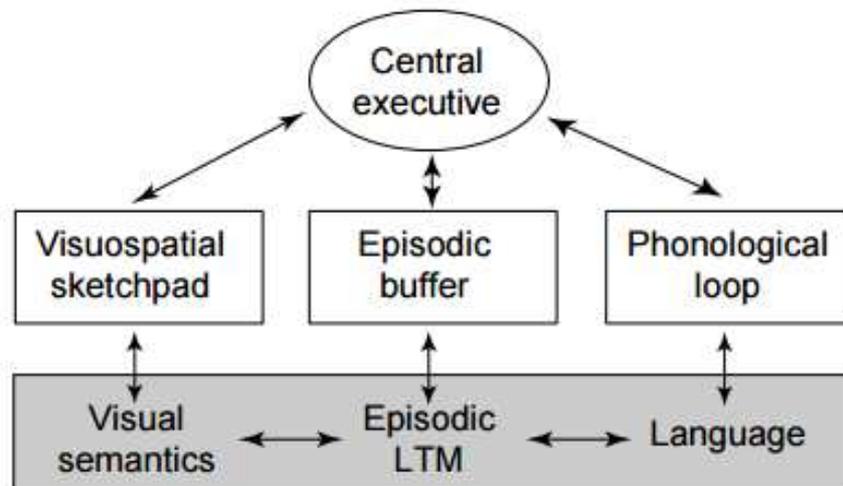


Abbildung 1: Mehrkomponentenmodell nach Baddeley und Hitch mit den drei Speicher-Komponenten: dem räumlich-visuellen Notizblock, der phonologischen Schleife und dem episodischen Puffer, welche von der zentralen Exekutive kontrolliert werden. Die zentrale Exekutive steht über den episodischen Puffer mit dem episodischen Langzeitgedächtnis in Verbindung (Baddeley 2000).

Neue Modellvorstellung: Die prozessorientierten Modelle

Prozessorientierte Theorien, wie sie beispielsweise von Cowan vertreten werden, sehen das Arbeitsgedächtnis nicht als eigenständige Einheit. Der Aufmerksamkeitsfokus richtet sich in diesen Modellen auf Langzeiteinträge und hebt sie für kurze Zeit hervor. Diese sich vorübergehend in einem aktiven Zustand befindlichen Langzeiteinträge, stellen das eigentliche Arbeitsgedächtnis dar. Treisman verglich 1980 den Fokus der Aufmerksamkeit mit einer Art Lichtkegel (*spotlight*). Nur wenn die Gedächtnisinhalte durch Hinweisreize angeregt werden und sich das Objekt im „Licht“ befindet, wird ihnen Aufmerksamkeit zugewendet und eine bewusste Verarbeitung ermöglicht. Die visuelle Aufmerksamkeit wird als Mechanismus verstanden, mit dessen Hilfe die zum Lösen einer Aufgabe relevanten Informationen selektiert und irrelevanten ignoriert werden können.

Die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses

Eine Gemeinsamkeit aller bestehenden Theorien ist die beschränkte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, unter welcher die eingeschränkte Fähigkeit sich Informationen kurzfristig zu merken verstanden wird. Die Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses ist im Gegensatz zum Langzeitgedächtnis zeitlich auf wenige Sekunden bis Minuten beschränkt und kann nur eine kleine Menge an Information erhalten. Die

genaue Anzahl gleichzeitig zu bearbeitender Informationseinheiten ist umstritten. Nach Cowan ist das Arbeitsgedächtnis in seiner Kapazität auf maximal vier gleichzeitig zu verarbeitende Objekte beschränkt (Cowan 1988). Laut Miller können etwa sieben unterschiedliche Informationseinheiten, beispielsweise Ziffern, Buchstaben oder Wörter kurzzeitig behalten werden, wobei die Spanne des Kurzzeitgedächtnisses unabhängig vom Informationsgehalt der Einzelelemente ist. Die Menge an Informationen die gespeichert werden können, ist davon abhängig, ob diese sinnvoll gruppiert werden können. Werden die Einzelelemente zu größeren Einheiten, sogenannten *Chunks*, zusammengefasst, so lässt sich die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses steigern (Miller 1956). Kann aus sieben einzelnen Buchstaben beispielsweise ein Wort gebildet werden, wird dieses als ein einziger Chunk gespeichert und die Kapazität somit weniger ausgelastet. Luck und Vogel (1997) vertreten die Ansicht, dass im visuellen Arbeitsgedächtnis nicht einzelne visuelle Merkmale (*features*) gespeichert werden, sondern integrierte Objekte. Sie führten in ihren *Change Detection*-Versuchen zunächst eine einfache Suche nach einem andersfarbigen Objekt und anschließend eine kombinierte (konjugierte) Suche nach Balken, die sich in Farbe und Orientierung unterschieden, durch. Dabei zeigten sie, unabhängig von der Anzahl der einfachen oder konjugierten Merkmale, eine konstante Kapazität des Arbeitsgedächtnisses von insgesamt vier Objekten. Die Kapazität blieb gleich, unabhängig davon, ob die Objekte nur ein Merkmal (z.B. Farbe) oder mehrere Merkmale (z.B. Farbe, Form, Orientierung, etc.) aufwiesen. Das Zusammenfassen der Merkmale zu Objekten erhöht nach Luck und Vogel (1997) somit die Menge der Information, die im Arbeitsgedächtnis behalten werden kann, ähnlich dem *Chunking* bei Miller (1956). Nach Baddeley und Hitch's Mehrkomponentenmodell und den prozessorientierten Theorien von Lucke und Vogel sowie Cowan und Miller wird ein Objekt entweder mit sehr hoher Präzision gespeichert oder gar nicht. Neuere Studien zeigten jedoch, dass die Präzision der Erinnerung abnimmt, wenn die Anzahl an Objekten erhöht wird. Daraus wurde eine weitere Theorie entwickelt, die des Ressourcenmodells (Bays und Husain, 2008). In diesem Modelltyp stellt das Arbeitsgedächtnis eine limitierte Ressource dar, die gleichmäßig auf alle Objekte verteilt wird. Die Limitierung der Kapazität erfolgt hierbei nicht durch eine feste Anzahl K an Objekten, die gemerkt werden können, sondern durch die Qualität oder Präzision der Erinnerung. Die internen Repräsentationen werden durch ein zufallsabhängiges Rauschen gestört, das sich mit höher werdender Anzahl an Objekten im Arbeitsgedächtnis ver-

stärkt. Je mehr Platz einem Objekt zur Verfügung steht, desto weniger wird es durch Rauschen gestört und desto präziser kann sich der Mensch daran erinnern. Priorisierte Objekte werden im Vergleich zu anderen Objekten mit erhöhter Präzision gespeichert, wodurch der verfügbare Platz für die anderen Objekte abnimmt (Ma et al. 2014).

Bei der Untersuchung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses werden regelmäßig große individuelle Unterschiede festgestellt. Da diese Unterschiede stabil sind, kann die Kapazität als kognitive Kerneigenschaft des Individuums verstanden werden. Diese individuellen Unterschiede sind nicht von der genauen Anzahl an Objekten, die behalten werden können abhängig. Sie ist auf die unterschiedliche Aufmerksamkeitssteuerung für das, was im Arbeitsgedächtnis gespeichert ist, zurückzuführen (Eriksson et al. 2015). Somit können Individuen mit niedrigerer Kapazität störende Details schlechter ignorieren.

Die Merkmalsintegrationstheorie nach Anne Treisman

Um ein Objekt im Arbeitsgedächtnis speichern zu können, müssen seine einzelnen Merkmale zunächst ins Arbeitsgedächtnis integriert und anschließend dort miteinander verknüpft werden. Für die Integration und Verknüpfung ins Arbeitsgedächtnis sind das visuelle System des Menschen und aufmerksamkeitsbezogene Prozesse verantwortlich. Die Aufnahme und Verarbeitung von sensorischen Informationen, beziehungsweise von Reizen durch die Sinnesorgane, wird als Perzeption bezeichnet. Bei der visuellen Wahrnehmung werden optische Reize wahrgenommen und verarbeitet. Das bekannteste Modell, das die einzelnen Schritte der visuellen Objektwahrnehmung erklärt, ist die Merkmalsintegrationstheorie von Anne Treisman (Treisman und Gelade 1980). Nach der Merkmalsintegrationstheorie lässt sich jeder Stimulus als Kombination basaler Merkmale, z.B. Farbe, Form oder Orientierung beschreiben. Die Objektwahrnehmung erfolgt in zwei Schritten. Der erste Schritt beinhaltet die preattentive Verarbeitung, im zweiten Schritt findet die attentive Verarbeitung statt. Zunächst werden während der preattentiven Verarbeitung alle Objektmerkmale einzeln getrennt und ohne Aufmerksamkeit verarbeitet und in sogenannten Merkmalskarten kodiert (Abbildung 2). Es werden hierbei alle im visuellen Feld vorhandenen Objektmerkmale wahrgenommen. Ähnliche Merkmale (z.B. rot und blau) des noch nicht erkannten Objektes bilden Merkmalsdimensionen (z.B. Farbe), die unabhängig voneinander von Merkmalsdetektoren kodiert werden (Müsseler und Rieger 2017).

Merkmalsdetektoren sind Neuronen im Gehirn, die auf bestimmte Merkmale von Reizen reagieren. Diese sind topografisch in den Merkmalskarten organisiert (Hommel 2004). Für jedes Objektmerkmal existiert eine Merkmalskarte, wobei ein bestimmter Ort auf der Merkmalskarte einem Ort auf der Retina entspricht, der auf in diesen Bereich fallende Reize anspricht. Die Anwesenheit eines einzelnen Merkmals wird durch Aktivierung seiner Merkmalskarte signalisiert. Während der attentiven Verarbeitung findet eine Weiterverarbeitung über alle Merkmalsdimensionen statt, wobei beispielsweise spezielle Farbgruppen und spezielle Formgruppen kombiniert werden, um Aufschluss über die farbige Form des Perzepts zu geben (Müsseler und Rieger 2017). Um die verschiedenen Orte auf den verschiedenen Merkmalskarten einander zuordnen zu können, wird die visuelle Aufmerksamkeit benötigt, welche mit Hilfe einer zusätzlichen Aufmerksamkeitskarte gesteuert wird. Die Aufmerksamkeit wird hierbei auf eine bestimmte Position auf der Aufmerksamkeitskarte gerichtet, was zur Bildung einer Objektrepräsentation führt (Abbildung 2). Die visuelle Aufmerksamkeit verarbeitet neben externen visuellen Informationen ebenso interne Repräsentationen aus dem Langzeitgedächtnis und bildet somit einen Grundstein für Arbeitsgedächtnisprozesse (Eriksson et al. 2015).

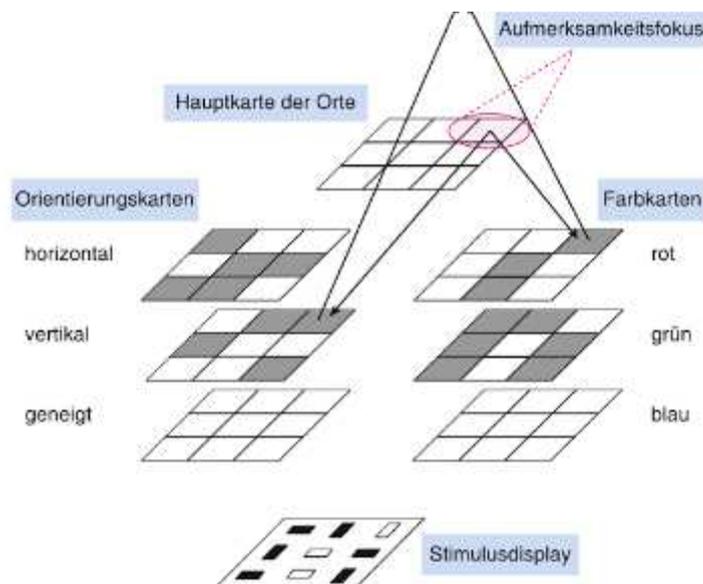


Abbildung 2: Merkmalsintegrationstheorie nach Treisman und Gelade (1980). Die Merkmale sind in Merkmalskarten (Orientierungskarten und Farbkarten) gespeichert. Die gezielte Aufmerksamkeit wird auf eine bestimmte Position auf der Aufmerksamkeitskarte (Hauptkarte) gerichtet, was zur Bildung einer Objektrepräsentation führt (vgl. auch Müsseler und Rieger 2017).

Die Merkmalsuche

Die Merkmalsintegrationstheorie ist für die Erklärung der Befunde einiger Experimente von Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist die Merkmalsuche (*feature search*). Bei der Merkmalsuche handelt es sich um eine visuelle Suche, die auf das Identifizieren eines Zielobjekts (*target*) zwischen einer variablen Anzahl an Distraktoren abzielt, die sich in Farbe, Form, Orientierung oder Größe vom Zielobjekt unterscheiden. Das Zielobjekt ist entweder anwesend oder abwesend und die Aufgabe des Probanden liegt darin, möglichst schnell eine positive oder negative Antwort zu geben (Müsseler und Rieger 2017). Es kann zwischen einer parallelen und einer seriellen visuellen Suche unterschieden werden. Bei der parallelen Suche unterscheidet sich das Zielobjekt nur durch ein Merkmal von den Distraktoren (Abbildung 3a). Während der Suche nach dem Zielobjekt „springt“ dieses ins Auge, was auch als *pop-out*-Effekt bezeichnet wird. Bestimmte Merkmale, wie Farbe, Orientierung, Größe und Distanz werden in der preattentiven Phase automatisch und parallel detektiert. Es muss keine weitere Verarbeitungsleistung erbracht werden, um das Zielobjekt zu finden. Die Schwierigkeit der Merkmalsuche kann durch die Anzahl der Distraktoren minimal verändert werden (Treisman und Gelade 1980). Entgegen der parallelen Suche besteht die serielle Suche aus einer Kombination, beziehungsweise Konjunktion, von mehreren Merkmalen, die sich das Zielobjekt mit den Distraktoren teilt (Abbildung 3b). Hierbei wird die zielgerichtete Aufmerksamkeit benötigt, mit deren Hilfe die zur Lösung der Aufgabe relevante Information von der irrelevanten Information unterschieden werden kann. Diese zielgerichtete Aufmerksamkeit muss nacheinander auf jedes einzelne Objekt im Suchraum gerichtet werden, um ein möglicherweise präsentiertes Zielobjekt charakterisieren und erkennen zu können, wenn dafür mehr als ein Merkmal benötigt wird. Erst mit Hilfe der gerichteten Aufmerksamkeit können die verschiedenen Merkmale an einem bestimmten Ort richtig zusammengesetzt und das Zielobjekt durch serielles Absuchen der Objekte gefunden werden (Treisman und Gelade 1980). Während der seriellen Suche werden demnach zunächst Merkmale erkannt. Nachdem die Merkmale erkannt wurden, kommt es zur Objekterkennung. Mit Hilfe der gerichteten Aufmerksamkeit werden dabei die in ihrem Fokus erkannten Merkmale kombiniert und zu einem Objekt zusammengesetzt. Das Objekt wird in einer Ereignisdatei gespeichert und kann mittels eines *top-down* Prozesses mit be-

reits bekannten und gespeicherten Darstellungen verglichen werden, wodurch das Zielobjekt unter den Distraktoren identifiziert werden kann.



