

# Identifizierung individueller Strategien beim Trade-off zwischen Akquisitions- und Memorisierungsverhalten

Bachelorarbeit  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der  
Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von

**Alexandra Herrlich**

Tübingen, August 2014

## Erklärung

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

## Zusammenfassung

In vergangenen Studien wurde bereits nachgewiesen, dass jeder Mensch seinen eigenen Trade-off-Bereich hat, innerhalb dessen er sein Verhalten bei variierenden Akquisitions- und Memorisierungskosten in einer vergleichenden visuellen Suchaufgabe anpasst. In der vorliegenden Arbeit sollte dieser Bereich anhand von Arbeitsgedächtnis-Tests analysiert und identifiziert werden.

Als Hauptversuch wurde eine vergleichende visuelle Suchaufgabe durchgeführt, bei der die Probanden am Computerbildschirm zwei Spalten mit Symbolen miteinander vergleichen und herausfinden sollten, wie viele Unterschiede es zwischen den Spalten gibt. Die Kosten für Akquisition und Memorisierung konnten dabei leicht manipuliert werden. Die Tatsache, dass jeder Proband seinen individuellen Trade-off-Bereich hat, konnte reproduziert werden. Um diesen Bereich zu identifizieren, wurden vor dem Hauptversuch Vorversuche durchgeführt, die verschiedene Bereiche des Arbeitsgedächtnisses beanspruchten. Dazu wurde der Corsi-Test, der n-back-Test und der Operation Span-Test verwendet.

Der n-back-Test sowie der Operation Span-Test blieben ohne signifikante Korrelationen mit den abhängigen Variablen des Hauptversuches. Sie sind nicht dafür geeignet, den Trade-off-Bereich der Probanden zu identifizieren. Signifikant korrelierten die mittlere Verweildauer, die die Probanden auf einer Spalte verbrachten, bis sie zur anderen wechselten, und der  $T_i$  (Zeit, um ein Symbol zu enkodieren) mit dem Corsi-Test. Der Corsi-Test schien also dieselben Arbeitsbereiche angesprochen zu haben, die auch im Hauptversuch gefordert wurden und ist somit ein geeigneter Test, um das Verhalten der Probanden in der vergleichenden visuellen Suchaufgabe zu definieren.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich dem gesamten Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft für die lockere Atmosphäre danken, in der ich mich sofort wohlfühlt habe. Ein großer Dank gilt meinem Betreuer Gregor Hardiess, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand, ohne dabei die Geduld zu verlieren. Danke auch an Professor Hanspeter A. Mallot, der sich regelmäßig die Zeit für unsere Bachelortreffen nahm, um aktuelle Probleme zu diskutieren.

Einen besonderen Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen. Dafür, dass sie immer hinter mir und meinen Entscheidungen stehen und mich während meines Studiums sowohl emotional als auch finanziell unterstützt haben. Danke auch an meine Schwestern, die mir stets das Gefühl geben, stolz auf ihre kleine Schwester zu sein.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Material &amp; Methoden</b>	<b>9</b>
2.1 Vorversuche	9
2.1.1 Corsi-Test	9
2.1.2 Operation Span-Test	10
<i>Abhängige Variable</i>	11
2.1.3 N-back-Test	11
<i>Abhängige Variable</i>	12
2.2 Hauptversuch	12
2.2.1 Versuchsablauf	13
2.2.2 Abhängige Variablen	14
2.3 Statistische Analyse	14
<b>3. Ergebnisse</b>	<b>15</b>
3.1 Hauptversuch	15
3.1.1 Fehlerrate	15
3.1.2 Trialdauer	16
3.1.3 Blickwechsel	16
3.1.4 Verweildauer	17
3.1.5 Trade-off zwischen Akquisitions- und Memorierungsstrategie	19
3.2 Korrelationen der Ergebnisse der Vorversuche mit den abhängigen Variablen des Hauptversuchs	20
3.2.1 Korrelationen zwischen der Anzahl an Blickwechseln und den Ergebnissen der Vorversuche	20
3.2.2 Korrelationen zwischen der mittleren Verweildauer und den Ergebnissen der Vorversuche	23
3.2.3 Korrelationen zwischen $T_i$ und den Ergebnissen der Vorversuche	25

<b>4. Diskussion</b>	<b>28</b>
4.1 Hauptversuch	28
4.2 Korrelationen zwischen den Vorversuchen und dem Hauptversuch	30
4.3 Ausblick	32
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>34</b>
<b>Anhang</b>	<b>38</b>

## 1. EINLEITUNG

Über den modularen Aufbau und die Funktionsweise des Gedächtnisses, speziell des Arbeitsgedächtnisses, sind bis heute zahlreiche verschiedene Modelle entstanden, wovon die wichtigsten im Folgenden erläutert werden.

### Das Mehrspeichermodell von Atkinson & Shiffrin (1968)

Das Mehrspeichermodell von Atkinson & Shiffrin aus dem Jahr 1968 unterteilt das menschliche Gedächtnis in drei separate Systeme. Das sensorische Gedächtnis, das Kurzzeitgedächtnis und das Langzeitgedächtnis. Das sensorische Gedächtnis und das Kurzzeitgedächtnis sind für die transiente (kurzzeitige) Speicherung von Informationen zuständig, während das Langzeitgedächtnis für die dauerhafte Speicherung verantwortlich ist.

Im sensorischen Gedächtnis werden alle Informationen, die über die Sinne wahrgenommen werden, temporär gespeichert und anschließend weiterverarbeitet oder wieder überschrieben. Dabei nehmen spezifische Rezeptoren sensorische Informationen wahr (z.B. wird ein Ton bzw. dessen Schallwellen durch die Hörsinneszellen in der Cochlea registriert). Die sensorische Information wird anschließend von dem jeweiligen perzeptuellen System (auditorisches System für Gehörtes, visuelles System für Gesehenes, usw.) kurzzeitig gespeichert und kann gegebenenfalls in eine permanentere Repräsentation überführt werden, indem sie vom sensorischen Gedächtnis ins Kurzzeitgedächtnis übergeben wird. Irrelevante Informationen dagegen werden wieder gelöscht oder durch nachkommende Sinneseindrücke überschrieben.

### Die Kapazität und zeitliche Limitierung des sensorischen Gedächtnisses

Im Jahr 1960 machte Georg Sperling Versuche zur Aufnahmekapazität des visuell-sensorischen Gedächtnisses („Sperling-Experiment“). Er zeigte seinen Probanden für 50 ms 3x4 Matrizen aus beliebigen Buchstaben, die memoriert und anschließend wieder reproduziert werden sollten. Der Großteil der Probanden konnte sich an vier oder fünf Buchstaben korrekt erinnern. Das ließe vermuten, dass das visuelle sensorische Gedächtnis eine sehr geringe Aufnahmekapazität hat. Diese Vermutung sollte allerdings durch ein weiteres Experiment widerlegt werden. Nachdem Sperling den Probanden für 50 ms die Matrix präsentiert hatte, spielte er ihnen einen Ton von hoher, mittlerer oder tiefer Frequenz vor. Dabei bedeutete der Ton hoher Frequenz, dass sie die obere Reihe reproduzieren sollten, ein Ton mittlerer Frequenz entsprach der mittleren Reihe und der Ton von tiefer Frequenz der unteren Reihe. Erstaunlicherweise konnten die Probanden zumeist fast die ganze Reihe korrekt nennen. Das bedeutet, dass nach der Präsentation der Matrix noch deren fast gesamte Information im visuell-sensorischen Speicher vorliegen musste, da die Probanden erst nach dem Ausblenden der Matrix den Ton zu hören bekamen und sie sich also nicht von Anfang an auf eine bestimmte Reihe konzentrieren konnten. Die Aufnahmekapazität des visuell-sensorischen Gedächtnisses ist also größer als zuerst gedacht und der Inhalt, der noch fast die gesamte Information enthält, wird für das visuelle System Ikon genannt. Das ikonische Gedächtnis enthält mehr Information als verarbeitet werden kann. Sperling hat weitere Versuche zu der Fragestellung gemacht, wie schnell ein Ikon verblasst. Dazu wurde der Zeitpunkt, zu welchem der Ton nach der Matrix kam, variiert.

Die korrekte Wiedergabe der Buchstaben der ausgewählten Reihe wurde mit zunehmender Verzögerung des Tones immer schlechter, bis sie bei ca. einer Sekunde auf nur ungefähr einen korrekt erinnerten Buchstaben abfiel. Das gesamte Ikon ist also nach etwa einer Sekunde zerfallen. Neuere Experimenten zufolge ist das ikonische Gedächtnis in zwei Phasen unterteilbar: in die ‚pure‘ sensorische Phase, in der die sensorische Information ausschließlich wahrgenommen wird, und die Phase, in der bereits konzeptuelle Merkmale der Information repräsentiert werden (Merikle, 1980).

Im auditorisch-sensorischen Gedächtnis stellt das echoische Gedächtnis das Äquivalent zum ikonischen Gedächtnis dar. Im Jahr 1972 machte Darwin mit seiner Arbeitsgruppe Versuche dazu. Er fand heraus, dass der Inhalt des echoischen Gedächtnisses nach ungefähr vier Sekunden zerfallen war.

Wie durch die Versuche zum visuellen und zum auditorisch-sensorischen Gedächtnis erkennbar, ist die Aufnahmekapazität des sensorischen Gedächtnisses relativ groß, wobei die Informationen schnell verblassen. Eine Möglichkeit dieses Löschen des Inhaltes zu verhindern, ist es, die Aufmerksamkeit auf bestimmte Bereiche der Information zu lenken und somit eine Weiterverarbeitung der Stimuli im Kurzzeitgedächtnis zu gewährleisten.

Das Kurzzeitgedächtnis nach Atkinson & Shiffrin (1968)

Nach Atkinson & Shiffrin (1968) sind das Kurz- und das Langzeitgedächtnis separate Gedächtnissysteme. Im Kurzzeitgedächtnis ankommende Informationen aus dem sensorischen Gedächtnis werden durch ständiges Wiederholen (Rehearsal) temporär aufrechterhalten. Das wohl eingängigste Beispiel dafür ist das innere Wiederholen einer Telefonnummer, um diese nicht zu vergessen. Nach dem Rehearsal werden die Informationen entweder gelöscht oder im Langzeitgedächtnis weiterverarbeitet. Atkinson & Shiffrin (1968) sahen das Kurzzeitgedächtnis also als eine unumgängliche Durchgangsstation zum Langzeitgedächtnis.

Die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses

Um die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses zu untersuchen, machte George A. Miller (1956) die sogenannten Ziffernspannen-Versuche. Dabei sollten die Probanden zuerst eine zweistellige Folge von zuvor präsentierten Ziffern korrekt nennen, danach eine dreistellige, dann eine vierstellige usw. bis sie das erste Mal eine Ziffernfolge nicht mehr richtig wiederholen konnten. Wenn sie bei der Anzahl von fünf Ziffern das erste Mal falschlagen, dann hatten sie eine Ziffernspanne von Vier. Der Großteil der Probanden hatte eine Ziffernspanne von  $7 \pm 2$ . Deshalb prägte Miller den Begriff der ‚magischen Zahl 7‘ (Miller, 1956). Er schlussfolgerte also, dass das Kurzzeitgedächtnis der meisten Menschen eine Kapazität von zwischen fünf und neun Informationseinheiten hat.



## Die zeitliche Limitierung des Kurzzeitgedächtnisses

Der Zeitraum, innerhalb dessen Information im Kurzzeitgedächtnis bereitgestellt wird, wird Retentionsintervall genannt. Zu dessen Erforschung bekamen Probanden für kurze Zeit Trigramme (beliebige Buchstabenreihe von drei Buchstaben) gezeigt, welche sie nach Ablauf eines bestimmten Retentionsintervalls reproduzieren sollten (Peterson & Peterson, 1959). Da die Probanden bei einem Retentionsintervall von etwa 18 Sekunden nur noch ungefähr zehn Prozent der Trigramme richtig nennen konnten, schlussfolgerten Peterson & Peterson (1959), dass die Informationen im Kurzzeitgedächtnis für weniger als 18 Sekunden aufrechterhalten werden. Diese Spanne ist allerdings nur korrekt, wenn die Probanden bereits viele Durchgänge der Trigramm-Präsentationen durchlaufen haben. Da nämlich während des Experimentes immer mehr Trigramme ins Langzeitgedächtnis übergehen, kommt es zu einer Interferenz zwischen den neuen Trigrammen und den im Langzeitgedächtnis gespeicherten, was sich in einem schnelleren Vergessen widerspiegelt (Keppel & Underwood, 1962). Das präzise Retentionsintervall des Kurzzeitgedächtnisses wird also durch die abgespeicherte Information im Langzeitgedächtnis beeinflusst. Wenn laut Atkinson & Shiffrin (1968) das Kurzzeitgedächtnis und das Langzeitgedächtnis zwei separate Systeme sein sollen, wie kann es dann zu einer solchen Interferenz kommen?

## Das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley & Hitch (1974)

Aufgrund solcher Diskrepanzen entwickelten Forscher im Laufe der Zeit aktuellere Theorien zum Kurzzeitgedächtnis. Da im Kurzzeitgedächtnis vorübergehend gespeicherte Informationen je nach Aufgabenstellung verändert werden können, etablierte sich der Begriff des Arbeitsgedächtnisses. Eines der prominentesten Modelle ist das Arbeitsgedächtnismodell von Alan D. Baddeley und Graham J. Hitch (Baddeley & Hitch, 1974). Sie nutzten den Begriff des Arbeitsgedächtnisses, da sie entgegen der Meinung von Atkinson & Shiffrin (1968) herausfanden, dass im Arbeitsgedächtnis mehrere Aufgaben unterschiedlichen Typs (z.B. das Verstehen komplexer Sätze und Rechnen) bearbeitet werden konnten. Mehrere Aufgaben desselben Typs jedoch führten zu Interferenzeffekten. Deshalb kamen Baddeley & Hitch (1974) zu der Behauptung, das Kurzzeitgedächtnis sei kein separates System, wie bei Atkinson & Shiffrin (1968), sondern ein Mehrkomponentensystem. Im Baddeley Modell des Arbeitsgedächtnisses gibt es zwei Sklavensysteme für die transiente Speicherung von Informationen, die phonologische Schleife und den räumlich-visuellen Notizblock (Baddeley, 1974).