Abbildung 3: Die zwei Prinzipien der visuellen Suche. **a** parallele Suche. Das Zielobjekt unterscheidet sich in nur einem Merkmal von den Distraktoren und wird durch einen *pop-out*-Effekt sofort sichtbar. **b** serielle Suche. Zwei Merkmale (hier Farbe und Form) werden konjugiert. Das Zielobjekt ist unter den Distraktoren nur durch serielles Absuchen jedes einzelnen Objektes mit Hilfe zielgerichteter Aufmerksamkeit zu entdecken (Botly und De Rosa 2012).

Um das bekannte Zielobjekt identifizieren zu können, müssen dafür relevante Gedächtnisstrukturen Informationen über das Zielobjekt und die aktuelle Situation besitzen. Da sich der Mensch hierfür nur ein bestimmtes Objekt, das Zielobjekt, einprägen muss, um es später wieder zu erkennen, wird der Beitrag des Arbeitsgedächtnisses bei der visuellen Suche eher als vernachlässigbar betrachtet (Pomplun et al. 2001).

Die vergleichende visuelle Suche

Ein weiterführendes Versuchsdesign unter Verwendung des Arbeitsgedächtnisses bietet die vergleichende visuelle Suche (*comparative visual search*). Hierbei muss der Proband Unterschiede zwischen zwei Bildschirm- oder Stimulushälften detektieren, wobei zusätzlich verschieden große Augenbewegungen mit einbezogen werden, die eine zeitliche Verzögerung beim Vergleich der beiden Bildschirmhälften darstellen. In der vergleichenden visuellen Suche werden zwei Bildschirmhälften miteinander verglichen und auf Unterschiede untersucht. Da die Anzahl der Objekte auf jeder Seite groß und das visuelle Arbeitsgedächtnis limitiert ist, muss die vergleichende Suche in mehreren Schritten ablaufen. Um die beiden Seiten vergleichen zu können wird zunächst eine Bildschirmhälfte betrachtet. Hier werden die Objekte erkannt, codiert und so viel Information wie möglich ins Arbeitsgedächtnis geladen. Anschließend wird eine Augenbewegung auf die gegenüberliegende Seite durchgeführt, während der die sensorischen Stimuli innerlich weiter repräsentiert werden. Nach der Augenbewegung auf die gegenüberliegende Seite wird die Erinnerung des ersten Bildschirms mit der zweiten Bildschirmhälfte verglichen, um mögliche Veränderungen zu entdecken. Danach erfolgt eine Augenbewegung zurück auf die erste Seite. Die visuelle Verarbeitung der Großbildszenen wird demnach durch die Interaktion der Augenbewegungen und der Erinnerung von lokalen, visuellen Stimuli im visuellen Arbeitsgedächtnis ausgeführt. (Hardiess et al. 2008). Es können entweder mehr Augenbewegungen durchgeführt werden, die beispielsweise mit den Kosten für Dauer und Energieverbrauch verbunden sind, oder der Mensch kann sich mehrere Objekte gleichzeitig merken, was jedoch durch die Menge der im Arbeitsgedächtnis gespeicherten Information ebenfalls Kosten verursacht. Um die Aufgabe möglichst effektiv zu lösen, müssen Strategien verwendet werden, die die Kosten reduzieren. Dazu wird die Speicherauslastung des Gedächtnisses gegen die Sakkaden abgewogen (Hardiess und Mallot 2015). Um diese Kosten zu bewerten, ist die vergleichende visuelle Suche ein geeignetes Versuchsdesign. Sie soll die Analyse von kognitiven Prozessen um Prinzipien kognitiver Ökonomie erweitern (Pomplun et al. 2001).

Forschung zur Entscheidungsfindung

Mit der effizienten Verhaltensausswahl oder dem adäquaten Treffen von Entscheidungen beschäftigten sich Hardiess und Mallot im Jahr 2015 in ihren Experimenten (Hardiess und Mallot 2015). Sie untersuchten und manipulierten die für die vergleichende visuelle Suche notwendigen Strategien der Informationsakquisition (durch Augenbewegungen) und der Memorierung (durch das Arbeitsgedächtnis). Während der vergleichenden visuellen Suche war jeweils nur eine Bildschirmhälfte mit den Stimuli sichtbar, die andere wurde abgedeckt. Mit Hilfe eines Mausklicks konnte die Sichtbarkeit zwischen den Seiten gewechselt werden, um die Unterschiede zwischen den Bildschirmhälften zu finden. Es wurden für den Versuch einfache, farbige Kreise und kompliziertere, silhouettenhafte Objekte verwendet. Die Strategie der Informationsakquisition wurde durch einen unterschiedlich verzögerten Wechsel der Sichtbarkeit zwischen den beiden Bildschirmseiten manipuliert und durch die Anzahl an Augenbewegungen (Anzahl an Mausklicks) quantifiziert. Die zweite Strategie, die der Memorierung der Information im Arbeitsgedächtnis, wurde durch die Komplexität der Objekte manipuliert und durch die Verarbeitungszeit (Dauer zwischen Mausklicks) quantifiziert.

Das Hauptziel des Versuchs war es, die individuellen Entscheidungsstrategien mit den allgemeinen Strategien der Gemeinschaft zu vergleichen. Die Versuchspersonen zeigten gleichermaßen präferiert die Akquisition von Informationen durch die Augenbewegung und die Memorierung der Information durch das Arbeitsgedächtnis. Die Variabilität der Strategie innerhalb einer Person war sehr gering und stabil. Im Gegensatz hierzu war eine starke Variabilität zwischen den Personen sichtbar (Hardiess und Mallot 2015). Die Wahl der Strategie erfolgte vollkommen unterbewusst und die Personen schienen die Kosten unterschiedlich zu gewichten. Da die Augenbewegung zwischen den Personen relativ gleich und stabil ist (Becker 1989), beruht der Unterschied zwischen den Personen vermutlich auf den Unterschieden in der Möglichkeit, ihr kognitives Wissen einzusetzen. Auf welche Faktoren die Probanden zurückgriffen, um zu entscheiden, welche Strategie sie verfolgten, blieb jedoch unklar. Um in der Entscheidungsfindung einen größtmöglichen Unterschied zu erzielen, verwendeten Hardiess und Mallot zwei sehr unterschiedliche Stimulusqualitäten. Anhand ihrer Ergebnisse zeigten sie einen Effekt der Komplexität der Objekte auf das Abwägen von Kosten und Nutzen. Die komplexen Objekte benötigten eine höhere

Verarbeitungszeit und mehr Augenbewegungen, als die farbigen Kreise (Hardiess und Mallot 2015). Da Hardiess und Mallot einen Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Objekten feststellen konnten und die vergleichende visuelle Suche in drei Schritten (Wahrnehmung/Enkodierung, Memorierung und Vergleich) abläuft, sollte in einem weiterführenden Experiment untersucht werden, auf Höhe welcher Verarbeitungsstufe dieser Unterschied beruht.

Um dies herauszufinden, wurde nach dem Versuchsdesign von Hardiess und Mallot eine vergleichende visuelle Suche mit zwei, aus der Merkmalsuche bekannten Stimulusqualitäten, durchgeführt. Verwendet wurden schwarze Balken als einfache und schwarze Balken, die zusätzlich eine Lücke aufwiesen, als konjugierte Stimuli. Der Vorteil der gewählten Stimuli lag in der besseren Interpretationsmöglichkeit der Ergebnisse, da der Grad der Verarbeitung dieser Stimuli durch die Merkmalsintegrationstheorie charakterisiert wird. Gemessen wurden in diesem Versuch ebenfalls die Verarbeitungszeit und die Anzahl an Augenbewegungen. Die Verarbeitungszeit (Zeit zwischen zwei Mausklicks) war die Zeit, die die Versuchsperson benötigte, um n Objekte zu enkodieren und diese mit den gegenüberliegenden Stimuli zu vergleichen. Somit repräsentierte die Verarbeitungszeit neben der Strategie der Memorierung den ersten (die Wahrnehmung/Enkodierung) und dritten (den Vergleich) während der vergleichenden visuellen Suche ablaufenden Schritt und (Abbildung 4). Die Anzahl an Augenbewegungen (Anzahl an Mausklicks) war neben dem Maß für die Akquisitionstrategie ebenfalls ein Maß für die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses und quantifiziert den zweiten Schritt (Abbildung 4).

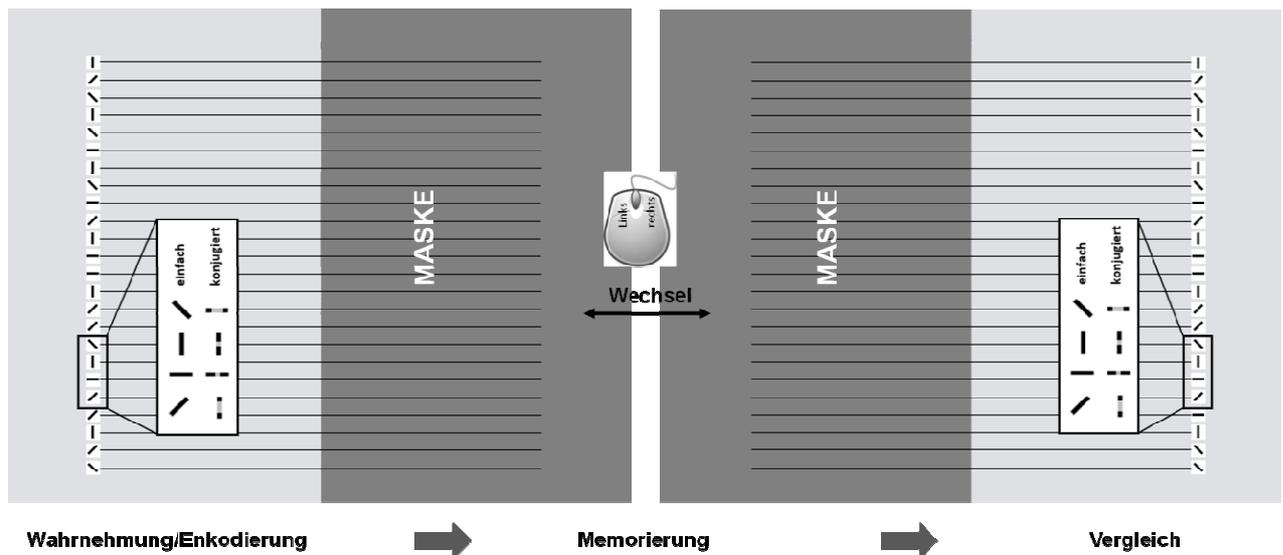


Abbildung 4: Versuchsdesign der vergleichenden visuellen Suche mit einfachen und konjugierten Stimuli. Im ersten Schritt erfolgt die Wahrnehmung/Enkodierung der Objekte. Die für die Wahrnehmung benötigte Zeit wird durch die Verarbeitungszeit gemessen. Während der Augenbewegung auf die andere Seite wird die Information im Arbeitsgedächtnis gespeichert, was dem zweiten Schritt, der Memorierung entspricht. Diese wird anhand der zur Lösung der Aufgabe benötigten Anzahl an Augenbewegungen bestimmt. Im dritten Schritt werden auf der gegenüberliegenden Seite die Objekte mit gespeicherten Objektrepräsentationen verglichen. Die hierfür benötigte Zeit wird ebenfalls durch die Verarbeitungszeit ermittelt.

Des Weiteren sollte mit diesem Versuch herausgefunden werden, warum die Versuchspersonen auf unterschiedliche Strategien zum Lösen der Aufgabe zurückgriffen. Da eine geringere Kapazität des Arbeitsgedächtnisses höhere Speicherkosten verursacht und sich Personen mit einer niedrigeren Gesamtkapazität weniger Objekte gleichzeitig merken können, kann eine unterschiedliche Kapazität der Versuchspersonen eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Strategiewahl sein. Zusätzlich können Personen mit einer niedrigeren Kapazität schlechter steuern, was gespeichert werden soll, wodurch weitere Kosten entstehen (Eriksson et al. 2015, Vogel 2005). Um mögliche Zusammenhänge zwischen der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses der Versuchspersonen und der adäquaten Entscheidungsfindung zu erkennen, wurde in einem zweiten Versuchsteil, einem *Change Detection*-Versuch nach Luck und Vogel (1997), die Gesamtkapazität der Versuchspersonen bestimmt und mit ihrer individuellen Strategiewahl verglichen.

3. Material und Methoden

Versuchspersonen

Es wurden insgesamt 14 Versuchspersonen getestet. Darunter befanden sich sieben Frauen und sieben Männer im Alter zwischen 20 und 30 Jahren mit normalem oder korrigiertem Visus. Diese waren zu Beginn des Versuchs naiv und führten zwei Versuche nacheinander durch. Nach der vergleichenden visuellen Suche folgte der *Change Detection*-Versuch. Die Versuchsdauer betrug in etwa eine Stunde und variierte je nach der Geschwindigkeit der Versuchspersonen.

Versuchsteil 1: Die vergleichende visuelle Suche

Versuchsaufbau und Stimuli

Für die vergleichende visuelle Suche wurden zwei Computer verwendet. Auf einem Computer (3,1GHz) erfolgte mit Hilfe von MATLAB (MathWorksLtd.) die Stimuluspräsentation und die Kontrolle des Versuchsablaufs. Mit einem zweiten Computer wurden die von den Versuchspersonen gefundenen Unterschiede notiert. Das Experiment wurde durch die Psychophysics Toolbox (PTB-3) gesteuert. Die Stimuluspräsentation erfolgte auf einem Samsung SyncMaster 931BF Bildschirm (19'', 1280x1024 Pixel, 60 Hz) mit eingebauerter IntelHD Graphics 2000 Grafikkarte. Die Entfernung zwischen Bildschirm und Versuchsperson betrug immer etwa 60 cm. Durchgeführt wurde der Versuch in einem belüfteten Raum ohne Tageslicht, bei gedimmter Beleuchtung.

Den Versuchspersonen wurden insgesamt 36 Versuchsdurchläufe (zwei Stimuli-Bedingungen x drei Verzögerungs-Bedingungen x sechs Wiederholungen = 36 Versuchsdurchläufe) in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Jeder Versuchsdurchlauf bestand hierbei aus zwei Spalten mit jeweils 24 Stimuli, angeordnet in zufälliger Reihenfolge auf der rechten und der linken Bildschirmseite. Die verwendeten Stimuli (30x30 Pixel) unterschieden sich in ihrer Komplexität, um die Verarbeitungszeit zu manipulieren. Die einfachen Stimuli waren schwarze Balken und unterschieden sich in nur einem Merkmal, der Orientierung. Durch Drehen um 45 Grad ergaben sich vier verschiedene Orientierungen (Abbildung 5a). Die konjugierten Stimuli waren ebenfalls schwarze Balken in zwei unterschiedlichen Orientierungen (horizontal und vertikal), die zusätzlich eine große oder kleine Lücke aufwiesen (Abbildung 5b). Die konjugierten Stimuli unterschieden sich demnach in zwei Merkmalen.

a		horizontal	vertikal
0° gedreht			
45° nach rechts gedreht			

b		horizontal	vertikal
kleine Lücke			
große Lücke			

Abbildung 5: Verwendete Stimuli der vergleichenden visuellen Suche. **a** einfache Stimuli: schwarze Balken in vier verschiedenen Orientierungen. **b** konjugierte Stimuli: schwarze Balken in zwei verschiedenen Orientierungen (horizontal und vertikal) mit großer oder kleiner Lücke.

Um den Blick der Versuchspersonen zu leiten, waren die Stimuli auf den beiden Bildschirmseiten mit schwarzen, horizontal verlaufenden Linien verbunden (Abbildung 6). In der Vergleichsaufgabe unterschieden sich die zwei zu vergleichenden Spalten in ein oder zwei Stimuli an randomisierter Stelle. Zwei Unterschiede verhinderten ein frühzeitiges Beenden des Versuchsdurchlaufs nach dem Finden des ersten Unterschieds.

Um die Verzögerung als Manipulation der Dauer des Vergleichs zwischen den beiden Spalten einzubauen, wurde immer eine der beiden Spalten mit einer grauen Maske verdeckt. Zu Beginn des Versuchsdurchlaufs befand sich diese stets auf der rechten Seite, wodurch die linke Seite zuerst betrachtet wurde. Die Maske ließ sich durch Drücken der Maustasten auf die jeweils gegenüberliegende Seite verschieben. Durch Drücken der rechten Maustaste wurde die rechte Spalte sichtbar, durch Drücken der linken Maustaste die linke Spalte. Um die Kosten für den Informationserwerb zu manipulieren, wurden für den Maskenwechsel drei Verzögerungsstufen verwendet. Die Maske wechselte nach Drücken der Maustaste entweder ohne Verzögerung (0 Sekunden), nach 0,75 Sekunden oder nach 1,5 Sekunden. Während des Maskenwechsels wurden beide Spalten verdeckt, die schwarzen Verbindungslinien zwischen den beiden Spalten blieben jedoch sichtbar (Abbildung 6).

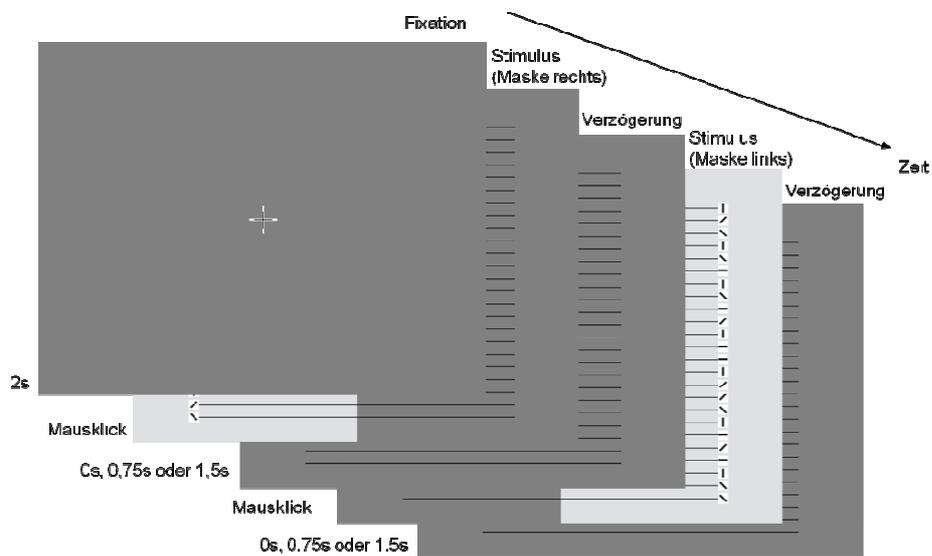
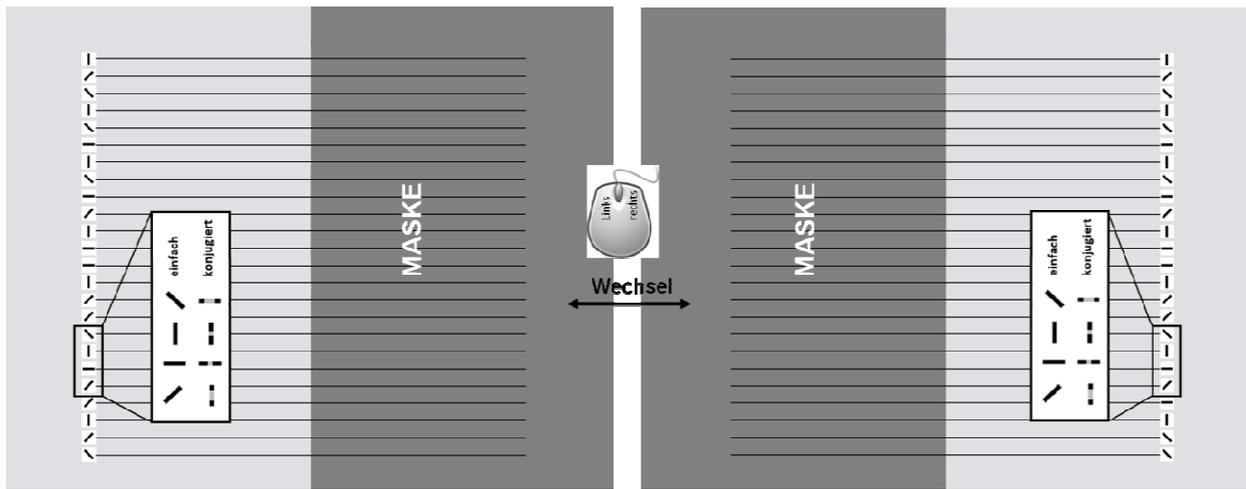


Abbildung 6: Versuchsaufbau der vergleichenden visuellen Suche. **oben** allgemeiner Aufbau: die beiden Spalten bestanden aus jeweils 24 Stimuli. Eine Spalte wurde durch eine graue Maske verdeckt, die mit Hilfe der Maustasten auf die jeweils gegenüberliegende Seite verschoben werden konnte. **unten** allgemeiner Ablauf: nach einer zwei Sekunden langen Fixationsphase startete der Versuchsdurchlauf. Hierbei war zu Beginn immer die linke Spalte sichtbar und die rechte Spalte durch die Maske verdeckt. Nach Drücken der rechten Maustaste wurde nach einer Verzögerungszeit (0 s, 0,75 s oder 1,5 s), während der die Maske beide Spalten verdeckte, die rechte Seite sichtbar.

Prozedur

Bevor das Experiment startete, lasen die Versuchspersonen eine schriftliche Versuchsanleitung und absolvierten vier Übungsdurchläufe. Diese beinhalteten alle Bedingungen (ein oder zwei Unterschiede, einfache und konjugierte Objekte und alle drei Verzögerungsstufen) und sollten die Versuchspersonen mit dem Versuchsablauf vertraut machen. Direkt im Anschluss daran startete das Experiment.

Die Versuchspersonen erhielten die Anweisung die beiden Spalten so zügig und so genau wie möglich zu vergleichen, um die Anzahl an Unterschieden (ein bzw. zwei) zu finden. Die Maske konnte hierzu beliebig oft verschoben werden. Zum Beenden jedes Versuchsdurchlaufs wurde die Leertaste gedrückt und dem Versuchsleiter mündlich die Anzahl gefundener Unterschiede mitgeteilt. Der folgende Versuchsdurchlauf startete automatisch nach drei Sekunden. Während den drei Sekunden wurde von den Versuchspersonen ein Fixationskreuz auf grau gefärbtem Hintergrund in der Mitte des Bildschirms fixiert. Nach 18 Versuchsdurchläufen erfolgte, falls von den Versuchspersonen benötigt, eine fünfminütige Pause.

Abhängige Variablen

Um die Leistung der Versuchspersonen zu bewerten, wurde die Anzahl an Fehlern notiert und eine Fehlerrate bestimmt. Als Fehler wurde eine falsch genannte Anzahl an gefundenen Unterschieden definiert. Die beiden wichtigen Variablen zur Quantifizierung der Wahl der Strategie waren die Anzahl an Augenbewegungen zwischen den Spalten und die Zeit zwischen den Augenbewegungen. Die Anzahl an Augenbewegungen wurde anhand der Anzahl an benötigten Mausklicks gemessen und quantifizierte somit die Strategie der Informationsakquisition. Die Strategie der Informationsakquisition wurde mit Hilfe der drei durch den Maskenwechsel verursachten Verzögerungen manipuliert. Die Zeit zwischen den Augenbewegungen wurde durch die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Mausklicks (abzüglich der jeweiligen Verzögerungszeit der Maske) bestimmt und quantifizierte die Verarbeitungszeit. Diese Zeit benötigten die Versuchspersonen, um die Stimuli zu enkodieren und zu vergleichen. Die Verarbeitungszeit repräsentiert die Strategie der Memorierung und wurde durch die beiden Stimulusarten mit deren verschiedenen Anzahlen an Merkmalen manipuliert.

Statistische Analyse

Alle berichteten ANOVAs wurden als Messwiederholungsdesign berechnet. Es wurde für alle ANOVAs ein Mauchly-Test auf Sphärizität durchgeführt. Bei verletzter Varianzhomogenität wurde für alle ANOVAs eine Greenhouse-Geisser Korrektur angewandt. Die Effektgröße für alle parametrischen Tests wird über das partielle Eta-Quadrat (η_p^2) angegeben. Alle post-hoc Analysen wurden mit Bonferroni korrigierten α -Werten durchgeführt. Die post-hoc Signifikanzen nach Bonferroni sind, wenn vorhanden, in Form von Sternen in die Abbildungen eingezeichnet (kein Stern: nicht signifikant, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$). Alle eingezeichneten Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts.

Versuchsteil 2: *Change Detection*-Versuch

Versuchsaufbau und Stimuli

Der *Change Detection*-Versuch wurde unter den gleichen Versuchsbedingungen und mit Hilfe der gleichen Programme durchgeführt, wie die vergleichende visuelle Suche (siehe Versuchsaufbau vergleichende visuelle Suche). Als Stimuli wurden ebenfalls dieselben einfachen und konjugierten Stimuli verwendet (Abbildung 5). Der Präsentationsbereich der Stimuli betrug 268x268 Pixel. Innerhalb dieses Bereiches gab es jeweils zehn mögliche Positionen rechts und links vom Fixationskreuz, an denen die Stimuli randomisiert präsentiert wurden. Der Abstand zwischen zwei Stimuli betrug mindestens 2° , beziehungsweise 70 Pixel. Ein Versuchsdurchlauf startete immer mit einer 1-sekündigen Fixationsphase, in der ein Fixationskreuz (86x86 Pixel) in der Mitte des Bildschirms fixiert wurde, und bestand aus zwei aufeinanderfolgenden Bildern (Abbildung 7). Die Stimulusbilder bestanden aus zwei, vier oder sechs Stimuli und unterschieden sich entweder in einem oder keinem Stimulus an der gleichen Stelle. Das erste Bild wurde eine halbe Sekunde lang präsentiert. Nach einer Verzögerungszeit von einer Sekunde, während der ein grauer Hintergrund (268x268 Pixel) zu sehen war, wurde das Vergleichsbild für zwei Sekunden präsentiert (Abbildung 7). Insgesamt absolvierten die Versuchspersonen jeweils 240 Versuchsdurchläufe (zwei Stimulus-Bedingungen \times drei mögliche Stimulus-Anzahlen \times zwei Möglichkeiten (identisch oder verschieden) \times 20 Wiederholungen = 240 Versuchsdurchläufe).