## Die phonologische Schleife

Die phonologische Schleife dient der Speicherung und Transformation von auditorischer Information. Sprachliche Informationen werden dabei als phonologische Codes abgelegt. Die phonologische Schleife ist nochmals aufzutrennen in einen passiven Teil, den phonologischen Speicher, und einen aktiven artikulatorischen Kontrollprozess.

Mithilfe seiner Gedächtnisspannen-Experimente fand Baddeley (1975) heraus, dass die Kapazität der phonologischen Schleife der Menge an verbalem Input entspricht, welche ein Mensch in zwei Sekunden innerlich sprechen kann. Auch das Sprechen von  $7 \pm 2$  Informationseinheiten, also Buchstaben oder Ziffern („magische Zahl 7“; Miller, 1956), dauert erstaunlicherweise etwa zwei Sekunden. Baddeley (1975) hatte seinen Probanden auditorisch eine Liste mit entweder fünf einsilbigen Wörtern oder mit fünf mehrsilbigen

Wörtern präsentiert und diese von den Probanden reproduzieren lassen. Bei steigender Silbenanzahl sank die korrekte Wiedergabeleistung der Wörter (Wortlängeneffekt), aber die Versuchsteilnehmer konnten im Schnitt so viele Wörter wiedergeben, wie sie selbst in zwei Sekunden artikulieren konnten. Eine artikulatorische Suppression (Unterdrückung des inneren Sprechens) wurde bei einem weiteren Experiment hinzugefügt, indem die Probanden während der Präsentation der Wortliste andere beliebige Wörter laut sprechen mussten. Da die Prozesse der phonologischen Schleife dadurch gestört wurden, brach die Gedächtnisspanne der Versuchsteilnehmer drastisch ein. Durch das Artikulieren der Wörter wurde der artikulatorische Kontrollprozess in Anspruch genommen, sodass dessen ursprüngliche Aufgabe, nämlich das Enkodieren und Wiedergeben der Wortliste, nicht korrekt ausgeführt werden konnte.

#### Der räumlich-visuelle Notizblock

Der räumlich-visuelle Notizblock dient zur temporären Speicherung visueller Informationen und zum Erzeugen von Vorstellungen, dem sogenannten ‚mentalen Bild‘. Auch der räumlich-visuelle Notizblock ist aufzuteilen in ein Subsystem für Objektmerkmale (Farbe, Form, etc.) und ein Subsystem für räumliche Informationen, also wo ein Objekt zu verorten ist. Awh & Jonides (2001) fanden zum visuell-räumlichen Notizblock, dass man die Gedächtnisleistung für räumliche Informationen stark verbessern kann, wenn man die Aufmerksamkeit auf bestimmte räumliche Informationen lenkt (vgl. mit Cowan weiter unten im Text). Dieses Ergebnis stimmte auch mit den Beobachtungen des Sperling-Experimentes überein, bei dem mehr Buchstaben einer Matrix reproduziert werden konnten, wenn durch einen auditorischen Reiz bestimmt wurde, welcher Reihe Aufmerksamkeit zu schenken war.

#### Die zentrale Exekutive

Die beiden Sklavensysteme sind laut Baddeley (1974) keine separaten Systeme, denn zwischen ihnen findet eine ausgeprägte Interaktion statt. So hat jeder Mensch die natürliche Tendenz, visuell gezeigtes Material in einen phonologischen Code umzuwandeln, d.h. die Information kann von einem Sklavensystem ins andere übergehen. Versuche dazu zeigten, dass graphische Aufgaben von Probanden besser bearbeitet werden konnten, wenn sie währenddessen eine Lautfolge artikulierten, da damit verhindert wurde, dass der visuelle Stimulus in einen phonologischen Code umgewandelt und dieser somit nur im räumlich-visuellen Notizblock verarbeitet wurde (Brandimonte et al., 1992). Für solche Transformationen vom einen ins andere System ist laut Baddeley (1974) die zentrale Exekutive zuständig. Sie gilt als eine modalitätsunspezifische Kontrolleinheit, welche Aufmerksamkeitsprozesse steuern kann und die Verbindung zum Langzeitgedächtnis herstellt. Wenn ein Reiz ständig unverändert wahrgenommen wird, initiiert die zentrale Exekutive eine Habituation (Gewöhnung) und blendet ihn aus. Allerdings hat es sich als schwierig herausgestellt, die Mechanismen der zentralen Exekutive zu charakterisieren. Anatomisch lokalisiert ist die zentrale Exekutive in frontalen Arealen des Gehirns (Braver et al., 1997), denen allgemein die höheren geistigen Funktionen des Menschen zugeordnet werden. Auch Fuster vertrat die Ansicht, dass das Arbeitsgedächtnis ein anterior-posterior organisiertes Netzwerk ist, wobei anterior die Kontrolle der Reizverarbeitung und posterior die Reizpräsentation stattfindet (Fuster, 1997). Um zu erklären, warum man sich ‚sinnvolle‘ Informationseinheiten (engl. Chunks) besser merken kann als willkürliche Buchstabenkombinationen und um somit einem weiteren Kritikpunkt zu entgehen, hat Baddeley (2000)

eine weitere Komponente zu seinem Modell hinzugefügt: den episodischen Puffer. Da die zentrale Exekutive kein Speicher ist, kann sie auch keine Informationen aus dem Langzeitgedächtnis zwischenspeichern, um durch das Hintergrundwissen die Buchstabenkombinationen als ‚Chunks‘ wahrzunehmen. Dieses Speichern übernimmt der episodische Puffer, welcher auch von der zentralen Exekutive kontrolliert wird. Dadurch, dass man im Langzeitgedächtnis z.B. die Buchstabenkombination EZB mit der Bedeutung Europäische Zentralbank abgespeichert hat und diese Verbindung im episodischen Puffer repräsentiert wird, kann man sich diese Buchstabenfolge besser merken als eine andere ohne Bedeutung (Effekt des ‚Chunkings‘).

#### Das Arbeitsgedächtnismodell von Cowan (1997)

Während Baddeley den Schwerpunkt seines Modells auf die modulare Struktur des Arbeitsgedächtnisses legt, betrachtet Nelson Cowan in seinem Embedded-Process-Modell (Modell der eingebetteten Prozesse) aus dem Jahr 1997 vor allem die Funktion des Arbeitsgedächtnisses. Für ihn besteht das Arbeitsgedächtnis aus aktivierten Teilen des Langzeitgedächtnisses, welche dadurch für die Lösung bestimmter Aufgabenstellungen greifbar gemacht werden. Neurologischer Beweis dafür ist, dass Stimuli, die im Arbeitsgedächtnis aufrechterhalten werden, Aktivität in kortikalen Arealen zeigen, welche eigentlich für die Perzeption der Stimuli zuständig sind. Dadurch werden daraufhin die Langzeiteinträge dieser Reize aktiviert. Cowan (1997) war der Ansicht, dass ein ‚mentaler Scheinwerfer der Aufmerksamkeit‘ auf bestimmte aktivierte Elemente verschoben werden kann, die dann weiterverarbeitet werden können. Deshalb sind während Arbeitsgedächtnisprozessen Areale des Hirns aktiv, die für Aufmerksamkeitsprozesse zuständig sind (Fan et al., 2005). Laut Cowan (1997) besteht das Arbeitsgedächtnis aber nicht nur aus denjenigen aktivierten Elementen, auf denen die Aufmerksamkeit liegt, sondern aus allen aktivierten Elementen. Außerdem war er der Meinung, dass das Arbeitsgedächtnis nicht nur externe Reize braucht, sondern auch top-down, also allein durch interne Vorstellung aktiviert werden kann. Jedoch stört das Wahrnehmen beliebiger visueller Reize die Vorstellungsbildung und andersherum (Quinn & McConnell, 2006). Da durch bildgebende Verfahren während des Vorstellens temporär neuronale Aktivität in frühen visuellen Arealen zu sehen war, lag die Vermutung nahe, dass die Vorstellungsbildung durch einen speziellen Zustand einiger Komponenten des visuellen Netzwerks erzeugt werden (Kosslyn, 2005). Allerdings ist es bis heute eine umstrittene Frage, was Vorstellungsbildung und die Repräsentation von visuellen Informationen im visuellen Arbeitsgedächtnis unterscheidet. Wie Atkinson & Shiffrin (1986) vertrat Cowan (1997) die Meinung, dass die eingehenden Informationen in einen kurzlebigen sensorischen Speicher übergehen. Auch Merikles Ansicht (Merikle, 1980), dass dieser Speicher in eine reine sensorische Phase und eine Phase, in der bereits konzeptuelle Merkmale eines Stimulus repräsentiert sind, aufzuteilen wäre, stimmte er zu. Mit Baddeleys Modell (1974) war er sich in der Existenz der zentralen Exekutive einig, die willentliche Prozesse steuert und seiner Meinung nach Erinnerungen und Vorstellungen erzeugt. Cowan (1997) war der Meinung, dass Informationen verschiedener Typen in den jeweiligen neuronalen Strukturen repräsentiert werden. Deshalb kam es in seinem Modell allein wegen des Aufbaus des Gehirns und seiner neuronalen Strukturen zu keiner Interferenz bei verschiedenartigen Informationen (z.B. visuell und auditorisch). Stimuli desselben Typs jedoch konkurrieren um dieselben neuronalen Strukturen. Im Fokus der Aufmerksamkeit können laut Cowan drei bis vier Elemente gleichzeitig persistieren, bis die neuronale

Kapazität ausgeschöpft ist. Diese Zahl wurde von zahlreichen weiteren Forschern bestätigt (z.B. Irwin & Andrews, 1996), die häufig ‚change detection‘ Aufgaben verwendeten, um die Limitation des Arbeitsgedächtnisses zu untersuchen. In diesen Aufgaben wurden den Probanden nacheinander fast gleiche Bilder gezeigt, wobei zwischen der Präsentation der Bilder eine kurze Verzögerung eingebaut wurde. Sogar große Veränderungen zwischen den beiden Bildern wurden häufig nicht wahrgenommen, wenn der Blickfokus nicht genau auf die veränderten Stellen gerichtet war. Dabei spricht man von dem Phänomen der Veränderungsblindheit (engl. change blindness: Simons, 2000; Simons & Levin, 1997).

### Die moderne Auffassung des Arbeitsgedächtnisses

Dass das Arbeitsgedächtnis in denselben neuronalen Netzwerken wie das Langzeitgedächtnis lokalisiert ist, gilt nach heutiger Sicht als eine plausible Annahme (Fuster & Bressler, 2012). Allerdings gelten heute Millers oder Cowans Ansichten, die Arbeitsgedächtniskapazität sei auf eine feste Anzahl von Informationseinheiten beschränkt (Millers ‚magische Zahl 7‘, Miller, 1956; Cowan, 1997), als überholt. Es wird angenommen, dass die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses flexibel über die gehaltenen Informationen verteilt werden kann (z.B. van den Berg et al., 2012). Dabei spielt, im Hinblick auf die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, nicht die Anzahl an Objekten eine Rolle, sondern die Qualität oder Präzision, mit der die Objekte gehalten werden. Die Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses können also ungleich verteilt werden, sodass Objekte mit höherer Priorität mit höherer Präzision gespeichert werden als Objekte mit niedrigerer Priorität (Bays et al., 2009). Der präzisere Abruf resultiert dabei aus geringerem Rauschen in der Repräsentation des Objektes. Die Ressourcen-Modelle des Arbeitsgedächtnisses (z.B. Wilken & Ma, 2004) basieren nämlich auf zwei Prämissen. Erstens werden Repräsentationen von sensorischen Stimuli durch Rauschen (zufällige, unvorhersehbare Schwankungen) beeinflusst. Zweitens nimmt das Rauschen mit der Anzahl an Stimuli im Arbeitsgedächtnis zu. Da das Medium für Repräsentationen zwischen den gehaltenen Objekten aufgeteilt wird, ist desto weniger Kapazität für Rauschen vorhanden, je mehr Ressourcen für das präzise Memorieren eines Stimulus verwendet werden.

In den letzten Jahren ist außerdem das Interesse daran, den Zusammenhang zwischen Arbeitsgedächtnis und fluider Intelligenz zu identifizieren, stark gewachsen. Fluide Intelligenz ist die komplexe kognitive Fähigkeit eines Menschen, sein Denken und Handeln gegenüber neuen Aufgaben oder Situationen flexibel anzupassen (Cattell, 1971). Lange dachte man, die fluide Intelligenz sei ausschließlich genetisch bedingt und könne nicht durch Training o.ä. beeinflusst werden. Von der fluiden Intelligenz wird die Summe von all dem, was ein Mensch während seines Lebens erlernt, unterschieden und kristalline Intelligenz genannt (Zweikomponententheorie, Cattell, 1971). Trotzdem wird nach Arbeitsgedächtnis-Tests gesucht, die die fluide Intelligenz verbessern sollen. Tatsächlich wurde bereits herausgefunden, dass die fluide Intelligenz mithilfe von regelmäßigem Training von Arbeitsgedächtnistests, wie dem ‚dual n-back‘-Test, verbessert werden konnte (z.B. Jaeggi et al., 2008).

Das Arbeitsgedächtnis ist eine schwer definierbare Komponente des Gedächtnisses. Es ist ein kognitiver Prozess, der menschliches Verhalten, wie Wahrnehmung, Problemlösung oder Aufmerksamkeitskontrolle steuert und mit der fluiden Intelligenz zusammenzuhängen scheint (Ma et al., 2014).

## Zusammenhang zwischen dem Arbeitsgedächtnis und Decision making (dt. Verhaltensausswahl)

Der Zusammenhang zwischen Arbeitsgedächtnis und ausgeführtem Verhalten kann u.a. durch ‚comparative visual search‘ (CVS) Aufgaben (dt.: vergleichende visuelle Suchaufgabe; Pomplun et al., 2001) untersucht werden. Die Probanden werden bei CVS-Aufgaben dazu aufgefordert, zwei Spalten mit Symbolen zu vergleichen und die eingebauten Unterschiede zwischen beiden zu finden. Hardiess, Gillner & Mallot (2008) führten anhand der CVS-Aufgabe eine Blickbewegungsstudie durch. Sie wollten den Trade-off (dt. Kostenabwägung) zwischen den Blickwechsln zwischen den Spalten (die verglichen werden sollten) und der Gedächtnisnutzung zum Memorieren der Objekte erforschen. Als Stimulus verwendeten Hardiess et al. (2008) zwei auf einem großflächigen, gekrümmten Projektionsschirm dargestellte (virtuelle) Regale, welche über vier Regalböden hinweg mit geometrischen, farbigen Objekten gefüllt waren. Der Proband saß mittig vor dem Projektionsschirm und sollte Unterschiede zwischen den geometrischen Objekten in dem rechten und den Objekten in dem linken Regal finden. Die Regale wurden durch vier verschiedene Abstände separiert, um die Kosten für die Blickwechsel (Akquisition) zu manipulieren.

Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass bei größerem Abstand zwischen den Regalen der Anteil an Blickwechsln abnahm und eine Verschiebung des Trade-offs hin zu erhöhter Gedächtnisnutzung stattfand. Dabei stiegen bei erhöhter Verarbeitungszeit und somit steigender Anzahl an gespeicherten Informationen im Arbeitsgedächtnis zwar die Kosten für die Memorisierung, durch weniger Blickwechsel zwischen den Regalen sanken jedoch die Kosten für das Akquisitionsverhalten wieder und es kam zu einem Ausgleich zwischen den Parametern mit möglichst geringen Gesamtkosten.

Um den Trade-off zwischen der Akquisitions- und der Memorisierungsstrategie ausführlicher zu untersuchen, führten Hardiess, Basten & Mallot (2011) die ‚block-copying‘ - Experimente von Ballard et al. (1995) und Hayhoe et al. (1998) weiter. In der Studie von Hardiess et al. (2011) sollten die Probanden Muster aus quadratischen Steinen (in sechs verschiedenen Farben) von einem Modellbereich in einen Arbeitsplatz kopieren, wobei die benötigten Steine in einem Ressourcenbereich gelagert waren. Die drei Bereiche waren an den Ecken eines gleichseitigen Dreieckes in einem Versuchsraum aufgebaut. Der Abstand zwischen den Bereichen war entweder ‚nah‘ oder ‚fern‘. Mithilfe dieser Abstände, die nun durch Laufen und nicht mehr über Blickwechsel am Computerbildschirm (vgl. Hardiess et al. (2008), Ballard et al. (1995), Hayhoe et al. (1998)), überbeschriftet werden mussten, manipulierten Hardiess et al. (2011) die Kosten für das Akquisitionsverhalten. Außerdem erzeugten sie verschiedene Memorisierungskosten, da die Muster entweder ‚leicht‘ (geringere Memorisierungskosten) oder ‚komplex‘ (höhere Memorisierungskosten) waren.

Da die Kosten für körperliche Bewegung beim Akquisitionsverhalten sehr hoch waren, war in dem Experiment generell ein höherer Anteil an Gedächtnisleistung zu messen als in Ballards (1995) Experiment, wo nur Blickwechsel die resultierenden Kosten verursachten. Der Trade-off verschob sich allgemein also in Richtung Memorisierungsstrategie. Außerdem wurde deutlich, dass die komplexen Muster mehr und längere Besuche des Modellbereichs brauchten, um sie im Gedächtnis zu enkodieren. Längere und häufigere Besuche am Modell führten also zu einer erhöhten Gedächtnisleistung.

Hardiess & Mallot (submitted) führten eine weitere Studie durch, in der sie erneut die CVS-Aufgabe verwendeten. Diesmal sollten die Spalten jedoch am Computerbildschirm verglichen werden. Die Kosten für Akquisition und Memorisierung konnten dabei leicht manipuliert werden. Über einer der beiden Spalte befand sich stets eine graue Maske, die diese Spalte verdeckte. Durch Klicken mit der Computermaus konnte diese Maske verschoben werden. Die Kosten für die Akquisition konnten manipuliert werden, indem die Maske nicht sofort zur jeweils anderen Spalte wechselte, sondern erst nach einer bestimmten Verzögerung. Die Kosten für die Memorisierung wurden dadurch manipuliert, dass entweder einfache oder komplexe Objekte zu vergleichen waren.

Erneut bestätigte sich die Hypothese, dass sich der Trade-off hin zur Memorisierung verschiebt, wenn die Kosten für die Akquisition steigen und umgekehrt. Da alle Probanden alle Versuchsbedingungen durchliefen, konnte die Studie als ‚within-subject Design‘ durchgeführt werden. Interessanterweise fanden Hardiess & Mallot (submitted) heraus, dass jeder Proband seinen individuellen Trade-off-Bereich hatte. Beispielsweise präferierten manche Probanden über alle Versuchsbedingungen hinweg stark die Memorisierungsstrategie, andere die Akquisitionsstrategie.

Doch warum bevorzugt ein Mensch die eine oder die andere Strategie? Inwiefern wird dieses Verhalten vom Arbeitsgedächtnis oder einzelnen Arbeitsgedächtnis-Prozessen beeinflusst? Gibt es Tests zum Arbeitsgedächtnis, deren Ergebnisse vorhersagen können, ob ein Proband die Memorisierungs- oder die Akquisitionsstrategie präferiert?

Das vorliegende Experiment sollte diese Fragen untersuchen. Dazu wurden vor der CVS-Aufgabe, die genauso aufgebaut war, wie bei Hardiess & Mallot (submitted), Vorversuche durchgeführt, die verschiedene Bereiche und Funktionen des Arbeitsgedächtnisses abdecken sollten. Anschließend wurde überprüft, ob es aufschlussreiche Korrelationen zwischen den Vorversuchen und dem Hauptversuch gab.

## 2. MATERIAL & METHODEN

Als Probanden für die Studie stellten sich 15 Freunde und Bekannte zwischen 21 und 31 Jahren zur Verfügung. Sieben davon waren Männer, acht Frauen. Alle Probanden waren gegenüber dem Ablauf und der Zielsetzung des Versuchs naiv und hatten eine normale oder korrigierte Sehkraft.

Die Studie bestand aus drei Vorversuchen und einem Hauptversuch. Jeder der 15 Probanden durchlief alle Versuchsteile (within-subject oder repeated measures Design). Für den gesamten Versuchsablauf wurde ein PC (3.1 GHz) mit MATLAB® (MathWorks Ltd) verwendet. Die Experimentsoftware beinhaltete die Psychophysics Toolbox (3.0) Erweiterung. Die Stimuli der vier Teilversuche wurden auf einem Samsung SyncMaster 931BF Monitor (19“, 1280x1024 Pixel, 60 Hz) gezeigt, welcher von der Intel®HD Graphics 2000 Grafikkarte des Computers angesteuert wurde. Die Probanden saßen mittig vor dem Bildschirm (Abstand ca. 60 cm) während die Stimuli in einem schwach beleuchteten Raum präsentiert wurden.

### 2.1 Vorversuche

Vor dem Hauptversuch wurden folgende drei Vorversuche nacheinander durchgeführt: Corsi-Test, Operation Span-Test und n-back-Test. Die Vorversuche wurden aus zahlreichen Arbeitsgedächtnis-Tests herausgesucht, um verschiedene Bereiche und Funktionen des Arbeitsgedächtnisses abzudecken. Die Reihenfolge der Vorversuche war randomisiert.

#### 2.1.1 Corsi-Test

Im Corsi-Test (Corsi, 1973; vom Betreuer programmiert und zur Verfügung gestellt) wurden auf dem Bildschirm bis zu zehn unregelmäßig verteilte Quadrate nacheinander markiert und die Probanden dazu aufgefordert, sich die korrekte Reihenfolge der markierten Quadrate zu merken und später (durch Anklicken mit der Computermaus) wiederzugeben (siehe Abbildung 1). Die Markierung eines Quadrats dauerte 1 s, die Zeit zwischen zwei Markierungen betrug 1 s. Nachdem alle Quadrate markiert wurden, verging 1 s bis die Quadrate mit der Maus angeklickt werden konnten. Vor jedem Durchgang erschien für 3 s ein Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Beim ersten Durchgang wurden drei Quadrate markiert. Pro Durchgang gab es drei Wiederholungen. Konnten die Probanden die Sequenz der Quadrate bei mindestens einer der drei Wiederholungen korrekt wiedergeben, kam in der nächsten zu merkenden Sequenz ein Quadrat dazu, usw. War die Wiedergabe aller drei Sequenzen einer Stufe fehlerhaft, wurde der Corsi-Test abgebrochen. Im Anschluss an den Test wurde per MATLAB® die abhängige Variable des ‚Corsi Span‘ berechnet und ausgegeben. Der Test dauerte durchschnittlich etwa 7 min.

Der Corsi-Test misst im Arbeitsgedächtnis die passive räumliche Kapazität bezüglich der Aufnahme, Speicherung und dem Abruf von Stimulus-Sequenzen.

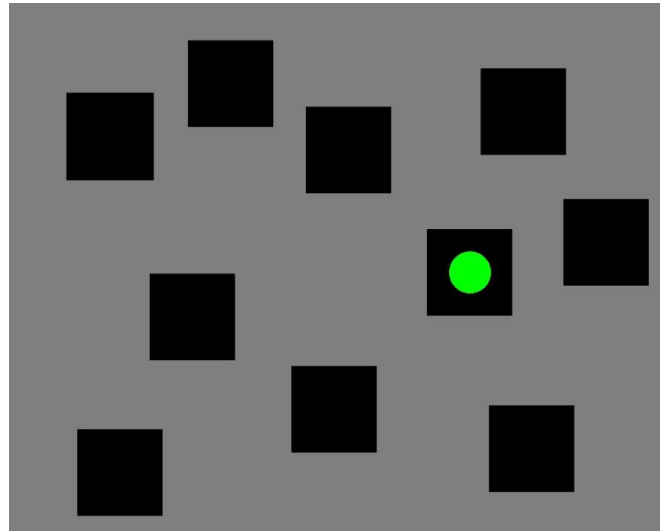


Abbildung 1: Corsi-Test: Auf dem Bildschirm erscheinen zehn Quadrate, die nacheinander, zufällig markiert werden. In der ersten Runde werden drei Quadrate markiert, dann vier, usw. Die Aufgabe des Probanden ist es, die Quadrate in der korrekten Reihenfolge mithilfe der Computermaus anzuklicken.

### 2.1.2 Operation Span-Test

Beim Operation Span-Test (Turner & Engle, 1989; Lewandowsky et al., 2010) wurden den Probanden Rechenaufgaben mit Ergebnis gezeigt, zu denen sie mithilfe von Computertasten angeben mussten, ob das Ergebnis richtig oder falsch ist. Nach jeder Rechenaufgabe erschien ein Buchstabe, der sich gemerkt werden musste. Die Rechenaufgabe erschien maximal 3 s lang auf dem Bildschirm, oder verschwand, sobald die Probanden mithilfe der Computertasten eine Antwort gaben. Nach 0,1 s folgte der zu merkende Buchstabe für 1 s. Nach 0,5 s erschien dann die nächste Rechenaufgabe.

Nach vier (leicht) bis acht (schwer) Rechenaufgaben erschienen Fragezeichen, die durch die korrekte Reihenfolge an zuvor gemerkten (vier - acht) Buchstaben ersetzt werden mussten, indem die Buchstaben über die Computertastatur eingegeben wurden. Der Buchstabe war für 0,2 s sichtbar. Das folgende Fragezeichen erschien, sobald die Probanden einen Buchstaben eingegeben hatten. Jede Anzahl an Rechenaufgaben und damit an zu merkenden Buchstaben, wurde drei Mal wiederholt. Insgesamt hatte jeder Proband also 15 Versuchsdurchgänge zu absolvieren, die randomisiert dargeboten wurden. Nach jeweils drei Durchgängen hatten die Probanden die Möglichkeit, eine Pause zu machen, bevor sie mithilfe der Leertaste den nächsten Durchgangsblock starteten. Vor dem Versuch durchliefen die Probanden drei Probedurchgänge, einen mit drei, einen mit vier und einen mit fünf zu merkenden Buchstaben. Mit der Leertaste wurde dann der eigentliche Versuch gestartet. Dieser dauerte im Mittel etwa zehn Minuten.

Der Operation Span-Test, als eine Form des Complex Span-Tests, vereint eine Gedächtnisaufgabe (das Merken der Buchstaben) mit einer sekundären Verarbeitungsaufgabe (die Entscheidung, ob die Rechenaufgabe richtig oder falsch ist). Die im Arbeitsgedächtnis gehaltenen Informationen werden also nicht nur, wie beim n-back-Test, durch weitere Buchstaben ständig erneuert, sondern auch gestört (Interferenz), indem zusätzlich eine Rechenaufgabe prozessiert werden muss. Der Operation Span-Test erfordert also auch die aktive Aufmerksamkeitskontrolle auf die zu memorierenden Buchstaben. Er war der komplexeste und schwierigste der drei Vorversuche.



### Abhängige Variable

Die für diesen Versuch relevante abhängige Variable war der Operation Span. Mithilfe von MATLAB® wurde protokolliert, welche Buchstaben die Probanden gedrückt haben. Durch den Vergleich der von den Probanden gedrückten Buchstaben mit der korrekten Reihenfolge der Buchstaben konnte ermittelt werden, wie viel Prozent an Buchstaben per Buchstabenfolge richtig wiedergegeben wurden. Um zu berücksichtigen, dass die Schwierigkeit, sich die Buchstaben korrekt zu merken, mit zunehmender Anzahl an Buchstaben steigt, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Buchstabenfolgen wie folgt gewichtet:

$$\begin{aligned} & \% \text{ an korrekt wiedergegebenen Buchstaben (4er-Folge) } \times 4/8 \\ + & \% \text{ an korrekt wiedergegebenen Buchstaben (5er-Folge) } \times 5/8 \\ + & \% \text{ an korrekt wiedergegebenen Buchstaben (6er-Folge) } \times 6/8 \\ + & \% \text{ an korrekt wiedergegebenen Buchstaben (7er-Folge) } \times 7/8 \\ + & \% \text{ an korrekt wiedergegebenen Buchstaben (8er-Folge) } \times 8/8 \end{aligned}$$

---

Aus den Ergebnissen wurde der Mittelwert und somit der Operation Span berechnet.