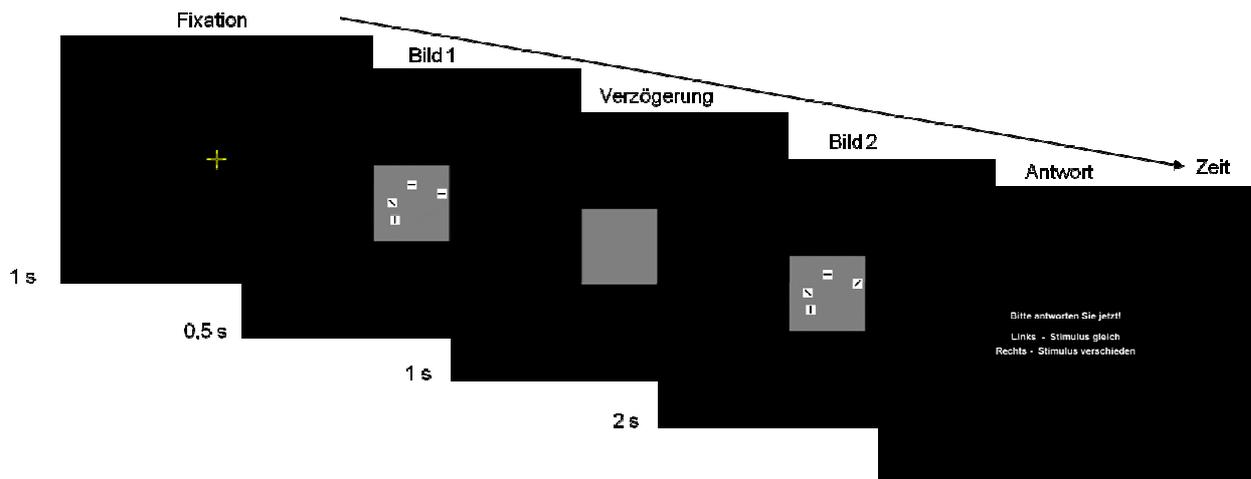


Abbildung 7: Versuchsablauf des *Change Detection*-Versuchs. Nach einer Fixationsphase von einer Sekunde wurde das erste Bild mit zwei, vier oder sechs Stimuli für eine halbe Sekunde präsentiert. Nach einer Verzögerungszeit von einer Sekunde wurde das zweite Bild, das Vergleichsbild, zwei Sekunden lang präsentiert. Im Anschluss wurden die Versuchspersonen aufgefordert zu entscheiden, ob die Bilder gleich (linke Maustaste) oder verschieden (rechte Maustaste) waren.

Prozedur

Vor dem Start des Experiments lasen die Versuchspersonen eine schriftliche Versuchsanleitung. Sie bekamen die Anweisung anhand von zwei aufeinanderfolgenden Bildern zu sagen, ob sich diese unterscheiden oder nicht. Am Ende eines jeden der 240 Versuchsdurchläufe wurden sie gefragt, ob die Bilder gleich oder verschieden waren und mussten mit Hilfe der Maustasten antworten. Die linke Maustaste wurde gedrückt, wenn die Bilder gleich waren, die rechte Maustaste, wenn es einen Unterschied zwischen den Bildern gab. Der nächste Versuchsdurchlauf startete nach der Entscheidung automatisch mit einer Fixationsphase.

Abhängige Variablen

Über alle Durchläufe wurden aus den Antworten der Versuchspersonen die Trefferrate (*hit rate*) und die Fehlalarmrate (*false alarm rate*) ermittelt und daraus für alle Bedingungen (zwei, vier oder sechs Stimuli) die Kapazität K des Arbeitsgedächtnisses nach der Formel $K = N * \frac{\text{Trefferrate} - \text{Fehlalarmrate}}{1 - \text{Fehlalarmrate}}$ bestimmt (Rouder et al. 2011).

Für die Auswertung erfolgte eine Normierung der Kapazität über die einzelnen Bedingungen durch eine Prozent-Berechnung.

Statistische Analyse

Alle berichteten ANOVAs wurden als Messwiederholungsdesign berechnet. Es wurde für alle ANOVAs ein Mauchly-Test auf Sphärizität durchgeführt. Bei verletzter Varianzhomogenität wurde für alle ANOVA eine Greenhouse-Geisser Korrektur angewandt. Die Effektgröße für alle parametrischen Tests wird über das partielle Eta-Quadrat (η_p^2) angegeben. Alle post-hoc Analysen wurden mit Bonferroni korrigierten α -Werten durchgeführt. Die post-hoc Signifikanzen nach Bonferroni sind, wenn vorhanden, in Form von Sternen in die Abbildungen eingezeichnet (kein Stern: nicht signifikant, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$). Als nicht-parametrischer Test wurde ein Friedman-Test durchgeführt. Alle eingezeichneten Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts.

4. Ergebnisse

Versuchsteil 1: Vergleichende visuelle Suche

Leistung der Versuchspersonen

Die Fehlerrate wurde anhand der von den Versuchspersonen falsch gegebenen Antworten bestimmt. Die Anzahl der Fehler (ein oder zwei) wurde hierbei nicht berücksichtigt. In den Versuchsdurchläufen mit einfachen Objekten zeigten die Versuchspersonen ohne Verzögerung und mit einer Verzögerung von 0,75 s mit $3,33 \pm 6,9 \%$ die geringsten Fehlerraten. Die Fehlerrate der Versuchspersonen lag in den Versuchsdurchläufen mit konjugierten Objekten und ohne Verzögerung ebenfalls bei $3,33 \pm 6,9 \%$. Bei einer Verzögerung von 0,75 s stieg diese um 9 %, bei einer Verzögerung von 1,5 s um 7 %. Die Versuchspersonen zeigten während des Versuchs über alle Bedingungen eine maximale Fehlerrate von $12,22 \pm 13,31\%$ (Abbildung 8). Es wurde kein signifikanter Einfluss der Verzögerung auf die Fehlerrate in den Versuchsdurchläufen mit einfachen Stimuli (Friedman-ANOVA: $\text{Chi}^2(2) = 1,00$, $p = 0,607$) und den Versuchsdurchläufen mit konjugierten Stimuli (Friedman-ANOVA: $\text{Chi}^2(2) = 3,19$ $p = 0,203$) gefunden.

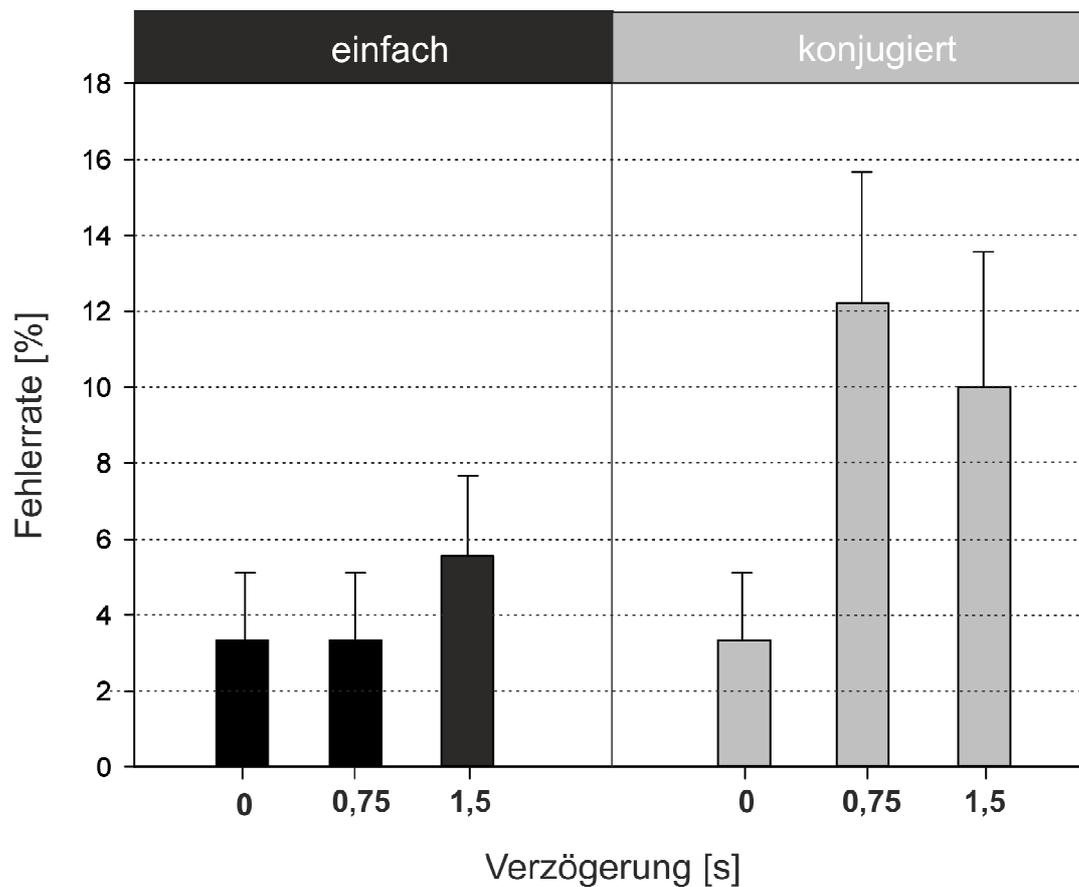


Abbildung 8: Leistung der Versuchspersonen. Die Fehlerrate wurde über alle Versuchspersonen gemittelt und für die einzelnen Bedingungen dargestellt (schwarz: einfache Stimuli und Verzögerung, grau: konjugierte Stimuli und Verzögerung).

Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Stimuli

Um die Akquisitionsstrategie zu quantifizieren, wurde die Anzahl an Augenbewegungen zwischen den Spalten gemessen. Als Maß für die Memorierungsstrategie wurde die Verarbeitungszeit bestimmt. Alle Messungen wurden für alle Bedingungen durchgeführt und in Abbildung 9 dargestellt. Unabhängig von der Art des Stimulus sank die Anzahl an Augenbewegungen mit zunehmender Verzögerungszeit. Die Verarbeitungszeit stieg hingegen mit zunehmender Verzögerungszeit. In einer zwei-Faktor-ANOVA wurde ein signifikanter Einfluss der Verzögerung auf die Anzahl an Augenbewegungen ($F(2,26) = 4,67, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,264$) und auf die Verarbeitungszeit ($F(2,26) = 5,11, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,282$) festgestellt.

Die mittlere Anzahl an Augenbewegungen lag in allen Versuchsdurchläufen, unabhängig von der Art des Stimulus und der Verzögerungen in einem Bereich zwischen 12 und 17. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Art des Stimulus auf die Anzahl an Augenbewegungen ($F(1,13) = 2,21, p = 0,161, \eta_p^2 = 0,145$) und auf die Verarbeitungszeit ($F(1,13) = 1,84, p = 0,198, \eta_p^2 = 0,124$) festgestellt werden (Abbildung 9a). In den Versuchsdurchläufen mit konjugierten Stimuli lag die Verarbeitungszeit während allen Verzögerungen etwa 200 bis 300 Millisekunden über der Verarbeitungszeit in den Versuchsdurchläufen mit einfachen Stimuli (Abbildung 9b).

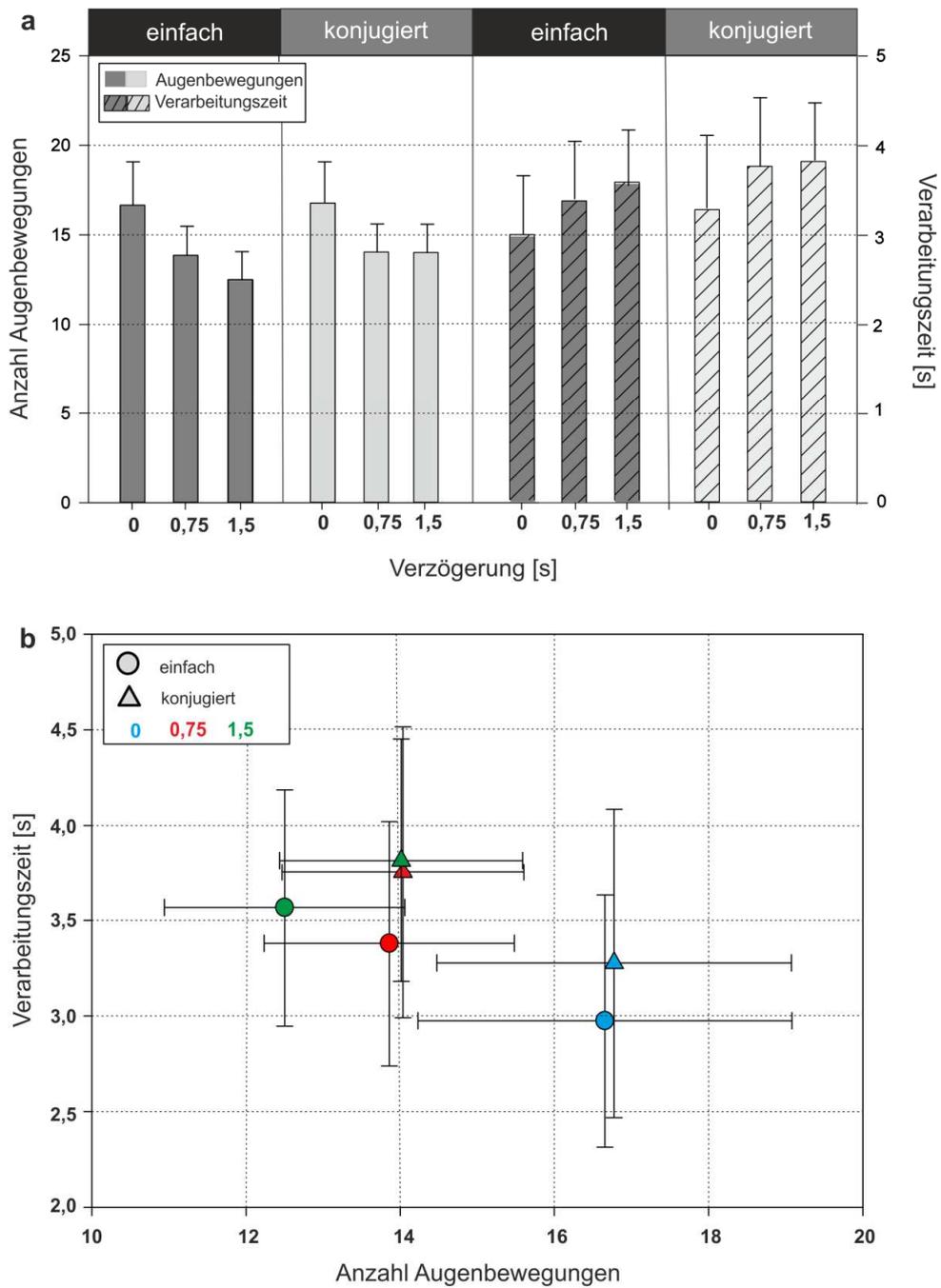


Abbildung 9: Gruppenergebnisse bzgl. des Einsatzes der Akquisitions- und Memorierungsstrategie. **a** Die Anzahl an Augenbewegungen diente als Maß für die Akquisition (links: dunkelgrau für einfache und hellgrau für konjugierte Stimuli). Die Verarbeitungszeit diente als Maß für die Memorierung (rechts: dunkelgrau gestreift für einfache und hellgrau gestreift für konjugierte Stimuli). Die Daten sind über alle Versuchspersonen gemittelt und für alle Verzögerungsstufen dargestellt. **b** Die verzögerungsabhängige (blau 0 s, rot 7,75 s und grün 1,5 s) Entscheidungsfindung zwischen Akquisition und Memorierung, gemittelt über alle Versuchspersonen, für einfache (Kreise) und konjugierte (Dreiecke) Stimuli.