### 2.1.3 N-back-Test

Der n-back-Test (Kirchner, 1958; Penaranda, 2011) steigerte sich von einem 1-back- über einen 2-back- hin zu einem 3-back-Test. Es wurde jeweils ein Buchstabe nacheinander aus einer Sequenz von 50 Buchstaben in der Mitte des Computerbildschirms für 0,5 s gezeigt. Bei jedem Buchstabe mussten die Probanden mithilfe von Computertasten angeben, ob der ihnen präsentierte Buchstabe mit dem Buchstaben übereinstimmte, der n Schritte vorher in der Sequenz von Buchstaben gezeigt wurde, oder nicht. Z.B. wurde die Abfolge F-G-E-R-T-E-W-Q-X-P präsentiert. Bei dem fett markierten Buchstaben (E) hätte der Proband bei einem 3-back-Test die Computertaste für ‚ja‘ (der Buchstabe stimmt mit dem Buchstaben n Schritte zuvor überein) drücken müssen, da drei Schritte vorher ebenso ein E gezeigt wurde. Bei den anderen Buchstaben hätte er die Taste für ‚nein‘ (der Buchstabe stimmt nicht mit dem Buchstaben n Schritte zuvor überein) drücken müssen. Dazu hatten die Probanden 2 s Zeit. Bis dann der nächste Buchstabe erschien, verging 1 s. Vor Beginn des Tests wurde ein Probedurchgang in Form eines 1-back-Tests gemacht. Durch Drücken einer beliebigen Taste konnte der Proband jeweils den 1-back-, 2-back- und 3-back-Test starten. Während des Tests wurde den Probanden mit einem grünen Haken angezeigt, wenn ihre Antwort richtig war und mit einem roten Kreuz angezeigt, wenn sie falsch lagen. Pro n-back-Test wurden 50 Buchstaben gezeigt. Die Gesamtdauer aller drei n-back Tests betrug etwa 10 min.

Der n-back-Test gibt Aufschluss über die Fähigkeit, memorierte Information zu erneuern und zu manipulieren. Außerdem erfordert der n-back-Test die Kontrolle, seine Aufmerksamkeit

auf die zu vergleichenden Buchstaben zu lenken. Er gilt somit als ein aktiver Arbeitsgedächtnis-Test.

### *Abhängige Variable*

Die abhängige Variable des n-back-Tests war  $d'$  (d-prime, Signaldetektionstheorie). Mithilfe von MATLAB® wurde aufgezeichnet, ob die Probanden ‚ja‘ oder ‚nein‘ drückten. Beim Vergleich mit der Liste, in der die richtigen Antworten notiert waren, konnte ermittelt werden, ob die Probanden einen Buchstaben korrekt identifizierten (HIT), ob sie diesen nicht identifizierten (MISS), ob sie ‚ja‘ drückten, obwohl n Schritte zuvor nicht der gleiche Buchstabe erschienen war (FALSE ALARM) oder ob sie korrekt erkannten, dass der gezeigte Buchstabe nicht n Schritte zuvor erschienen war (CORRECT REJECTION). Drückten die Probanden gar keine Taste und gaben somit keine Antwort, wurde dieser Fall als MISS gewertet.

Der  $d'$  wurde für den 1-back-, den 2-back- und den 3-back-Test separat berechnet und anschließend mithilfe von verschiedenen Gewichtungen zum  $d'$ (gesamt) zusammengefasst (siehe Formel unten). Pro n-back-Test wurde zuerst die HIT-Rate berechnet, indem die Anzahl an HITS durch die Anzahl aller mit ‚ja‘ angegebenen Antworten (HITS+MISS) geteilt wurde. Anschließend wurde die FALSE ALARM-Rate berechnet. Dazu wurden die FALSE ALARMS durch die Anzahl aller mit ‚nein‘ angegebenen Antworten (FALSE ALARM+CORRECT REJECTION) geteilt. Beide Raten wurden dann über die z-Verteilung normiert. Der  $d'$  pro n-back-Test berechnete sich durch die Subtraktion der normierten FALSE ALARM-Rate von der normierten HIT-Rate ( $d' = z(\text{HIT}) - z(\text{FALSE ALARM})$ ); Wickens, 2002). Nachdem der  $d'$  für den 1-back-, den 2-back- und den 3-back-Test berechnet wurde, konnte daraus der  $d'$ (gesamt) wie folgt ermittelt werden:

$$d'(\text{gesamt}) = (d'(1) + d'(2)*2 + d'(3)*3) / 6$$

## 2.2 Hauptversuch

Eine comparative visual search (CVS) Aufgabe (dt.: vergleichende visuelle Suchaufgabe) diente als Hauptversuch. Der Programmiercode der CVS-Aufgabe wurde vom Betreuer zur Verfügung gestellt. Jeder Stimulus der CVS-Aufgabe bestand aus zwei auf dem Computerbildschirm gezeigten Spalten, welche 24° voneinander entfernt waren und jeweils 24 Symbole in randomisierter Reihenfolge enthielten (siehe Abbildung 2). Die Aufgabe der Probanden bestand darin, beide Spalten miteinander zu vergleichen und die Anzahl an Unterschieden (1 oder 2, siehe unten) zu berichten. Dabei sollten sie so zügig und so korrekt wie möglich vorgehen. Die Stimulusbilder wurden zuvor mit Adobe®Photoshop®7.0.1 hergestellt und nach Transformation in MATLAB®-kompatible Dateien in MATLAB® eingelesen und dem Probanden auf dem Monitor präsentiert. Um die Memorisierungskosten zu manipulieren, wurden zwei Arten von Symbolen verwendet. Zum einen kamen Farbkreise (genannt Farbe; rot, grün, blau, schwarz; Ø 10 Pixel) für geringe Kosten und zum anderen Silhouetten von Tieren (genannt Form; Elch, Hund, Kamel, Kuh; alle mit dem Kopf nach links ausgerichtet; Ø 30 Pixel) für hohe Kosten zum Einsatz (Abbildung 2). Die Symbole der zwei Spalten unterschieden sich an einer oder zwei der 24 Stellen. Die Anzahl an maximalen Unterschieden (zwei Unterschiede) wurde den Probanden genannt, damit sie das Absuchen des Stimulusbildes nicht vorzeitig abbrechen, sobald sie einen Fehler fanden. Während jedes Durchgangs war eine graue Maske präsent, die entweder die linke oder die rechte

Spalte komplett verdeckte (zu Beginn jedes Durchganges war die rechte Spalte verdeckt). Über der Maske waren schwarze Linien zwischen den Symbolen der linken und rechten Spalte jeder Zeile zu sehen, die halfen den Blick zwischen den Symbolpaaren zu leiten (Abbildung 2). Durch Klicken der linken oder rechten Maustaste konnte die Maske von den Probanden auf die linke oder rechte Spalte verschoben werden. Die Probanden konnten die Maske so oft verschieben, wie sie wollten. Um die Akquisitionskosten zu manipulieren, wurde in jedem Durchgang eine von drei Verzögerungen der Maske verwendet. Die Verzögerung der Maske (bis die Maske nach dem Mausklick von der einen zur anderen Spalte verschoben wurde), betrug 0,0, 0,5 oder 1,0 Sekunden. Während der Verzögerungszeit waren beide Spalten durch die Maske verdeckt, nur die schwarzen Linien zwischen den Symbolen einer Reihe waren sichtbar. Der Hauptversuch wurde als within-subject Design durchgeführt, indem jeder Proband insgesamt 36 Durchgänge in randomisierter Reihenfolge (2 Symbolbedingungen x 3 Verzögerungsbedingungen x 6 Wiederholungen) absolvierte.

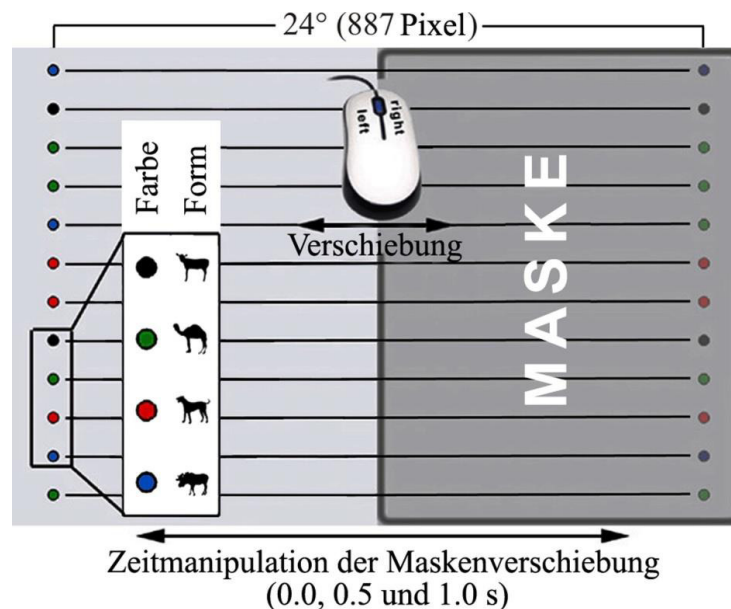


Abbildung 2: Aufbau Hauptversuch: Ein Stimulusbild bestand aus zwei Spalten mit je 24 Symbolen (nur 12 in der Abbildung gezeigt). Die Symbole waren entweder Farbkreise (Farbe) oder Tiersilhouetten (Form). Die graue Maske bedeckte immer eine Spalte und konnte mithilfe von Mausklicks auf die jeweils andere Spalte verschoben werden. Die Maskenverschiebung wurde immer durch eine von drei Verzögerungsbedingungen (0,0, 0,5 und 1,0 s) manipuliert. Während dieser Verzögerungszeit waren beide Spalten bedeckt und nur die schwarzen Linien waren sichtbar.

### 2.2.1 Versuchsablauf

Die Probanden wurden dazu aufgefordert, die CVS-Aufgabe so zügig und so genau wie möglich durchzuführen. Sie sollten die beiden Spalten vergleichen und die Anzahl an Unterschieden zwischen den Symbolen zwischen den zwei Spalten nennen. Die Antwort wurde vom Versuchsleiter protokolliert. Nachdem sie einen Durchgang beendet hatten, drückten sie die Leertaste. Der nächste Durchgang startete automatisch nachdem auf grauem Hintergrund ein Fixationskreuz für 3 s in der Mitte des Bildschirms gezeigt wurde.

Bevor der Hauptversuch gestartet wurde, mussten die Probanden die schriftliche Versuchsanleitung durchlesen (siehe Anhang). Danach absolvierten sie sechs Probedurchgänge. Drei Durchgänge mit je einem Unterschied zwischen den Symbolen der beiden Spalten (ein Durchgang mit 0,0 s, ein weiterer mit 0,5 s und ein letzter mit 1,0 s Verzögerung) und drei Durchgänge mit je zwei Unterschieden und allen drei Verzögerungszeiten wurden durchgeführt. Der Hauptversuch startete nach den Probedurchgängen durch Präsentation des ersten von 36 Stimuli. Nach 18 Durchgängen hatten die Probanden die Möglichkeit, eine Pause zu machen, bevor sie die restlichen 18 Durchgänge absolvierten. Um zu verhindern, dass die Probanden die visuellen Stimuli (Farbe oder Form) durch verbale Wiederholungsprozesse (verbal rehearsal) aufrechterhielten und so die Memorisierungsleistung im Arbeitsgedächtnis beeinflussten, wurde das Prinzip der artikulatorischen Suppression angewendet. Die Probanden mussten während der kompletten 36 Durchgänge die Silben ‚LA-LE-LU‘ laut vor sich hersagen. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Stimuli nur visuell verarbeitet und memoriert wurden.

### 2.2.2 Abhängige Variablen

Im Hauptversuch wurden die Trialdauer (Zeit, die für einen Durchgang benötigt wurde), die Anzahl der Blickwechsel und die mittlere Verweildauer innerhalb einer Spalte aufgezeichnet. Im Hinblick auf den zu untersuchenden Trade-off waren die Anzahl der Blickwechsel (Anzahl an Mausklicks oder Maskenverschiebungen zwischen den Spalten) und die Verweildauer (Zeit innerhalb einer Spalte, bis die Maske verschoben wurde) die wichtigsten Variablen. Die Anzahl der Blickwechsel wurde durch die Anzahl an Mausklicks, um die Maske zu verschieben, gemessen und spiegelte die Verwendung oder den Einsatz der Akquisitionsstrategie wider. Die Verweildauer als die gemittelte Zeit zwischen zwei Mausklicks (abzüglich der jeweiligen Verzögerungszeit der Maske) berechnet und spiegelte die Verwendung der Memorisierungsstrategie wider. Als weitere Größe wurde die Fehlerrate berechnet. Diese wurde durch den Anteil an falsch genannten Unterschieden zwischen den Spalten pro 36 Durchgänge berechnet.

### 2.3 Statistische Analyse

Die statistische Analyse der Effekte der Bedingungen auf die Variablen wurde mit IBM® SPSS® Statistics (Version 22) durchgeführt. Aufgrund des within-subject Designs wurden alle hier gezeigten ANOVAs als mehrfaktorielle ANOVAs mit Messwiederholung ausgeführt. Nur der Einfluss der Verzögerung auf die Fehlerrate wurde anhand einer Friedman-ANOVA untersucht, da die Daten nicht normalverteilt waren. Die Korrelationen wurden als Spearman-Korrelationen analysiert, da dieser Test robust gegenüber Ausreißern ist. Alle Post-hoc Analysen wurden mit Bonferroni korrigierten  $\alpha$ -Werten durchgeführt. Die Ergebnisse der Post-hoc Vergleiche sind in den entsprechenden Diagrammen mit den üblichen Signifikanzleveln dargestellt (ohne Markierung: n.s.; \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ ). Die Fehlerbalken in den Diagrammen zeigen den Standardfehler des Mittelwerts (SEM).

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Ergebnisse Hauptversuch

Zuerst sollen die Ergebnisse des Hauptversuches allein gezeigt werden. Später werden diese dann mit den Ergebnissen der Vorversuche durch Korrelationen verglichen.

##### 3.1.1 Fehlerrate

Die Fehlerrate wurde ermittelt, indem die Anzahl an Fehlern (Übersehen eines Unterschieds zwischen den Symbolen der zwei Spalten oder Unterschied angeben, obwohl keiner existierte) prozentual für alle 36 Durchgänge berechnet wurde. Bei der Analyse des Effekts der Verzögerung und des Symboltyps auf die Fehlerrate wurde zwischen der Art von Fehler (ein oder zwei Unterschiede zwischen den Spalten) nicht differenziert. Insgesamt zeigten die Probanden sehr gute Leistungen beim Finden der Unterschiede. Bei allen drei Verzögerungsbedingungen lag der Prozentsatz an Fehlern beim Symboltyp Form durchschnittlich unter 6%, bei dem Symboltyp Farbe bei nur etwa 1% (siehe Abbildung 3). Die Friedman-ANOVA zeigte einen signifikanten Einfluss der Verzögerung ( $\chi^2 = 20,16$ ,  $p < 0,001$ ) und des Symboltyps Form ( $\chi^2 = 13,17$ ,  $p < 0,01$ ) auf die Fehlerrate. Der paarweise Vergleich zwischen den Verzögerungsbedingungen der Symboltypen zeigte Signifikanzen beim Symboltyp Form zwischen der Verzögerung von 0,0 und 1,0 Sekunde ( $p < 0,001$ ) und zwischen der Verzögerung von 0,5 und 1,0 Sekunde ( $p < 0,05$ ).

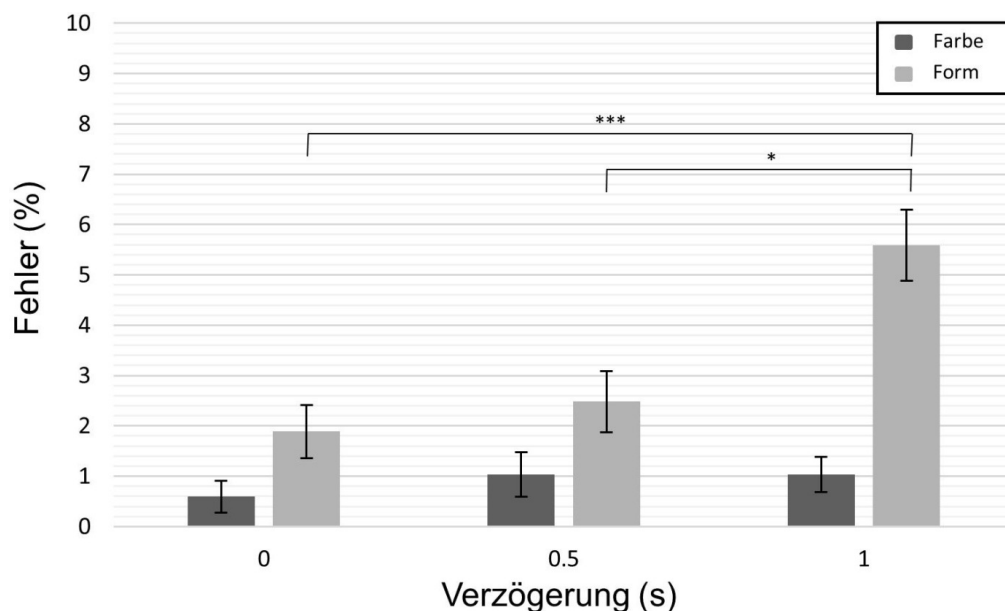


Abbildung 3: Prozentualer Anteil an Fehlern im Hauptversuch gemittelt über alle Probanden für alle Versuchsbedingungen.

### 3.1.2 Trialdauer

Für die Berechnung der Trialdauer wurde die Zeit, die die Probanden brauchten, um einen Durchgang zu absolvieren, gemittelt (siehe Abbildung 4). Bei der zwei-faktoriellen ANOVA dienten der Symboltyp (Farbe und Form) und die Verzögerung (0,0, 0,5 und 1,0 s) als Faktoren. Der Symboltyp zeigte einen signifikanten Effekt auf die Trialdauer ( $F = 84,69$ ,  $p < 0,001$ , Effektstärke:  $\eta_p^2 = 0,86$ ), während die Verzögerung ( $F = 0,12$ ,  $p = 0,895$ ,  $\eta_p^2 = 0,01$ ) und die Interaktion der Faktoren ( $F = 2,07$ ,  $p = 0,159$ ,  $\eta_p^2 = 0,13$ ) keine Signifikanzen ergaben. Im Gegensatz zu dem Symboltyp Farbe war die Trialdauer beim Symboltyps Form deutlich höher. Bei allen Verzögerungsbedingungen war von Farbe zu Form ein Anstieg von etwa 10 s zu erkennen.

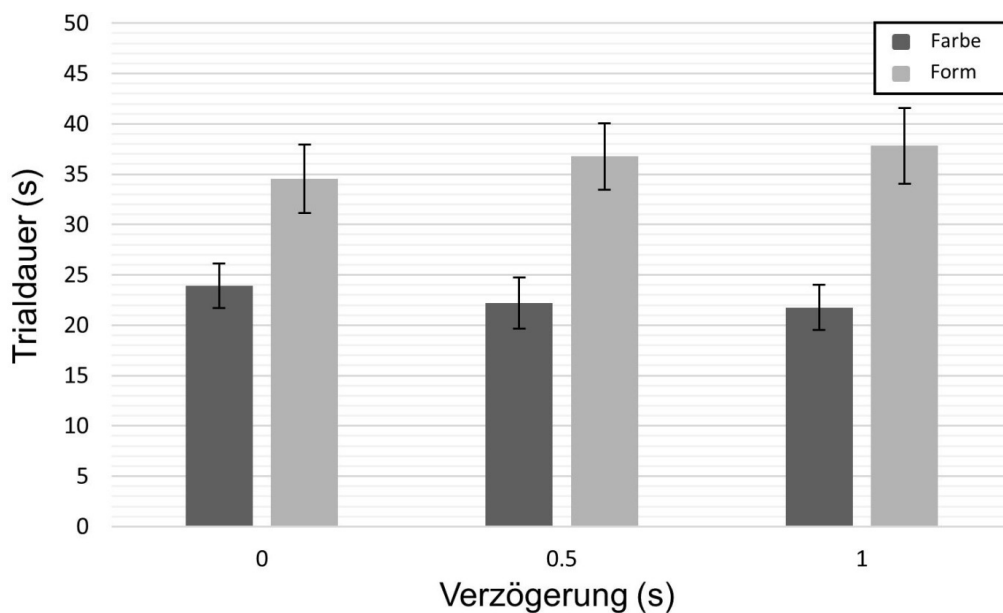


Abbildung 4: Trialdauer gemittelt über alle Probanden für alle Versuchsbedingungen.

### 3.1.3 Blickwechsel

Als Blickwechsel zwischen den Spalten wurde die Anzahl an Maskenverschiebungen gezählt. Anhand der Anzahl an Blickwechsel konnte die Akquisitionsstrategie quantifiziert werden (siehe Abbildung 5). Die zwei-faktorielle ANOVA mit den Faktoren Symboltyp und Verzögerung zeigte Signifikanzen für beide Faktoren. Mit zunehmender Verzögerung nahm die Anzahl an Blickwechseln ab (Verzögerung:  $F = 4,48$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,24$ ). Im Vergleich zum Symboltyp Farbe waren beim Symboltyp Form signifikant mehr Blickwechsel zu verzeichnen (Symboltyp:  $F = 15,24$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,52$ ). Der paarweise Vergleich ergab beim Symboltyp Farbe eine Signifikanz zwischen der Anzahl der Blickwechsel bei einer Verzögerung von 0,0 s und der Anzahl der Blickwechsel bei einer Verzögerung von 0,5 s ( $p < 0,05$ ).

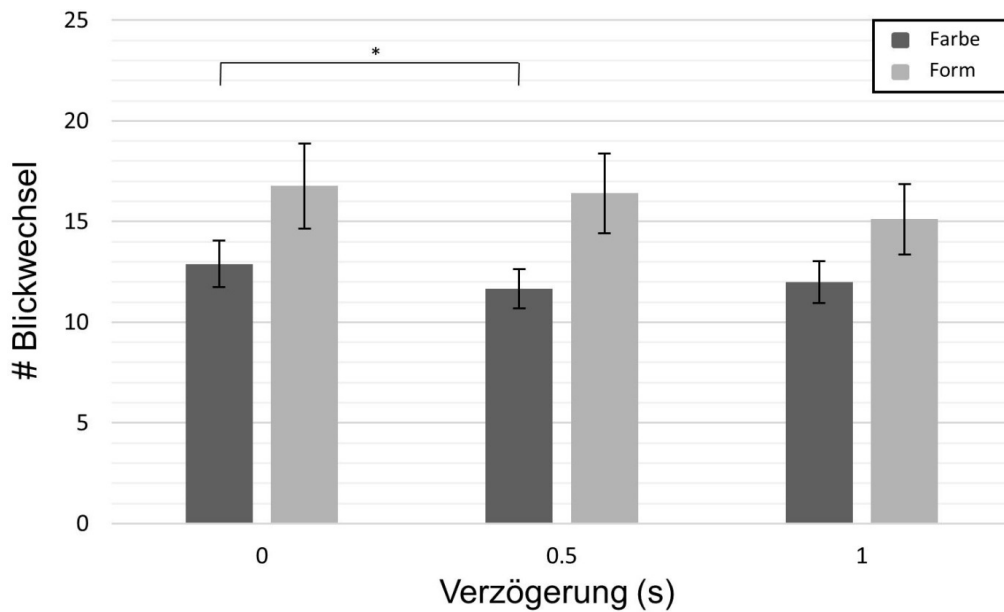


Abbildung 5: Anzahl an Blickwechseln zwischen den Spalten als Maß für die Akquisitionsstrategie gemittelt über alle Probanden für alle Versuchsbedingungen.

### 3.1.4 Verweildauer

Als Verweildauer wurde die Zeit definiert, die die Probanden bis zur Maskenverschiebung innerhalb einer Spalte verbrachten (siehe Abbildung 6). Die Verweildauer diente der Quantifizierung der Memorierungsstrategie. Die zwei-faktorielle ANOVA zeigte eine Signifikanz bei dem Faktor Symboltyp ( $F = 14,02$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,5$ ) jedoch keine für die Verzögerung ( $F = 1,94$ ,  $p = 0,162$ ,  $\eta_p^2 = 0,12$ ). Deutlich längere Verweildauern waren im Vergleich zum Symboltyp Farbe beim Symboltyp Form zu sehen. Für den Symboltyp Form konnte beim paarweisen Vergleich außerdem ein signifikanter Unterschied zwischen der mittleren Verweildauer bei einer Verzögerung von 0,0 s und der mittleren Verweildauer bei einer Verzögerung von 1,0 s identifiziert werden ( $p < 0,01$ ).

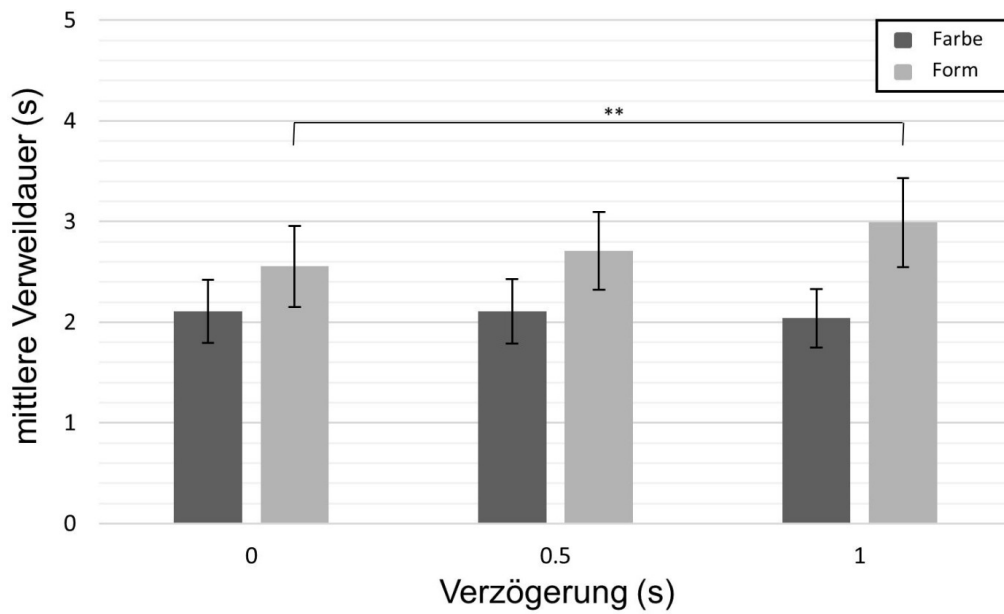


Abbildung 6: Mittlere Verweildauer innerhalb der Spalten als Maß für die Memorierungsstrategie gemittelt über alle Probanden für alle Versuchsbedingungen.

Interessanterweise war die mittlere Verweildauer der Probanden (unabhängig von der Bedingung) in der linken Spalte immer höher als in der rechten. Ein gepaarter t-Test zeigte für diesen links-rechts-Asymmetrie Effekt eine hohe Signifikanz ( $p < 0,001$ , siehe Abbildung 7).

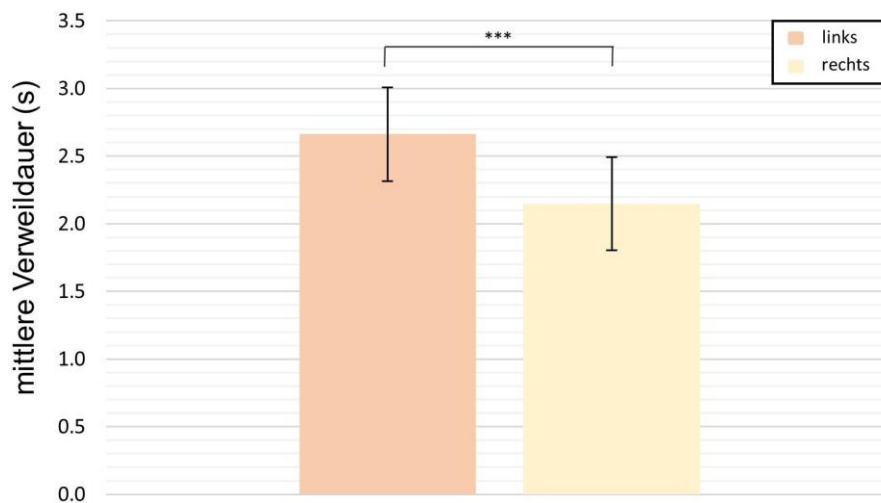


Abbildung 7: Mittlere Verweildauer in der linken und rechten Spalte gemittelt über alle Versuchsbedingungen.