Es wurde ein signifikanter, positiver Zusammenhang zwischen den einzelnen Versuchspersonen bezüglich der Anzahl an Augenbewegungen in Versuchsdurchläufen mit einfachen und in Versuchsdurchläufen mit konjugierten Stimuli festgestellt ($r(12) = 0,97$, $p < 0,0001$). Die Regressionsgerade entsprach in etwa der Winkelhalbierenden (Abbildung 10a). Es war ebenfalls ein signifikanter, positiver Zusammenhang der Verarbeitungszeit von einfachen und konjugierten Stimuli zu beobachten ($r(12) = 0,95$, $p < 0,0001$) (Abbildung 10b).

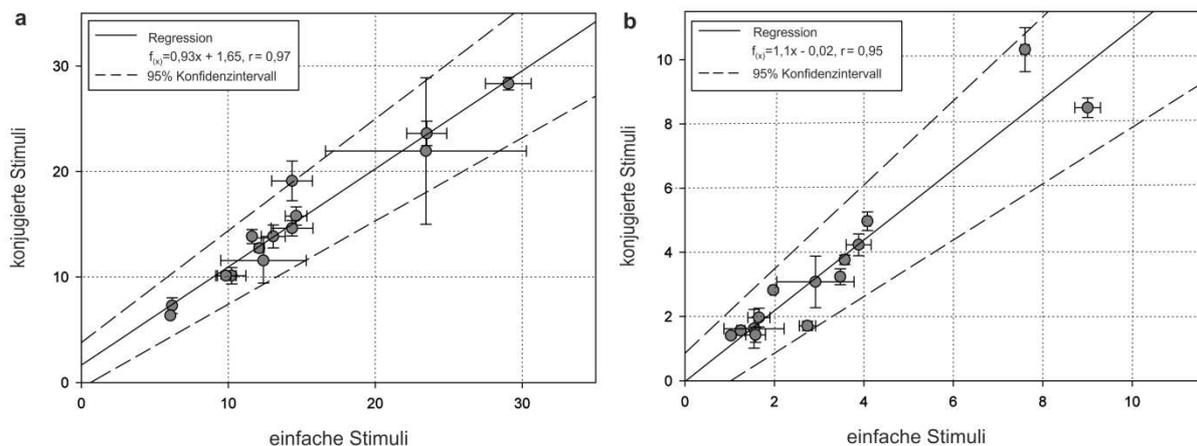


Abbildung 10: Stabilität der Strategiewahl jeder Versuchsperson (graue Kreise) für einfache und konjugierte Stimuli. **a** Korrelation von einfachen und konjugierten Stimuli für die Anzahl an Augenbewegungen. **b** Korrelation von einfachen und konjugierten Stimuli für die Verarbeitungszeit.

Links / rechts Symmetrie

In den Versuchsdurchläufen mit einfachen Stimuli und einer Verzögerungszeit von 0,75 s war die Verarbeitungszeit für die rechte Spalte signifikant höher als die Verarbeitungszeit für die linke Spalte (abhängiger t-Test: $t(13) = 3,18$, $p < 0,05$). Für alle anderen Verzögerungen wurde unabhängig von der Art des Stimulus kein signifikanter Unterschied zwischen der Verarbeitungszeit der linken und der rechten Spalte gefunden (abhängiger t-Test: $p > 0,05$) (Abbildung 11).

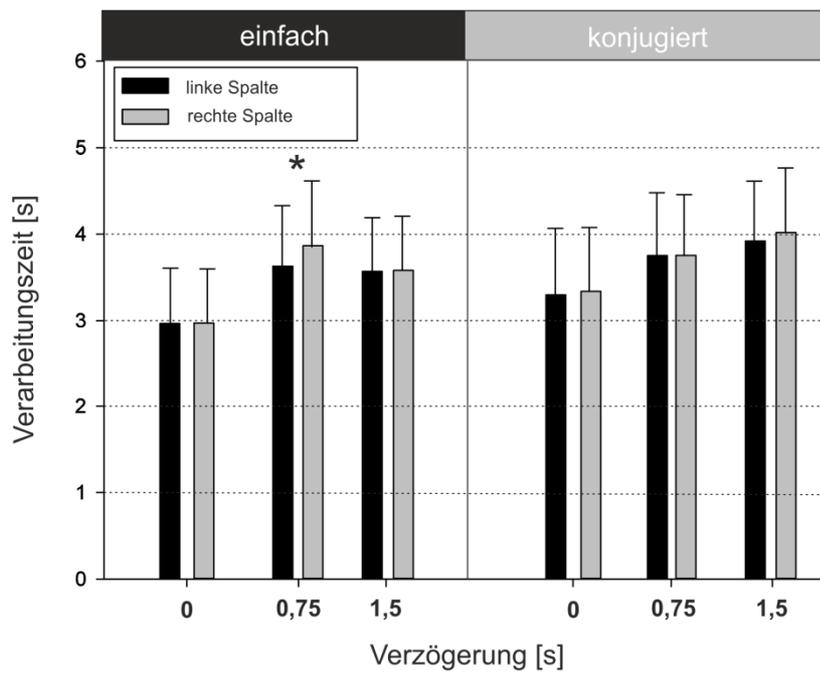


Abbildung 11: Links-rechts Symmetrie. Die Verarbeitungszeit gemittelt über alle Versuchspersonen ist getrennt für die linke (schwarz) und die rechte (grau) Spalte für einfache (links) und konjugierte (rechts) Stimuli und jede Verzögerung dargestellt.

Entscheidungsfindung zwischen Akquisition und Memorierung

Die individuelle Entscheidungsfindung zwischen der Akquisitions- und Memorierungsstrategie ist in Abbildung 12 dargestellt. Alle Versuchspersonen lagen auf einer Kurve, welche dem Potenzgesetz folgt. Die Verarbeitungszeit sank mit zunehmender Anzahl an Augenbewegungen. Versuchsperson 14 zeigte mit im Mittel $28,69 \pm 1,87$ Augenbewegungen pro Versuchsdurchlauf die höchste Anzahl an Augenbewegungen und zugleich mit $1,21 \pm 0,22$ s die niedrigste Verarbeitungszeit. Versuchsperson 12 zeigte mit einer mittleren Anzahl von $6,19 \pm 0,19$ Augenbewegungen pro Versuchsdurchlauf die wenigsten Augenbewegungen und gleichzeitig mit $8,76 \pm 0,22$ s die zweithöchste Verarbeitungszeit. Zusätzlich wurde die Wahl der Strategie getrennt für die beiden Stimulus-Bedingungen betrachtet. Für die Versuchsdurchläufe mit konjugierten Stimuli war die Anzahl an Augenbewegungen höher als die über die Bedingungen gemittelte Anzahl an Augenbewegungen. Die Verarbeitungszeit blieb etwa gleich. Die Versuchsdurchläufe mit einfachen Stimuli wiesen vergleichsweise eine niedrigere Anzahl an Augenbewegungen und eine gleichbleibende Verarbeitungszeit auf. (Abbildung 12a). Die 95%-Konfidenzintervalle der einfachen und konjugierten Stimuli überlappten sich stark (Abbildung 12b).

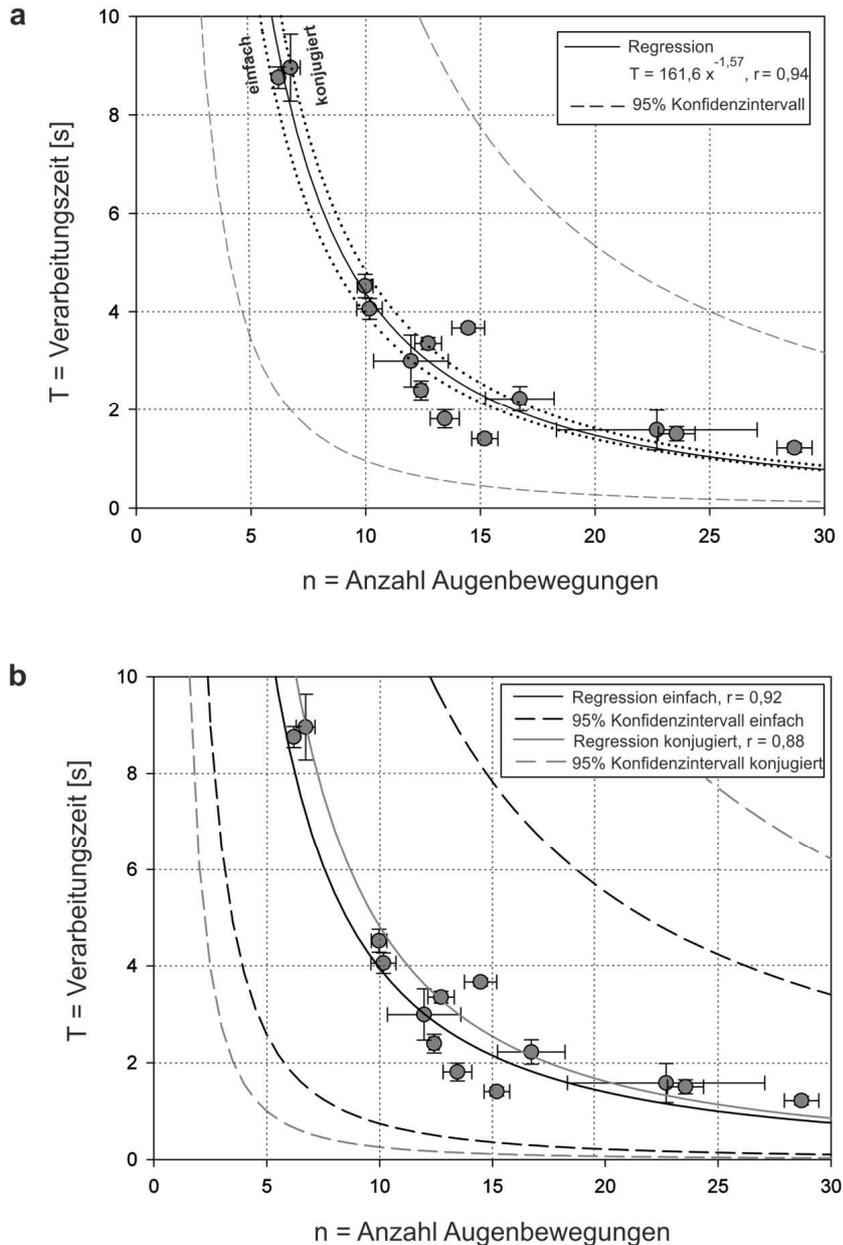


Abbildung 12: Entscheidungsfindung zwischen Akquisition (Anzahl Augenbewegungen) und Memorierung (Verarbeitungszeit). Individuelle Strategien der Versuchspersonen (graue Kreise mit Standardfehler). **a** Individuelle Strategien gemittelt über alle sechs Bedingungen für jede Versuchsperson. Die Regression der individuellen Strategien (durchgezogene, schwarze Linie) folgt einer Potenzfunktion mit $r = 0,94$. Das 95 % Konfidenzintervall ist als graue, gestrichelte Linie dargestellt. **b** Individuelle Strategien der Versuchspersonen gemittelt über alle drei Verzögerungen sind getrennt für einfache und konjugierte Stimuli dargestellt. Die Regression folgt für einfache Stimuli einer Potenzfunktion mit $r = 0,92$ (schwarze durchgezogene Linie) und für konjugierte Stimuli einer Potenzfunktion mit $r = 0,88$ (graue durchgezogene Linie). Die gestrichelten Linien zeigen die sich überlappenden 95%-Konfidenzintervalle für einfache (schwarz) und konjugierte (grau) Stimuli.

Stabilität der Strategie über die Versuchsdurchläufe

Die Anzahl an Augenbewegungen und die Verarbeitungszeit wurden über die sechs Wiederholungen einer Bedingung untersucht und sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Anzahl an Augenbewegungen schwankte zwischen 12 und 20 und änderte sich jedoch nicht systematisch im Verlauf des Versuchs. Im dritten Versuchsdurchlauf mit konjugierten Stimuli und ohne Verzögerung sank die Anzahl an Augenbewegungen im Vergleich zu den anderen Versuchsdurchläufen stark ab, stabilisierte sich ab Versuchsdurchlauf vier jedoch wieder (Abbildung 13b). In den Versuchsdurchläufen ohne Verzögerung wurde die höchste Anzahl an Augenbewegungen beobachtet. Etwas geringer war die Anzahl an Augenbewegungen in den Versuchsdurchläufen mit 0,75 s Verzögerung und am geringsten in den Versuchsdurchläufen mit 1,5 s Verzögerung (Abbildung 13a und b).