### 3.1.5 Trade-off zwischen Akquisitions- und Memorierungsstrategie

Aufgrund des kompletten within-subject Designs konnten die Verschiebungen des Trade-offs bei allen Probanden für die verschiedenen Bedingungen und deren Kombinationen (Symboltyp, Verzögerung) untersucht werden. Die bivariate Regression zwischen der Anzahl der Blickverschiebungen und der mittleren Verweildauer verdeutlicht die Verteilung der individuellen Trade-offs der Probanden durch einen Potenz-Zusammenhang (siehe Abbildung 8). Jeder Punkt steht für eine Versuchsperson. Der horizontale Fehlerbalken stellt den SEM der Blickwechsel (über alle 6 Bedingungen) dar, der vertikale Fehlerbalken den SEM der mittleren Verweildauer (über alle 6 Bedingungen). Die Probanden zeigten individuelle Strategien von starker Präferenz zur Akquisitionsstrategie (hohe Anzahl an Blickwechseln, geringe Verweildauer) hinzu starker Präferenz zur Memorierungsstrategie (geringe Anzahl an Blickwechseln, hohe Verweildauer). Interessanterweise verwendete keine der Versuchspersonen kleine (linker unterer Bereich der Abbildung 8) oder große Mengen (rechter oberer Bereich) beider Strategien. Die Regressionsgerade des Trade-offs ist durch  $y = 64,085x^{-1,321}$  beschrieben und hat einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,91$ . Der Großteil der Probandendaten liegt innerhalb der Regressionsgeraden zwischen Blickwechsel und mittlerer Verweildauer der Bedingung Farbe ( $y = 37,601x^{-1,239}$ ;  $r = 0,83$ ) und der Bedingung Form ( $y = 73,626x^{-1,283}$ ;  $r = 0,85$ ) (Abbildung 8). Festzuhalten ist, dass die Varianz zwischen den Probanden sehr viel größer war als die innerhalb der Probanden.

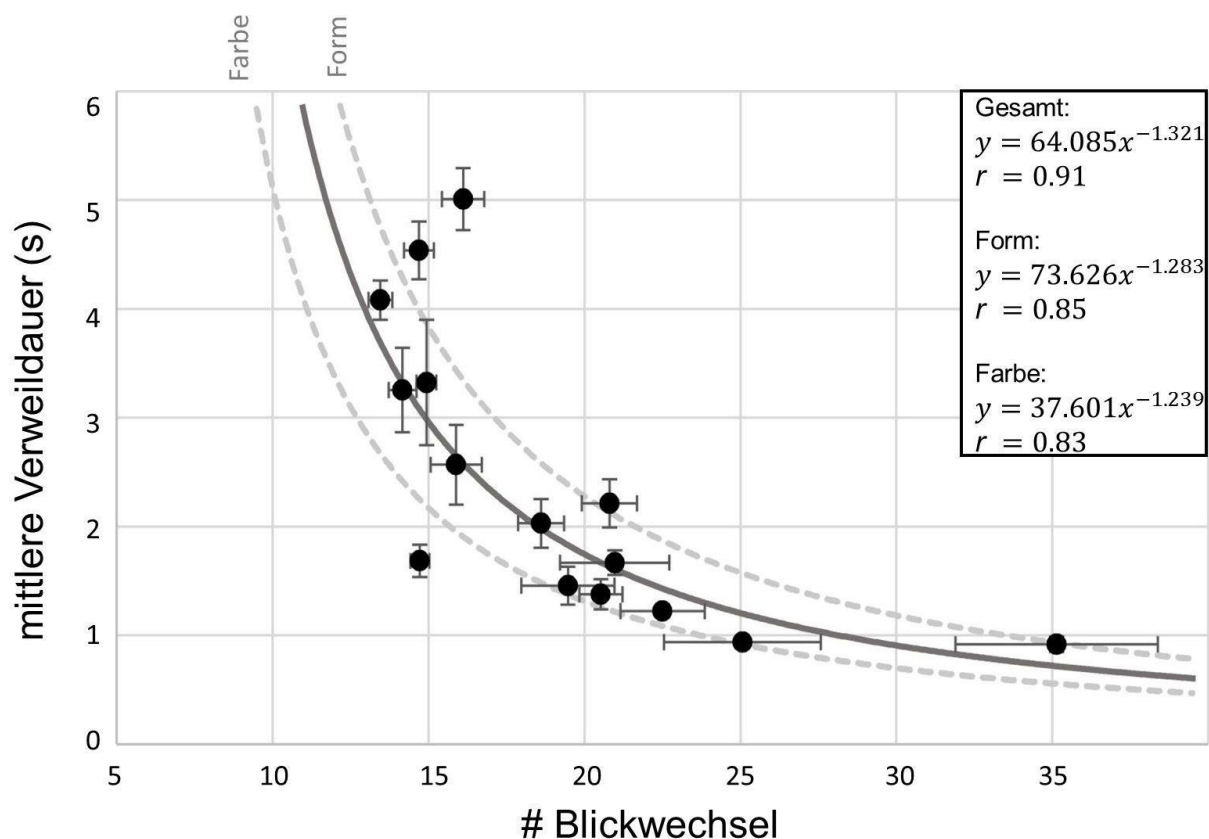


Abbildung 8: Trade-off zwischen Akquisitions- (Blickwechsel) und Memorierungsstrategie (mittlere Verweildauer): Gezeigt sind die individuellen Strategien jedes Probanden gemittelt über alle Versuchsbedingungen (15 Punkte für 15 Probanden). Die Regressionsgerade der individuellen Strategien (dunkelgraue Linie) hat einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,91$ . Die gestrichelten Linien zeigen die Regressionsgeraden für Farbe ( $r = 0,83$ ) und Form ( $r = 0,85$ ).

### 3.2 Korrelationen der Ergebnisse der Vorversuche mit den abhängigen Variablen des Hauptversuchs

Nach der Berechnung der Arbeitsgedächtniswerte Corsi Span, Operation Span und  $d'$  (gesamt) der Probanden aus den Vorversuchen, wurden diese Werte mit den abhängigen Variablen Blickwechsel, mittlere Verweildauer und  $T_i$  aus dem Hauptversuch korreliert. Der  $T_i$  gibt an, wie lange die Probanden pro Bedingung brauchten, um ein Symbol zu enkodieren, und wurde wie folgt berechnet:

$$T_i = \frac{T_p}{M_c}$$

$T_p = \text{mittlere Verweildauer}$

$$M_c = \frac{\text{Gesamtzahl der Symbole pro Stimulusbild (24)}}{\text{Blickwechsel}}$$

Zur visuellen Darstellung wurden die Anzahl der Blickwechsel, die mittlere Verweildauer und der  $T_i$  anschließend gegen den Corsi Span, den Operation Span und den  $d'$ (gesamt) geplottet. In den Plots stellen die einzelnen Punkte pro Farbe die 15 Probanden dar. Die Rottöne spiegeln den Symboltyp Farbe wider, die Blautöne den Symboltyp Form. Die dazugehörigen Geraden sind die Regressionsgeraden der einzelnen Bedingungen.

#### 3.2.1 Korrelationen zwischen der Anzahl der Blickwechsel und den Ergebnissen der Vorversuche

Zwischen der Variable Blickwechsel aus dem Hauptversuch und den Ergebnissen der Vorversuche zeigte die Spearman-Korrelation keinerlei Signifikanzen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten (r) und Signifikanzwerte (p) der Korrelationen zwischen Blickwechsel und Corsi Span, d'(gesamt) und Operation Span.

	Corsi Span	d' (gesamt)	Operation Span
<b>Blickwechsel (Farbe, Verzögerung 0,0 s)</b>	r=0,22, p=0,437	r=0,09, p=0,761	r=0,17, p=0,543
<b>Blickwechsel (Farbe, Verzögerung 0,5 s)</b>	r=0,39, p=0,155	r=0,01, p=0,970	r=0,14, p=0,629
<b>Blickwechsel (Farbe, Verzögerung 1,0 s)</b>	r=0,33, p=0,224	r=0,01, p=0,960	r=0,02, p=0,947
<b>Blickwechsel (Form, Verzögerung 0,0 s)</b>	r=0,41, p=0,127	r=0,08, p=0,785	r=0,01, p=0,985
<b>Blickwechsel (Form, Verzögerung 0,5 s)</b>	r=0,38, p=0,158	r=0,32, p=0,245	r=0,14, p=0,615
<b>Blickwechsel (Form, Verzögerung 1,0 s)</b>	r=0,28, p=0,312	r=0,08, p=0,776	r=0,05, p=0,869

Abbildung 9 zeigt, dass die Probanden mit einem höheren Corsi Span tendenziell mehr Blickwechsel gemacht haben als die mit niedrigerem Corsi Span. Jedoch bleibt diese Beobachtung ohne Signifikanz.

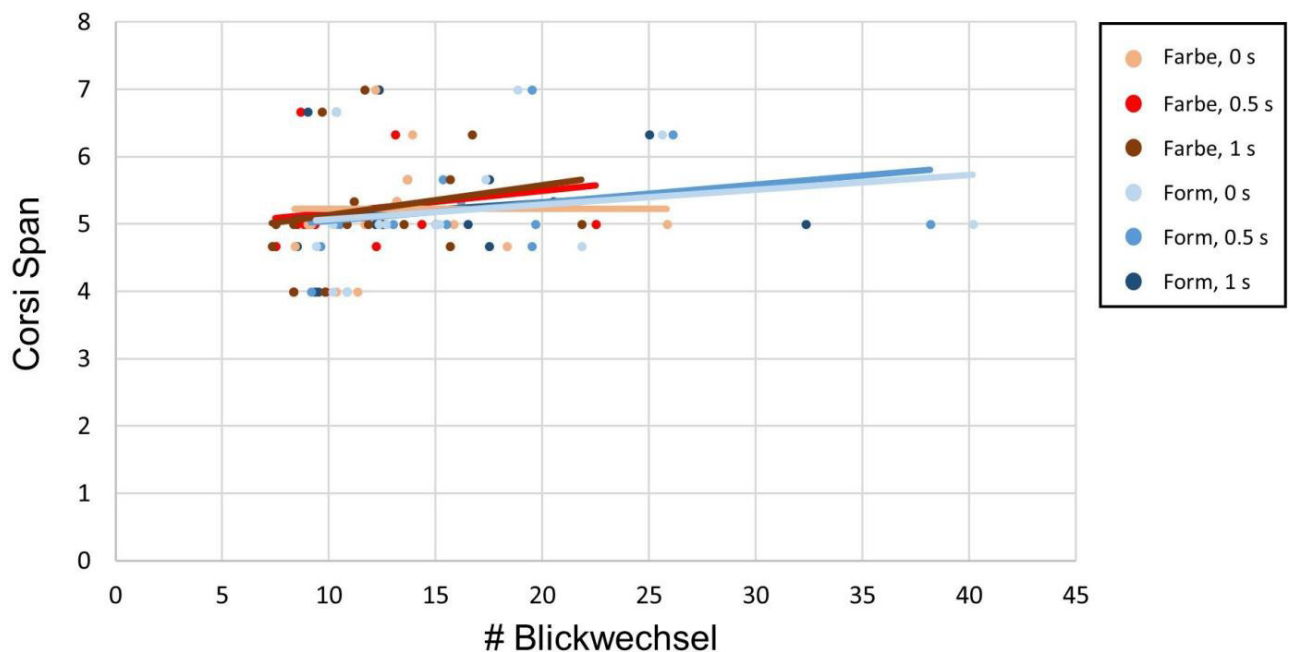


Abbildung 9: Korrelation zwischen der Anzahl an Blickwechseln und dem Corsi Span für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

In Abbildung 10 ist eine große Streuung der Daten ohne signifikante Korrelationen zwischen der Anzahl der Blickwechsel und dem d'(gesamt) zu sehen.

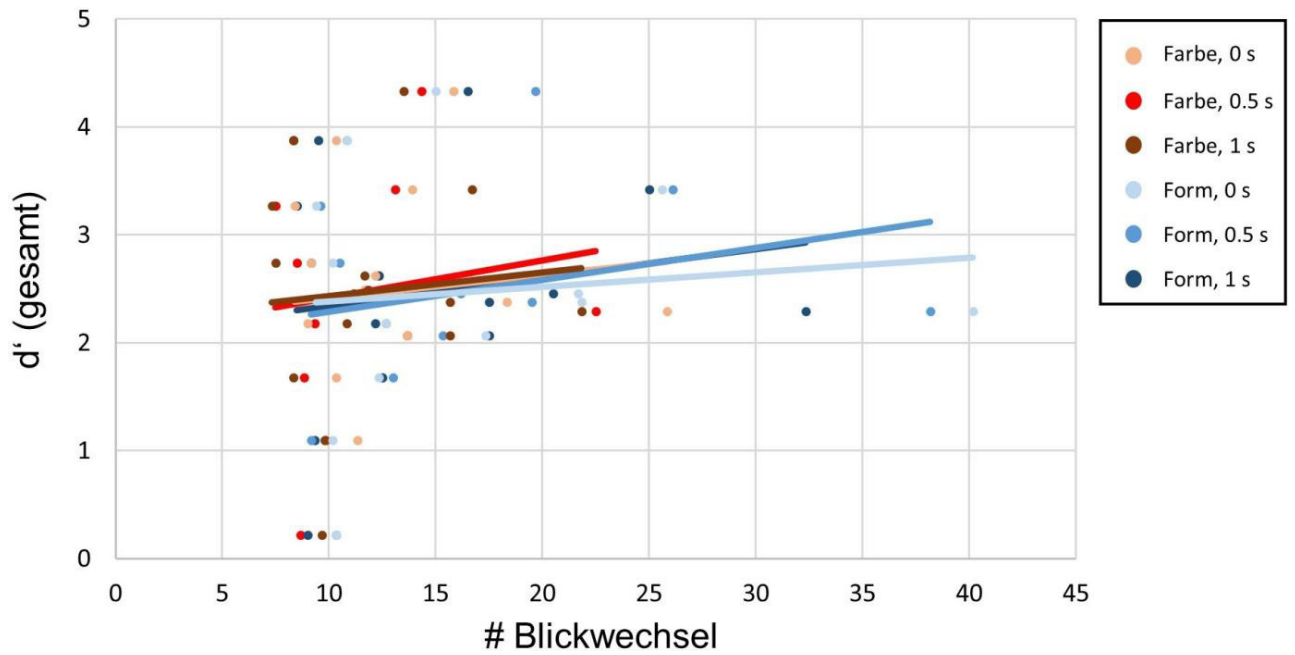


Abbildung 10: Korrelation zwischen der Anzahl an Blickwechseln und dem  $d'$ (gesamt) für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

Abbildung 11 zeigt nicht signifikante Korrelationen zwischen der Anzahl der Blickwechsel und dem Operation Span der Probanden. Ein leichter Anstieg der Anzahl der Blickwechsel mit wachsendem Operation Span ist zu erkennen.