Die Verarbeitungszeit schwankte über die Versuchsdurchläufe zwischen 2,5 s und 4,5 s. Sie sank leicht im Verlauf des Versuchs. Die geringste Verarbeitungszeit wurde in den Versuchsdurchläufen ohne Verzögerung benötigt. In den Versuchsdurchläufen mit 0,75 s und 1,5 s war die Verarbeitungszeit etwas höher (Abbildung 13c und d). Für die einfachen Stimuli war die Verarbeitungszeit zu Beginn bei einer Verzögerung von 1,5 s am Höchsten. Ab Versuchsdurchlauf drei benötigten die Versuchspersonen eine höhere Verarbeitungszeit für Versuchsdurchläufe mit 0,75 s Verzögerung (Abbildung 13c). Für die Versuchsdurchläufe mit konjugierten Stimuli benötigten die Versuchspersonen zu Beginn eine höhere Verarbeitungszeit, wenn die Verzögerung 0,75 betrug. Ab Versuchsdurchlauf drei war die Verarbeitungszeit für Versuchsdurchläufe mit 1,5 s Verzögerung höher als für Versuchsdurchläufe mit 0,75 s Verzögerung (Abbildung 13d).

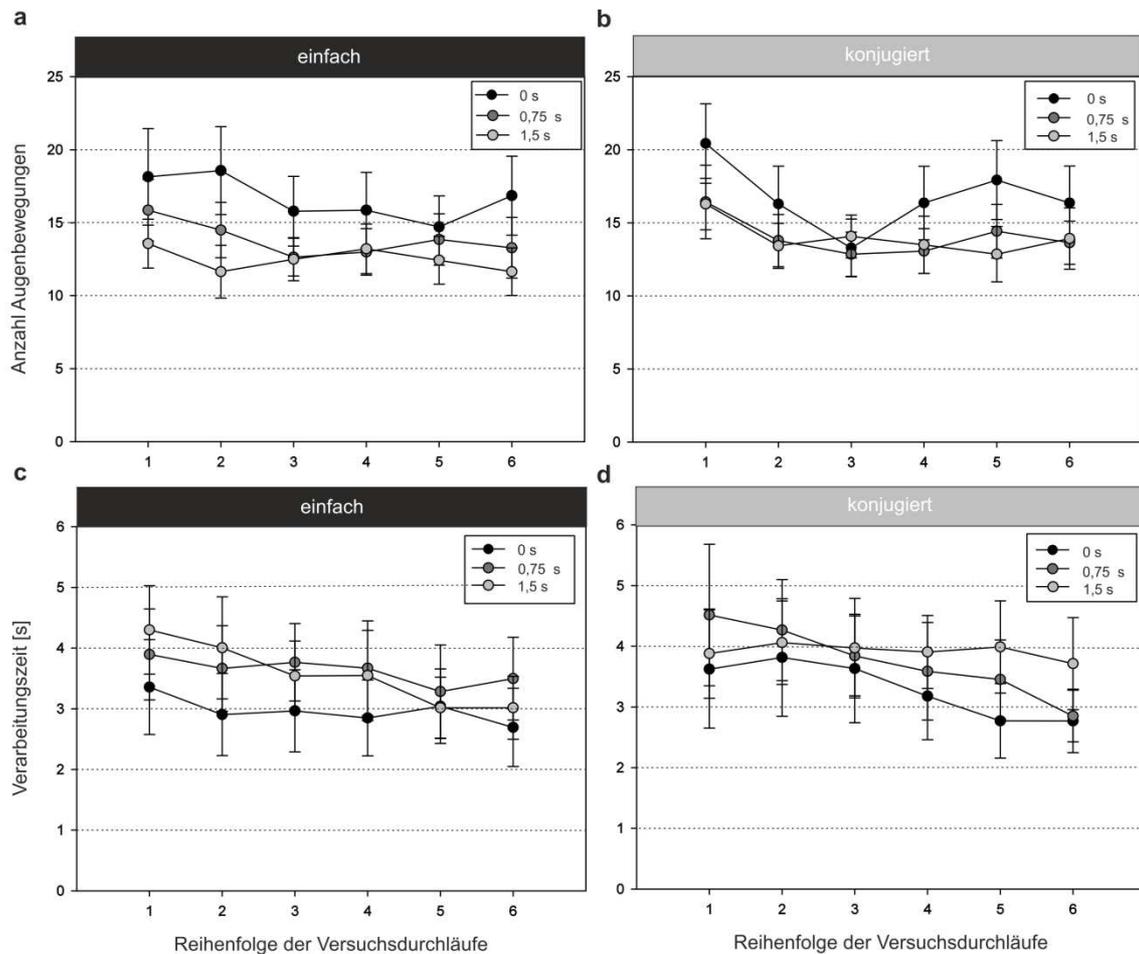


Abbildung 13: Stabilität der Entscheidungsfindung über die sechs Versuchsdurchläufe. Die Anzahl an Augenbewegungen wurde über alle Versuchspersonen gemittelt und für alle Verzögerungen gegen die Reihenfolge der Versuchsdurchläufe für einfache (a) und konjugierte Objekte (b) aufgetragen. Die Verarbeitungszeit wurde über alle Versuchspersonen gemittelt und für alle Verzögerungen gegen die Reihenfolge der Versuchsdurchläufe für einfache (c) und konjugierte Objekte (d) aufgetragen.

Versuchsteil 2: *Change Detection-Versuch*

Gesamtkapazität der Versuchspersonen

Die Gedächtnis-Kapazität der Versuchspersonen wurde durch eine Prozent-Berechnung über die Set-Größen normiert um über die Set-Größen mitteln zu können und ist in Abbildung 14 dargestellt. Im Mittel konnten sich die Versuchspersonen $62,46 \pm 5,42$ % der einfachen Objekte merken. Mit im Mittel $45,39 \pm 11,24$ % war die Gesamtkapazität der Versuchspersonen für die konjugierten Stimuli hoch signifikant niedriger (abhängiger t-Test: $t(26) = 4,44$, $p < 0,0001$). Auch die individuelle Gesamtkapazität aller Versuchspersonen (mit Ausnahme von Versuchspersonen sieben und 11) lag für die konjugierten Stimuli unter der Gesamtkapazität für einfache Stimuli (Abbildung 14).

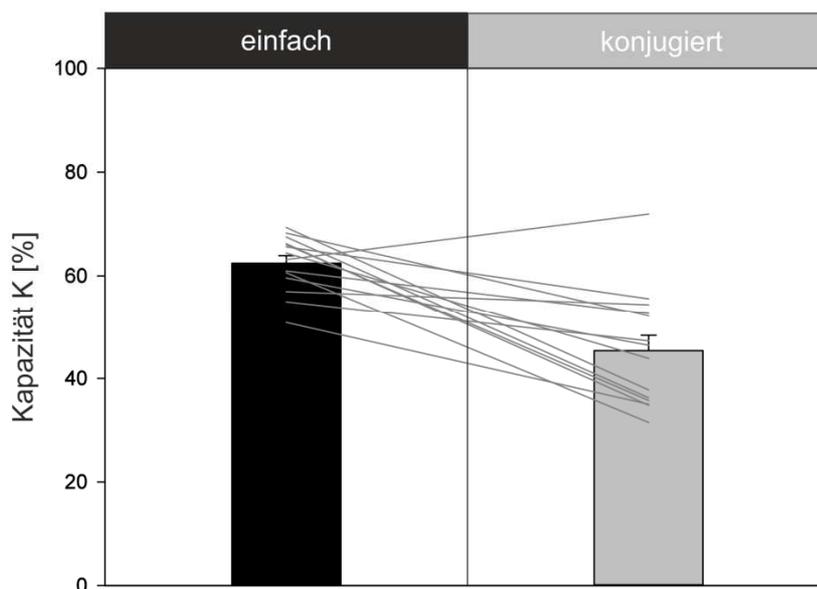


Abbildung 14: Gesamtkapazität K des Arbeitsgedächtnisses in Prozent. Die normierte Gesamtkapazität des Arbeitsgedächtnisses wurde über alle Set-Größen und Versuchspersonen gemittelt und ist getrennt für einfache (schwarz) und konjugierte (grau) Stimuli dargestellt. Jede graue Linie repräsentiert eine Versuchsperson und stellt die individuelle Gesamtkapazität der Versuchspersonen für einfache und konjugierte Objekte dar.

Kapazität des Arbeitsgedächtnisses in Abhängigkeit von der Set-Größe

In Abbildung 15 ist die mittlere Kapazität K des Arbeitsgedächtnisses der Versuchspersonen für die unterschiedlichen Set-Größen (zwei, vier und sechs Stimuli) in Prozent dargestellt. Es wurde ein hoch signifikanter Einfluss der Art des Stimulus und der Set-Größe auf die Kapazität gefunden (zwei-Faktor-ANOVA: für Art des Stimulus: $F(1,13) = 26,62$, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,672$; für Set-Größe: $F(2,13) = 147,12$, $p < 0,0001$, $\eta_p^2 = 0,919$). Die Kapazität K des Arbeitsgedächtnisses sank mit zunehmender Anzahl an präsentierten Stimuli (Abbildung 15). Für eine Set-Größe von zwei Stimuli lag die Kapazität der Versuchspersonen im Mittel bei $92,45 \pm 5,75$ % für einfache und bei $86,55 \pm 11,32$ % für konjugierte Stimuli. Bei dieser Set-Größe wurde kein signifikanter Einfluss der Art des Stimulus auf die Kapazität gefunden (abhängiger t-Test: $t(13) = 1,9$, $p = 0,079$). Bei einer Set-Größe von vier Stimuli war die Kapazität für konjugierte Objekte hoch signifikant niedriger als die Kapazität für einfache Stimuli (abhängiger t-Test: $t(13) = 4,68$, $p < 0,001$). Die Versuchspersonen zeigten bei einfachen Stimuli im Mittel eine Kapazität von $59,58 \pm 14,23$ % und für konjugierte Stimuli eine Kapazität von $32,73 \pm 18,93$ %. Die geringste Kapazität wurde bei einer Set-Größe von sechs Stimuli festgestellt. Für einfache Stimuli lag diese bei $35,36 \pm 14,95$ % und für konjugierte Stimuli bei $13,32 \pm 23,14$ %. Bei sechs präsentierten Stimuli war die Kapazität für konjugierte Stimuli ebenfalls signifikant niedriger als die Kapazität für einfache Stimuli (abhängiger t-Test: $t(13) = 2,68$, $p < 0,05$). Zusätzlich wurde eine Interaktion zwischen der Art des Stimulus und der Set-Größe gefunden (zwei-Faktor-ANOVA: $F(2,26) = 3,71$, $p < 0,05$, $\eta_p^2 = 0,222$) (Abbildung 15).

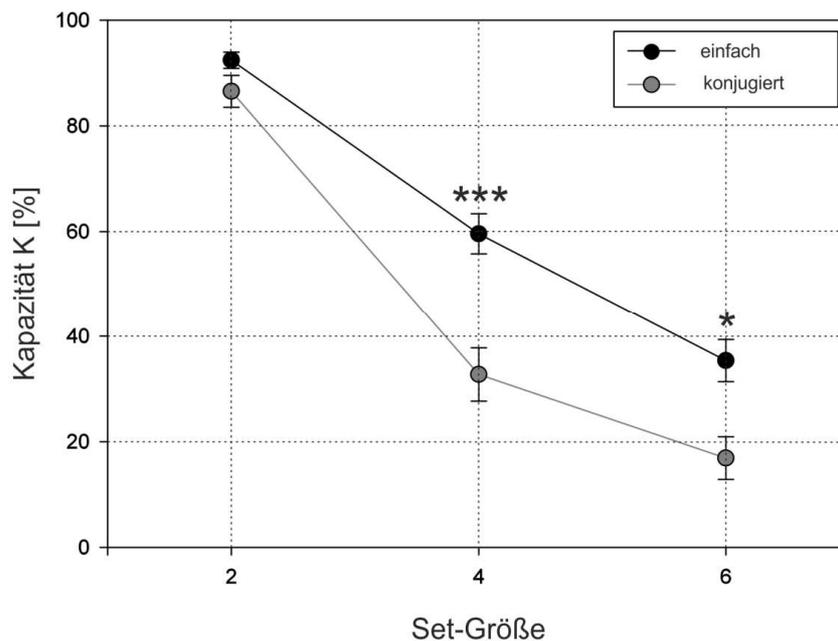


Abbildung 15: Kapazität K des Arbeitsgedächtnisses in Prozent in Abhängigkeit von der Set-Größe und der Art des Stimulus (einfach: schwarz, konjugiert: grau). K wurde über die Prozent-Berechnung normiert und über alle Versuchspersonen gemittelt.

Korrelation zwischen Gesamtkapazität und Wahl der Strategie

Der Zusammenhang zwischen der Gesamtkapazität K für eine Set-Größe von zwei Stimuli und der von den Versuchspersonen gewählten Strategie ist in Abbildung 16 dargestellt. Für Versuchsdurchläufe mit einfachen Stimuli war ein leichter Trend zu sehen, dass die Anzahl an Augenbewegungen mit zunehmender Kapazität des Arbeitsgedächtnisses sank (Pearson-Korrelation: $r(12) = 0,57$, $p = 0,095$) (Abbildung 16a). Für Versuchsdurchläufe mit konjugierten Stimuli wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl an Augenbewegungen und der Kapazität K des Arbeitsgedächtnisses festgestellt ($r(12) = 0,11$, $p = 0,701$) (Abbildung 16b). Für die Verarbeitungszeit wurde unabhängig von der Art des Stimulus kein signifikanter Zusammenhang mit der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses gefunden (Pearson-Korrelation für einfache Stimuli: $r(12) = 0,40$, $p = 0,155$, Pearson-Korrelation für konjugierte Stimuli: $r(12) = 0,03$, $p = 0,915$) (Abbildung 16c und d).

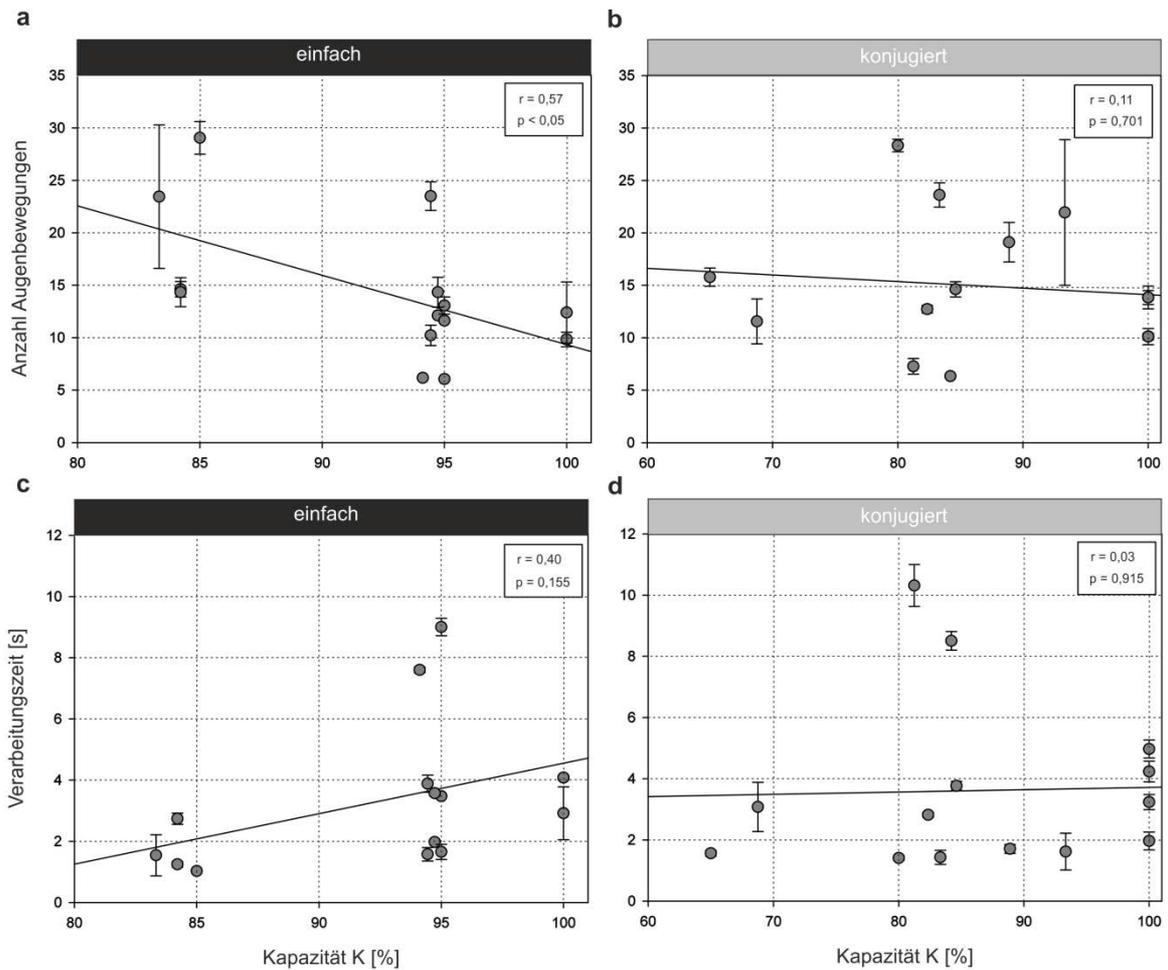


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen der Gesamtkapazität K des Arbeitsgedächtnisses der Versuchspersonen und der von den Versuchspersonen gewählten Strategie. Die Anzahl an Augenbewegungen für einfache (a) und konjugierte (b) Stimuli ist gegen die Gesamtkapazität K für eine Set-Größe von zwei Stimuli aufgetragen. Auch die Verarbeitungszeit für einfache (c) und konjugierte (d) Stimuli ist gegen die Gesamtkapazität K für eine Set-Größe von zwei Stimuli aufgetragen. Jeder Kreis repräsentiert eine Versuchsperson. Die Regressionsgerade ist als durchgezogene, dunkelgraue Linie dargestellt, das 95%-Konfidenzintervall als gestrichelte graue Linie.

5. Diskussion

Mit Hilfe der vergleichenden visuellen Suche nach dem Versuchsdesign von Hardiess und Mallot (2015) wurden die Gedächtnisfunktionen, die der Entscheidungsfindung unterliegen im Zusammenhang mit den Eigenschaften konjugierter Stimuli untersucht. Als zu vergleichende Objekte wurden zwei bekannten Stimulusqualitäten aus der Merkmalssuche verwendet. Die einfachen Stimuli unterschieden sich dabei in nur einem Merkmal (Orientierung), die konjugierten Stimuli jedoch in zwei Merkmalen (Orientierung und Größe der Lücke). Während der vergleichenden visuellen Suche wurde die Anzahl an Augenbewegungen durch die Anzahl an Mausklicks gezählt. Die Anzahl an Augenbewegungen diente als Maß für die Akquisitionsstrategie und weiterhin als ein indirektes Maß für die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses. Mit Hilfe von drei Verzögerungen durch einen Maskenwechsel wurden die Kosten der Akquisitionsstrategie manipuliert. Ebenfalls gemessen wurde die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Mausklicks, die als Verarbeitungszeit definiert wurde. Diese diente als Maß für die Memorierungsstrategie und bezeichnet den Aufwand welcher von den Versuchspersonen zur Wahrnehmung/Enkodierung und zum Vergleich der Stimuli benötigt wurde. Die Kosten für die Memorierungsstrategie wurden durch die Anzahl der Merkmale der beiden Stimuli manipuliert.

Leistung der Versuchspersonen und Stabilität der Strategie

Die Versuchsbedingungen wurden so gewählt, dass ein ausgeglichenes Schwierigkeitslevel gewährleistet werden konnte. Alle Versuchspersonen zeigten, wie auch schon im vorherigen Versuch, eine hohe Leistung (Hardiess und Mallot 2015). Sie absolvierten den Versuch mit einer geringen Fehlerrate zwischen drei und 13 %. Die Fehlerrate der Versuchsdurchläufe mit konjugierten Stimuli war tendenziell etwas höher als die Fehlerrate der Versuchsdurchläufe mit einfachen Stimuli (Abbildung 8). Dies entspricht den Ergebnissen von Alvarez und Cavanagh (2004), die ebenfalls eine höhere Fehlerrate für komplexere Objekte zeigten. Durch die Verzögerungen aufgrund des Maskenwechsels wurden die Augenbewegungen und die Verarbeitungszeit signifikant beeinflusst. Mit zunehmender Verzögerungszeit wurden weniger Augenbewegungen durchgeführt und die Verarbeitungszeit wurde länger (Abbildung 9a). Die Anzahl an Augenbewegungen wurde reduziert, wenn die Kosten für die Akquisitionsstrategie stiegen. Die Versuchspersonen verwendeten zur Kompensation die Memorierungsstrategie aufgrund geringerer Kosten. Innerhalb der sechs Ver-

suchsdurchläufe mit den gleichen Verzögerungszeiten blieb die Wahl der Strategie stabil. Es wurde kein Einfluss der Wiederholungen der Versuchsdurchläufe auf die Entscheidungsfindung festgestellt (Abbildung 13). Dies war nach Hardiess und Mallot (2015) auch nicht zu erwarten, da alle zur Lösung der Aufgabe benötigten Verhaltensweisen, wie das Ausführen von Augenbewegungen, das Wiedererkennen, Kodieren und der Erhalt von Information, und ihre jeweiligen Kosten aus dem Alltag bekannt sind. Somit zeigten die Versuchspersonen keine Adaptation des Einsatzes dieser Strategien über die Versuchszeit (Hardiess und Mallot 2015).

Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Stimuli

Das Ziel der vergleichenden visuellen Suche war es herauszufinden, auf welcher Verarbeitungsstufe der bereits in vorherigen Experimenten festgestellte Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Objekten beruht.

Bei Betrachtung der Strategiewahl der einzelnen Versuchspersonen war ein Unterschied in der Anzahl an Augenbewegungen zwischen Versuchsdurchläufen mit einfachen und Versuchsdurchläufen mit konjugierten Stimuli zu sehen. Da sich die Konfidenzintervalle der beiden Kurven für einfache und konjugierte Stimuli stark überlappten (Abbildung 12b), entstand der gefundene Unterschied vermutlich zufällig durch die große Variation zwischen den Versuchspersonen. Es kann demnach nicht von einem signifikanten Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Objekten in der Anzahl an Augenbewegungen ausgegangen werden. Wurde über alle Versuchspersonen gemittelt, war kein signifikanter Einfluss der Stimulusart auf die Anzahl an Augenbewegungen festzustellen (Abbildung 9a). Die Verarbeitungszeit hingegen war für die konjugierte Stimuli etwa 200-300 Millisekunden höher als für die einfachen Stimuli (Abbildung 9b).

Die Anzahl an Augenbewegungen diente neben der Akquisitionsstrategie als Maß für die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses. Da kein Unterschied in der Anzahl an Augenbewegungen zwischen einfachen und konjugierten Stimuli beobachtet wurde (Abbildung 9a), benötigten die konjugierten Objekte keine höhere Speicherkapazität als die einfachen Objekte. Konjunktionen waren demnach in diesem Versuch keine Belastung für das Arbeitsgedächtnis, obwohl die Kosten für die Memorierung durch das Hinzufügen eines zweiten Merkmals manipuliert wurden. Die Ergebnisse entsprachen der Theorie, dass das Arbeitsgedächtnis nicht einzelne Merkmale, sondern integrierte Objekte speichert. Es entstehen keine zusätzlichen Kosten für inte-

grierte Objekte, die sich aus mehreren Merkmalen zusammen setzen. Die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses liegt laut Luck und Vogel (1997) bei drei bis vier. Alvarez und Cavanagh (2004) bestätigten in ihren Experimenten eine Kapazität des Arbeitsgedächtnisses von vier Objekten für die einfachsten Merkmale, wie Luck und Vogel sie benutzten. Werden die Objekte jedoch komplexer, sinkt die Kapazität, da die visuelle Information zu groß wird. Wenn von Konjunktionen gesprochen wird, stellt sich fortgesetzt die Frage, ob die Bindung der Objekte Kosten verursacht. In vielen Experimenten wurde gezeigt, dass die Verknüpfung von Merkmalen Kosten verursacht, da die Memorierung konjugierter Objekte meist schlechter war als die Memorierung einfacher Objekte (Parra et al. 2009). Ecker et al. (2013) zeigten, dass es verschiedene Arten von Konjunktionen gibt. Da sich diese in ihrer Verarbeitung voneinander unterscheiden, lassen sich die unterschiedlichen Forschungsergebnisse vermutlich auf darauf zurück führen. Es kann zwischen intrinsischen und extrinsischen Konjunktionen unterschieden werden (Ecker et al. 2013). Bei intrinsischen Konjunktionen ist das konjunktive Merkmal ein Oberflächenmerkmal und Teil des Objekts (z.B. farbige Form). Da die frühe Wahrnehmung intrinsische Konjunktionen integriert, entstehen auf Seiten des Arbeitsgedächtnisses keine Kosten für die Bindung. Steht das konjunktive Merkmal im Kontext (z.B. das Objekt und seine Lage), wird von extrinsischen Konjunktionen gesprochen. Diese haben hingegen einen Einfluss auf das Arbeitsgedächtnis (Ecker et al. 2013). Da es sich bei den in diesem Versuch verwendeten Stimuli um einfache Konjunktionen handelte, verursacht die Bindung der Merkmale in diesem Fall keine Kosten. Konjugierte Stimuli benötigen, wie im Versuch gezeigt, nicht mehr Speicherplatz als einfache Stimuli.

Die zweite gemessene Variable, die Verarbeitungszeit, war für die konjugierten Stimuli etwa 200-300 Millisekunden höher als für die einfachen Stimuli (Abbildung 9b). Da sich die Verarbeitungszeit aus der benötigten Zeit für die Wahrnehmung/Enkodierung und den Vergleich der Objekte zusammensetzte, benötigten die konjugierten Stimuli mehr Zeit für diese beiden Prozesse. Ergebnisse anderer Experimente zeigten ebenfalls einen Unterschied zwischen einfachen und komplexeren Objekten, welcher eher auf Wahrnehmung und Enkodierung zurückzuführen war als auf die Memorierung (Droll und Hayhoe 2007). Während des Prozesses Wahrnehmung/Enkodierung kommt die erhöhte Verarbeitungszeit für intrinsische Konjunktionen durch die Kosten für die Bindung der Merkmale auf Seiten der frühen Wahrnehmung (Ecker et al. 2013) und durch die erhöhte Menge an zu enkodierender Informa-

tion zustande (Alvarez und Cavanagh 2004). Zusätzliche Zeit für das Enkodieren wird benötigt, da während dem Enkodieren eine Entscheidung darüber getroffen wird, welche Merkmale gespeichert werden (Droll und Hayhoe 2007). Bei einer größeren Informationsmenge durch mehr Merkmale bei konjugierten Objekten dauert dies vermutlich ebenfalls länger als bei einfachen Objekten mit nur einem Merkmal. Einen weiteren Grund für die höhere Wahrnehmungs- und Enkodierungszeit für konjugierte Objekte liefert die Merkmalsintegrationstheorie. Besteht ein Objekt aus mehr als einem Merkmal, muss zur Objektwahrnehmung die Aufmerksamkeit auf jedes einzelne Merkmal gerichtet werden (Treisman und Gelade 1980). Einfache Objekte werden hingegen einfach und parallel wahrgenommen und somit auch schneller. Wurden die Objekte in der einen Spalte enkodiert, wahrgenommen und gespeichert, mussten diese gespeicherten Objektrepräsentationen anschließend mit der anderen Spalte verglichen werden. Stimmt eine gespeicherte Repräsentation mit einem visuell wahrgenommenen Objekt überein, kam es zur Objekterkennung (Ullman 1989). Dieser zweite Prozess, der Vergleich der Objekte, benötigte Zeit und beeinflusste ebenfalls die Verarbeitungszeit. Die Ergebnisse dieses Versuches zeigten im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten keinen Unterschied in der Verarbeitungszeit zwischen der linken und der rechten Spalte und somit keine klare Lateralisierung von Enkodierung und Vergleich (Hardiess et al. 2008, Hardiess und Mallot 2015) (Abbildung 11). Es kann in diesem Fall nicht zwischen den beiden Prozessen unterschieden werden, denn die Versuchspersonen hatten zwei Möglichkeiten die Aufgabe zu lösen. Lief in der linken Spalte immer der Prozess Wahrnehmung/Enkodierung ab und in der rechten Spalte immer der Vergleich, benötigten die beiden Prozesse gleich viel Zeit (Abbildung 17a). Erfolgten Wahrnehmung/Enkodierung und Vergleich jedoch in beiden Spalten, konnten diese beiden Prozesse verschieden lang gewesen sein und sich auf beiden Seiten ausgeglichen haben (Abbildung 17b). Es konnte nicht unterschieden werden, wann welcher Prozess stattgefunden hat. Ob die Prozesse die Verarbeitungszeit gleich stark beeinflussten, konnte daher nicht herausgefunden werden.