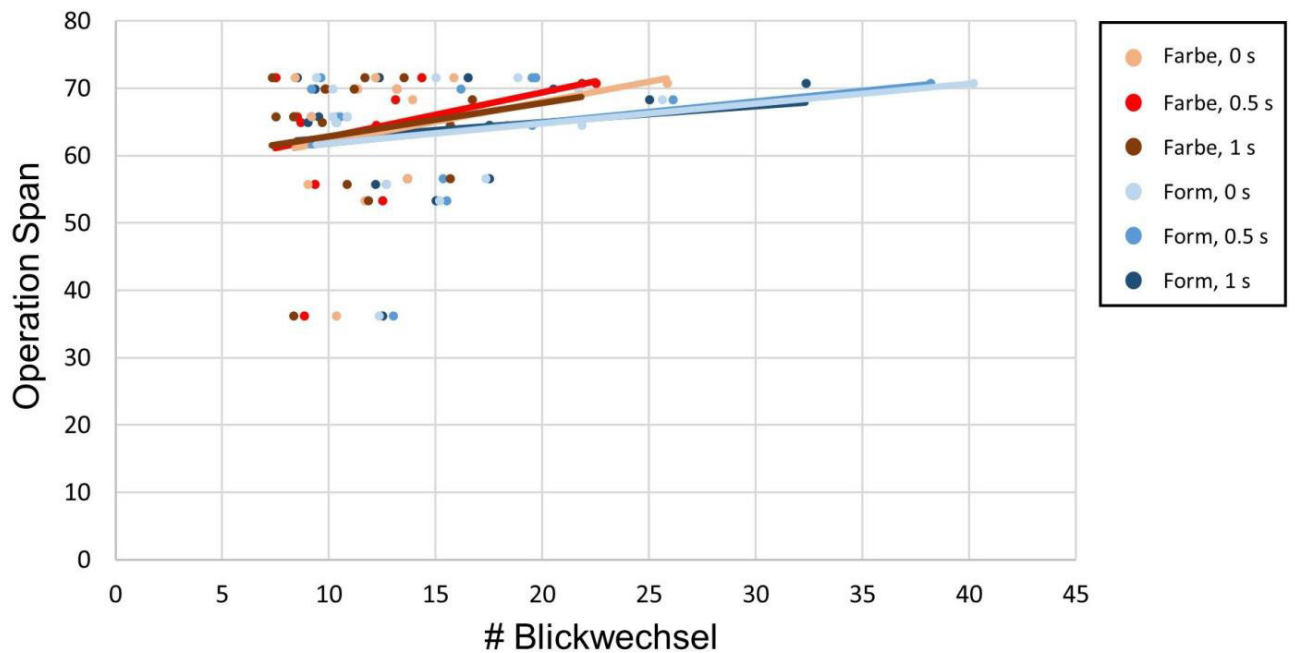


Abbildung 11: Korrelation zwischen der Anzahl an Blickwechseln und dem Operation Span für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

### 3.2.2 Korrelationen zwischen der mittleren Verweildauer und den Ergebnissen der Vorversuche

Zwischen der mittleren Verweildauer und den Ergebnissen der Vorversuche zeigte die Spearman-Korrelation nur Signifikanzen beim Corsi Span (Tabelle 2, fett gedruckt).

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten (r) und Signifikanzwerte (p) der Korrelationen zwischen mittlerer Verweildauer und Corsi Span, d'(gesamt) und Operation Span. Fett gedruckt sind die signifikanten Korrelationen.

	Corsi Span	d' (gesamt)	Operation Span
mittlere Verweildauer (Farbe, Verzögerung 0,0 s)	r=0,45, p=0,095	r=0,18, p=0,516	r=0,12, p=0,675
mittlere Verweildauer (Farbe, Verzögerung 0,5 s)	<b>r=0,60, p=0,017</b>	r=0,13, p=0,639	r=0,20, p=0,482
mittlere Verweildauer (Farbe, Verzögerung 1,0 s)	<b>r=0,61, p=0,015</b>	r=0,11, p=0,694	r=0,08, p=0,775
mittlere Verweildauer (Form, Verzögerung 0,0 s)	r=0,50, p=0,057	r=0,05, p=0,869	r=0,10, p=0,737
mittlere Verweildauer (Form, Verzögerung 0,5 s)	<b>r=0,55, p=0,035</b>	r=0,05, p=0,850	r=0,13, p=0,647
mittlere Verweildauer (Form, Verzögerung 1,0 s)	<b>r=0,54, p=0,037</b>	r=0,12, p=0,676	r=0,07, p=0,795

In Abbildung 12 ist die mittlere Verweildauer gegen den Corsi Span geplottet. Signifikante Korrelationen sind bei den Bedingungen Farbe-0,5 s Verzögerung, bei Farbe-1,0 s Verzögerung, bei Form-0,5 s Verzögerung und bei Form-1,0 s Verzögerung zu sehen. Die Probanden mit höherem Corsi Span hatten eine geringere mittlere Verweildauer als die Probanden mit geringerem Corsi Span.

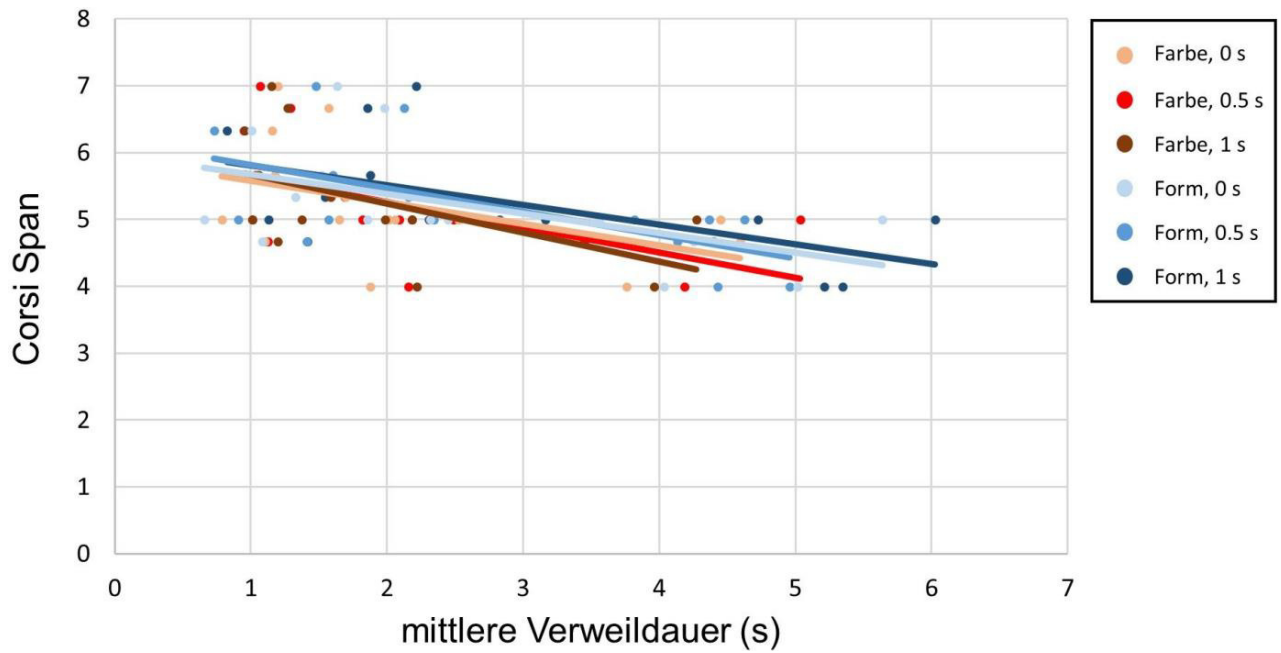


Abbildung 12: Korrelation zwischen der mittleren Verweildauer und dem Corsi Span für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

Abbildung 13 zeigt keine signifikanten Korrelationen zwischen der mittleren Verweildauer und dem  $d'$ (gesamt) aufgrund der großen Streuung der Daten.

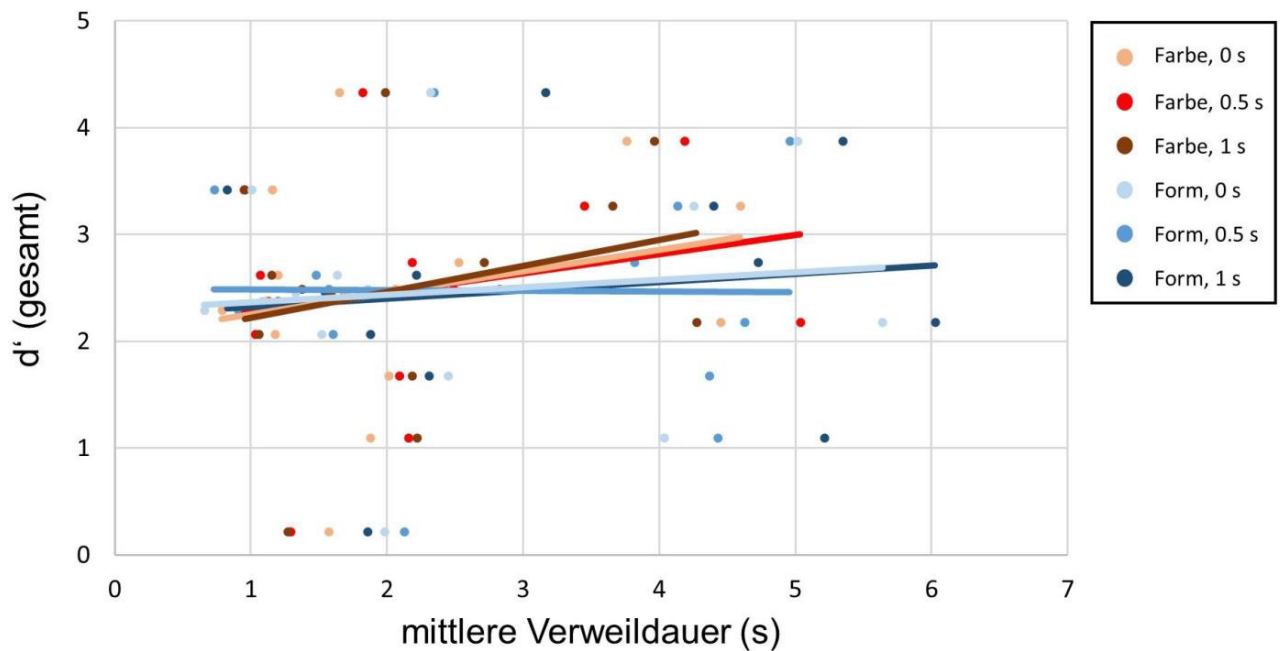


Abbildung 13: Korrelation zwischen der mittleren Verweildauer und dem  $d'$ (gesamt) für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

In Abbildung 14 sind nahezu waagerechte Regressionsgeraden zwischen der mittleren Verweildauer und dem Operation Span ohne signifikante Korrelationen zu sehen.

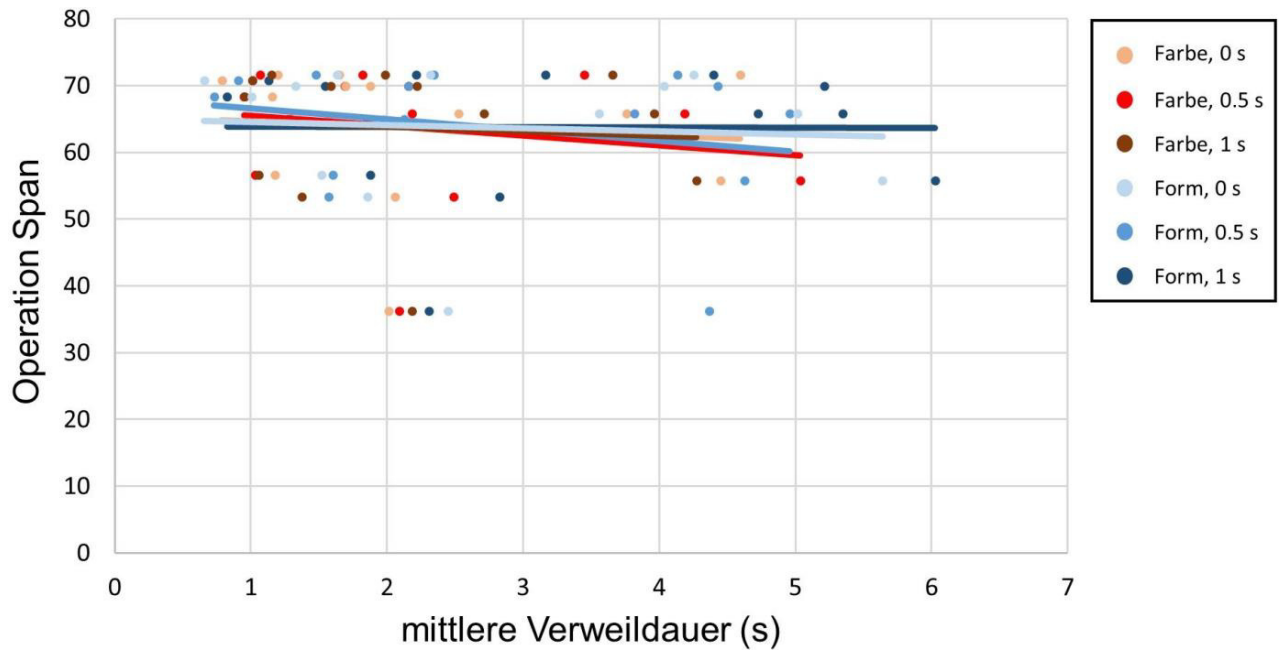


Abbildung 14: Korrelation zwischen der mittleren Verweildauer und dem Operation Span für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

### 3.2.3 Korrelationen zwischen $T_i$ und den Ergebnissen der Vorversuche

$T_i$  korrelierte für alle Bedingungen signifikant mit dem Corsi Span (Tabelle 3, fett gedruckt).