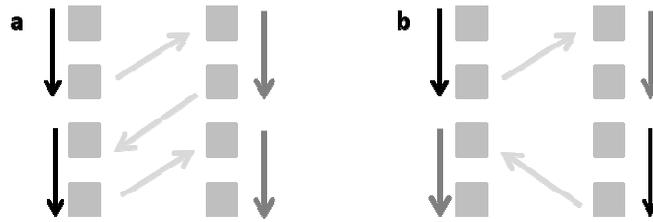


Abbildung 17: Die Verarbeitungszeit setzte sich aus Wahrnehmung/Enkodierung (schwarz) und dem Vergleich (grau) zusammen. Das Versuchsdesign ließ keine Rückschlüsse auf die Dauer der beiden Prozesse zu, da die Versuchspersonen zwei Möglichkeiten besaßen die Aufgabe zu lösen. **a** Die Versuchspersonen nahmen die Stimuli links wahr und enkodierten diese und verglichen die gespeicherten Repräsentationen mit der rechten Spalte. Nach dem Vergleich kehrten sie zur Wahrnehmung/Enkodierung in die linke Spalte zurück. **b** Die Versuchspersonen nahmen die Stimuli links wahr und enkodierten diese und verglichen die gespeicherten Repräsentationen mit der rechten Spalte. Nach dem Vergleich kehrten sie nicht zur linken Spalte zurück, sondern enkodierten eine Anzahl an Stimuli in der rechten Spalte und verglichen diese anschließend mit der linken Spalte.

Individuelle Entscheidungsfindung zwischen Akquisition und Memorierung

Mit Hilfe der vergleichenden visuellen Suche wurde neben den Eigenschaften konjugierter Stimuli auch die adäquate und individuelle Entscheidungsfindung untersucht. Um die Aufgabe zu lösen wählten die Versuchspersonen individuelle Strategien, die, zusammen aufgetragen, dem Verlauf einer Potenzfunktion folgten und von starker Präferenz für Akquisition (beruhend auf den Augenbewegungen, untere rechte Seite der Kurve) bis zu einer gleichwertigen Präferenz für die Memorierung (beruhend auf dem Arbeitsgedächtnis, obere linke Seite der Kurve) reichten (Abbildung 12a). Diese individuellen Unterschiede in der Entscheidungsfindung entsprachen vorherigen Forschungsergebnissen (Hardiess und Mallot 2015). Die individuellen Strategien fielen nie in die obere rechte oder die untere linke Ecke im Strategiebereich, was auf die schriftliche Anweisung vor Beginn des Versuches, die Aufgabe so schnell und so genau wie möglich zu lösen, zurückzuführen war. Eine kurze Verarbeitungszeit und wenige Augenbewegungen wären optimal, um die Aufgabe so schnell wie möglich zu lösen, erhöhten jedoch das Risiko, Fehler zu machen. Eine gute Leistung konnte durch eine hohe Anzahl an Augenbewegungen und eine lange Verarbeitungszeit erzielt werden. Da hierdurch jedoch hohe Zeitkosten anfallen, wurde diese Strategie durch die Aufforderung, die Aufgabe so schnell wie möglich zu lösen, verhindert (Hardiess und Mallot 2015). Die starke Variabilität zwischen den Versuchspersonen in der Wahl der Strategie ist vermutlich auf eine individuell unterschiedliche Gewichtung der Kosten zurückzuführen.

Zusammenhang zwischen der Entscheidungsfindung und der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses

Eine unterschiedliche Gewichtung der Kosten kann aufgrund individueller Fähigkeiten der Versuchspersonen erfolgen. Da das Arbeitsgedächtnis, wie durch viele Studien nachgewiesen, eine individuelle Kapazität aufweist (Eriksson et al. 2015), sind verschiedene Speicherfähigkeiten der Versuchspersonen eine mögliche Ursache für die gefundenen Unterschiede in deren Strategiewahl. Um zu untersuchen, ob die Wahl der Strategie von der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses abhängt, wurde mit einem *Change Detection*-Versuch die individuelle Kapazität der Versuchspersonen ermittelt und mit der Strategiewahl in der vergleichenden visuellen Suche in Zusammenhang gesetzt.

Die Gesamtkapazität des Arbeitsgedächtnisses der Versuchspersonen wurde für einfache und konjugierte Objekte durch drei verschiedene Set-Größen bestimmt. Die Gesamtkapazität war für einfache Stimuli höher als für konjugierte Stimuli (Abbildung 14). Da im ersten Versuchsteil gezeigt wurde, dass die konjugierten Stimuli eine längere Zeit zur Wahrnehmung/Enkodieren benötigten, lag dieser Unterschied vermutlich weniger an einem unterschiedlichen Speicheraufwand, sondern an einer zu kurzen Präsentationszeit der Stimuli bei höheren Set-Größen. Bei einer Set-Größe von zwei Stimuli war eine halbe Sekunde ausreichend zum Enkodieren, bei einer höheren Set-Größe von vier oder sechs Stimuli vermutlich nicht. Bei einer Set-Größe von zwei Stimuli wurde kein signifikanter Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Stimuli festgestellt (Abbildung 15), was den Ergebnissen der vergleichenden visuellen Suche entsprach.

Aufgrund der zu kurzen Präsentationszeit für die hohen Set-Größen, konnte für die Korrelationsanalyse mit den Entscheidungsfindungen nur die ermittelten Kapazitäten bei einer Set-Größe von zwei Stimuli verwendet werden. Obwohl für die Versuchspersonen mit niedrigerer Kapazität das Speichern der Objekte und das Abwägen, was gespeichert werden soll, mit höheren Kosten verbunden sind (Eriksson et al. 2015, Vogel et al. 2005), wurde kein Zusammenhang zwischen der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und der individuellen Strategiewahl gefunden (Abbildung 16). Auch in anderen Experimenten konnte bisher kein Zusammenhang zwischen Prozessen, die der effizienten Entscheidungsfindung unterliegen, und der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses gezeigt werden (Perfetti und Goldman 1976). Es bleibt nach

diesem Versuch unklar, auf welche Faktoren die Versuchspersonen bei der Wahl der Strategie zurückgriffen. Weiterhin angenommen wird, dass die verwendete Strategie aufgrund von individuellen Gewichtungen der Kosten gewählt wurde. Des Weiteren wird das Vorhandensein bestimmter Gedächtnisabläufe vermutet, die an einer effizienten Entscheidungsfindung beteiligt sind. Nicht untersucht wurde in diesem Versuch ein Zusammenhang zwischen der Entscheidungsfindung und der zweiten Variablen, der Verarbeitungszeit. Wenn die Entscheidungsfindung nicht von der Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses abhängig ist, kann diese eventuell von der Fähigkeit Informationen wahrzunehmen und zu Enkodieren, beeinflusst werden. Versuchspersonen mit einer schlechteren Fähigkeit Informationen aufzunehmen haben eine höhere Verarbeitungszeit und können aufgrund mangelnder Zeit durch die Aufforderung, die Aufgabe schnell zu lösen, nicht die Akquisitionsstrategie verfolgen. Dieser Ansatz kann in weiteren Versuchen untersucht werden.

6. Zusammenfassung

Das erste Ziel des Versuchs war es herauszufinden, auf welcher Verarbeitungsstufe der Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Objekten beruht. Da kein Einfluss der Art des Stimulus auf die Anzahl an Augenbewegungen und somit auf die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses gefunden wurde, benötigten die Konjunktionen keinen zusätzlichen Speicherplatz und verursachten somit keine zusätzlichen Kosten für die Memorierung im Arbeitsgedächtnis. Der Unterschied war demnach nicht auf einen unterschiedlichen Speicheraufwand zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass das Arbeitsgedächtnis nicht einzelne Merkmale, sondern integrierte Objekte speichert (Luck und Vogel 1997). Es wurde hingegen gezeigt, dass konjugierte Stimuli eine längere Verarbeitungszeit benötigten als einfache Stimuli. Aufgrund der fehlenden Lateralisierung konnte keine Unterscheidung zwischen den Prozessen Wahrnehmung/Enkodierung und Vergleich getroffen werden. Der Unterschied zwischen einfachen und konjugierten Objekten beruht auf einer unterschiedlichen Wahrnehmungs-, Enkodierungs- oder Vergleichszeit oder sogar auf all diesen Prozessen. Zeitkosten können durch Kosten für die Bindung der Objekte auf Seiten der Wahrnehmung (Ecker et al. 2013), eine längere Enkodierungszeit für konjugierte Objekte aufgrund einer höheren Informationsmenge (Alvarez und Cavanagh 2004) oder durch Kosten für die benötigte Aufmerksamkeit (Treisman und Gelade 1980) entstehen.

Das zweite Ziel des Versuches war es herauszufinden, ob die Wahl der Strategie von der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses abhängt. Es wurde eine starke Variabilität in der effizienten Entscheidungsfindung zwischen den Versuchspersonen gefunden, allerdings wurde die Wahl der Strategie nicht von der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses beeinflusst. Es konnte nicht gezeigt werden, auf welche Faktoren die Versuchspersonen stattdessen während der Strategiewahl zurückgriffen. Vermutet wird, dass die Entscheidungsfindung von individuellen Gewichtungen der Kosten durch bestimmte, bisher unbekannte Gedächtnisabläufe beeinflusst wird. Wie, auf welchen Faktoren und durch welche Gedächtnisabläufe die Gewichtung der Kosten erfolgt, bleibt unklar.

7. Literaturverzeichnis

Alvarez, G. A. und P. Cavanagh (2004). "The Capacity of Visual Short-Term Memory Is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects." Psychological Science **15**(2): 106-111.

Baddeley, A. (2000). "The episodic buffer: a new component of working memory?" Trends in cognitive sciences **4**(11): 417-423.

Baddeley, A. D. und G. J. Hitch (1974). "Working memory." In: G. H. Bower (Hrsg.): The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory **8**: 47–89.

Bays, P. M. und M. Husain (2009). „Dynamic shifts of Limited Working Memory Resources in Human Vision." Science **8**: 851-854.

Becker, W. (1989). "The neurobiology of saccadic eye movements. Metrics." Reviews of oculomotor research **3**: 13.

Botly, L. C. P. und E. De Rosa (2012). "Impaired Visual Search in Rats Reveals Cholinergic Contributions to Feature Binding in Visuospatial Attention." Cerebral Cortex **22**(10): 2441-2453.

Cowan, N. (1988). "Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system." Psychological bulletin **104**(2): 163.

Droll, J. A. und M. M. Hayhoe (2007). "Trade-offs Between Gaze and Working Memory Use." Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance **33**(6): 1352-1365.

Ecker, U. K. H., M. Maybery, H. D. Zimmer (2013). "Binding of Intrinsic and Extrinsic Features in Working Memory ." Journal of Experimental Psychology: General **142**(1): 218-234.

Eriksson, J., E. K. Vogel, A. Lansner, F. Bergström und L. Nyberg (2015). "Neurocognitive architecture of working memory." Neuron **88**(1): 33-46.

Hardiess, G., S. Gillner und H. A. Mallot (2008). "Head and eye movements and the role of memory limitations in a visual search paradigm." Journal of Vision **8**(1): 7-7.

- Hardiess, G. und H. A. Mallot (2015). "Allocation of cognitive resources in comparative visual search—Individual and task dependent effects." Vision research **113**: 71-77.
- Hommel, B. (2004). "Event files: Feature binding in and across perception and action." Trends in cognitive sciences **8**(11): 494-500.
- LaRocque, J. J., J. A. Lewis-Peacock und B. R. Postle (2014). "Multiple neural states of representation in short-term memory? It's a matter of attention." Frontiers in Human Neuroscience **8**: 5.
- Luck, S. J. und E. K. Vogel (1997). "The capacity of visual working memory for features and conjunctions." Nature **390**(6657): 279-281.
- Ma, W. J., M. Husain und P. M. Bays (2014). "Changing concepts of working memory." Nature neuroscience **17**(3): 347-356.
- Miller, G. A. (1956). "The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information." Psychological review **63**(2): 81.
- Müsseler, J. und M. Rieger (2017). Allgemeine Psychologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Parra, M. A., S. Abrahams, R. H. Logie, S. DellaSala (2009). "Age and binding within-dimension features in visual short-term memory." Neuroscience Letters **449**(1): 1-5.
- Perfetti, C. A. und S. R. Goldman (1976). "Discourse memory and reading comprehension skill." Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior **14**: 33 -42.
- Pomplun, M., L. Sichelschmidt, K. Wagner, T. Clermont, G. Rickheit und H. Ritter (2001). "Comparative visual search: A difference that makes a difference." Cognitive Science **25**(1): 3-36.
- Rounder, J. N., R. D. Morey, C. C. Morey, N. Cowan (2011). "How to measure working memory capacity in the change detection paradigm." Psychonomic Bulletin & Review **18**(2): 324-330
- Treisman, A. M. und G. Gelade (1980). "A feature-integration theory of attention." Cognitive psychology **12**(1): 97-136.

Ullman, S. (1989). "Aligning pictorial descriptions: An approach to object recognition." Cognition **32**(3): 193-254.

Vogel, E. K., A. W. McCollough, und M. G. Machizawa (2005). "Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory." Nature **438**: 500-503.