Tabelle 3: Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) und Signifikanzwerte ( $p$ ) der Korrelationen zwischen  $T_i$  und Corsi Span,  $d'$ (gesamt) und Operation Span. Fett gedruckt sind die signifikanten Korrelationen.

	Corsi Span	$d'$ (gesamt)	Operation Span
<b>Ti (Farbe, Verzögerung 0,0 s)</b>	<b><math>r=0,65, p=0,009</math></b>	$r=0,31, p=0,254$	$r=0,04, p=0,884$
<b>Ti (Farbe, Verzögerung 0,5 s)</b>	<b><math>r=0,58, p=0,022</math></b>	$r=0,31, p=0,254$	$r=0,00, p=1,000$
<b>Ti (Farbe, Verzögerung 1,0 s)</b>	<b><math>r=0,76, p=0,001</math></b>	$r=0,26, p=0,348$	$r=0,16, p=0,571$
<b>Ti (Form, Verzögerung 0,0 s)</b>	<b><math>r=0,54, p=0,040</math></b>	$r=0,27, p=0,328$	$r=0,21, p=0,462$
<b>Ti (Form, Verzögerung 0,5 s)</b>	<b><math>r=0,56, p=0,031</math></b>	$r=0,06, p=0,820$	$r=0,01, p=0,980$
<b>Ti (Form, Verzögerung 1,0 s)</b>	<b><math>r=0,58, p=0,022</math></b>	$r=0,28, p=0,321$	$r=0,05, p=0,849$

Je höher der Corsi Span der Probanden, desto weniger Zeit benötigten sie, um ein Symbol zu enkodieren ( $T_i$ ). Die signifikante Korrelation in allen Bedingungen ist in Abbildung 15 dargestellt.

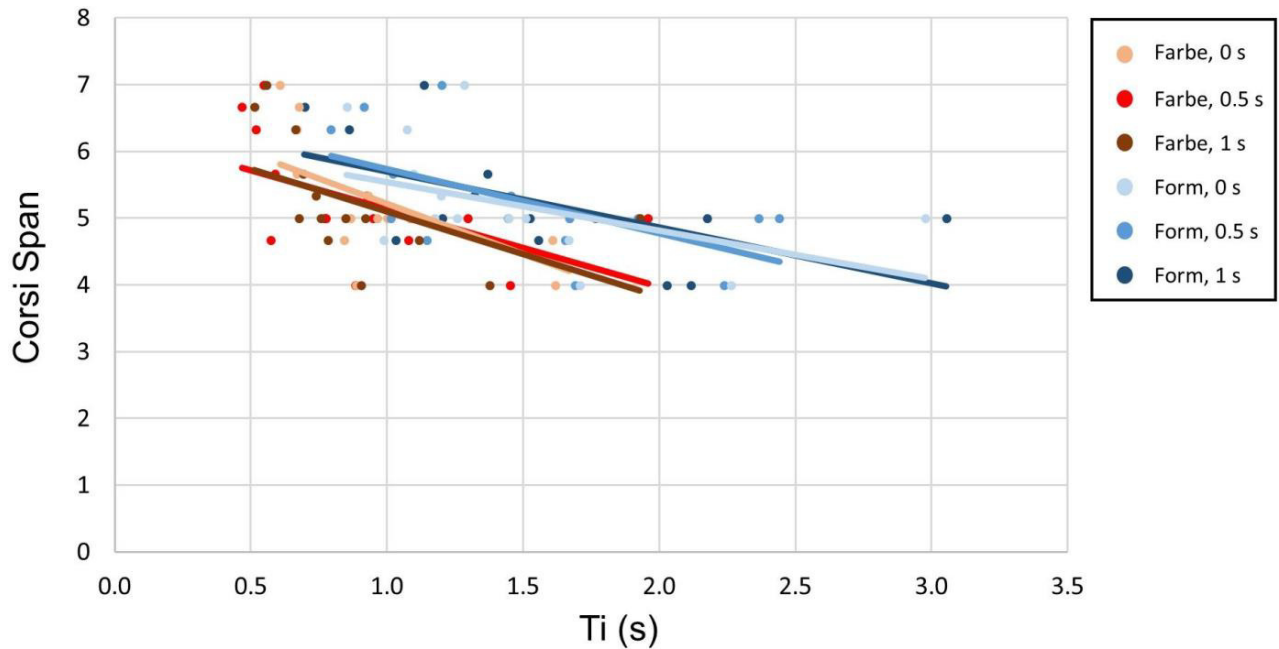


Abbildung 15: Korrelation zwischen  $T_i$  und dem Corsi Span für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

Die große Streuung der Daten und die nicht signifikante Korrelation zwischen  $T_i$  und  $d'$  (gesamt) sind in Abbildung 16 gezeigt.



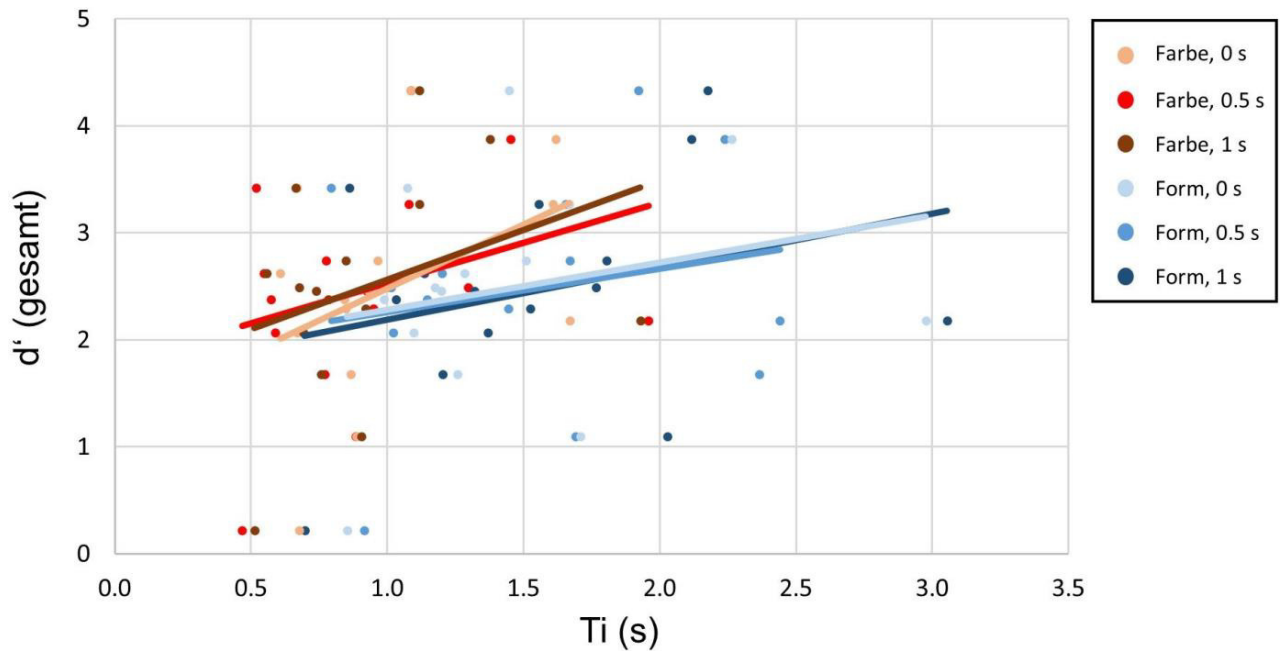


Abbildung 16: Korrelation zwischen  $T_i$  und dem  $d'$ (gesamt) für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

Abbildung 17 zeigt die nicht signifikante Korrelation zwischen  $T_i$  und Operation Span.

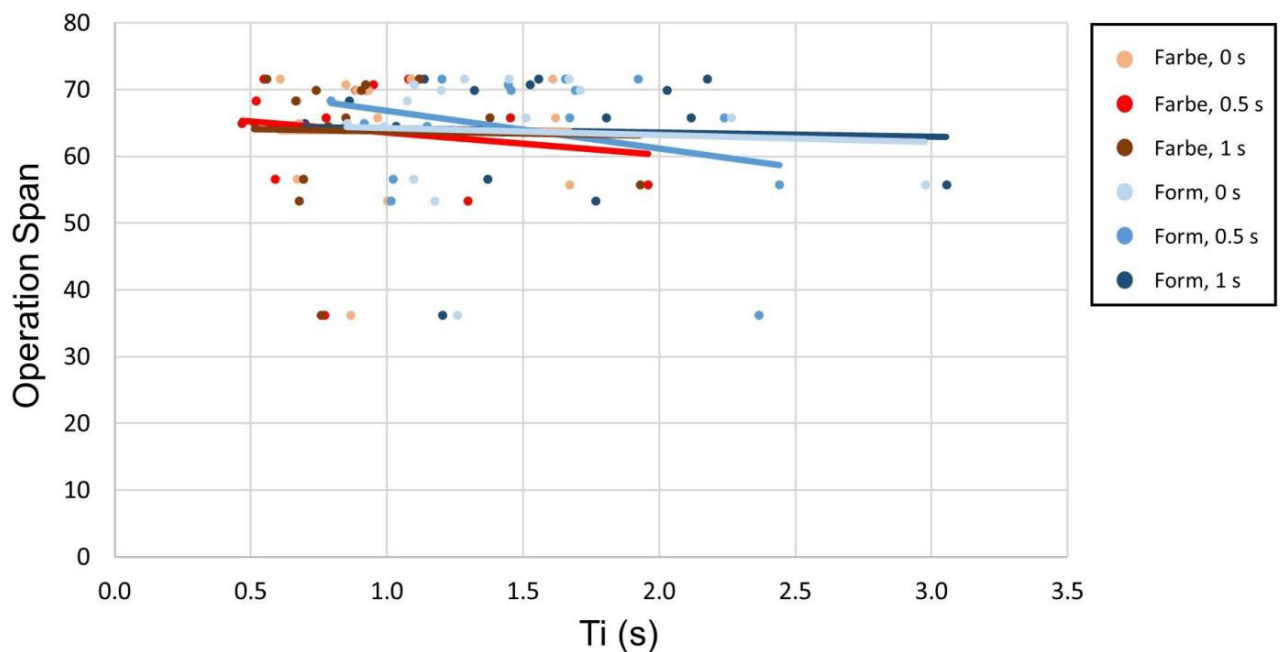


Abbildung 17: Korrelation zwischen  $T_i$  und dem Operation Span für alle Versuchsbedingungen: Die verschiedenfarbigen einzelnen Punkte stellen die Probanden pro Bedingung dar, die Linien die dazugehörigen Regressionsgeraden.

## 4. DISKUSSION

### 4.1 Hauptversuch

Die vergleichende visuelle Suchaufgabe (CVS-Aufgabe) wurde verwendet, um die Entscheidungsfindung der Probanden bei variierenden Kosten zu untersuchen. Auch in der Natur steht der Mensch ständig vor der Wahl zwischen zahlreichen möglichen Handlungsstrategien, bei denen er sich generell zu der Handlung entscheidet, die die wenigsten Kosten für ihn birgt. Die CVS-Aufgabe untersuchte zwei Verhaltensweisen, die Akquisition und die Memorisierung von Information, die leicht manipuliert, kontrolliert und quantifiziert werden konnten. So wurden die Akquisitionskosten manipuliert, indem die Maske über jeweils einer Stimulusspalte mit variabler Verzögerung verschoben wurde. Das Akquisitionsverhalten wurde durch die Anzahl an Blickverschiebungen (Mausklicks) zwischen den Spalten quantifiziert. Die Memorisierungskosten dagegen wurden durch die Komplexität der Symbole (Farbe oder Form) manipuliert und die Verwendung der Memorisierungsstrategie durch Messung der mittleren Verweildauer quantifiziert. Die Ergebnisse, die Hardiess & Mallot (submitted) bereits durch das Versuchsmodell erhielten, konnten reproduziert und erhärtet werden.

Das Experiment wurde so konstruiert, dass über die verschiedenen Versuchsbedingungen hinweg (Symboltyp, Verzögerung) etwa dieselbe Schwierigkeit vorherrschte. Nach jedem Durchgang sollten die Probanden die gefundene Anzahl an Unterschieden zwischen den Spalten nennen. Falsch genannte oder übersehene Unterschiede galten als Fehler. Primär diente diese Aufgabe dazu, dass die Probanden das komplette Stimulus-Bild anschauten, ohne nach einem gefundenen Fehler aufzuhören und weiterhin, um die Probanden zu motivieren. Sie waren dazu in der Lage, alle Bedingungen mit einer durchschnittlichen Fehlerrate von 1 % bis 6 % zu absolvieren (Abbildung 3). Zwar hatte der Symboltyp Form einen signifikanten Einfluss auf die Fehlerrate (Anstieg), da jedoch unter dieser Bedingung immer noch durchschnittlich mehr als 94% der Antworten korrekt gegeben wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Probanden die Aufgabe verstanden haben und sie angemessen zu lösen war. Die höhere Fehlerrate beim Symboltyp Form zeigte allerdings, dass es den Probanden schwerer fiel, die Unterschiede zwischen den Formen zu erkennen als zwischen den Farben. Grund dafür könnte die Ähnlichkeit der Tiersilhouetten sein, während die Farben deutlich zu unterscheiden waren. Um die Fehlerrate zwischen beiden Symboltypen noch mehr anzunähern, könnten in Zukunft Tiersilhouetten gewählt werden, die deutlicher zu unterscheiden sind. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass der Komplexitätsunterschied zwischen Farben und Formen erhalten bleibt, um die Manipulation der Memorisierungskosten nicht zu unterlaufen.

Die Verzögerung (Manipulation der Akquisitionskosten) hatte einen signifikanten Effekt auf die Anzahl der Blickwechsel zwischen den Spalten (Abbildung 5). Mit zunehmender Verzögerung nahm die Anzahl an Blickwechseln beim Symboltyp Form ab. Auch war mit zunehmender Verzögerung beim Symboltyp Form ein leichter Anstieg in der mittleren Verweildauer zu sehen (Abbildung 6). Insgesamt waren sowohl die Anzahl an Blickwechseln als auch die mittlere Verweildauer beim Symboltyp Form höher als beim Symboltyp Farbe. Die Ergebnisse zeigen, dass die Manipulation beider Kosten eine Verschiebung des Trade-offs zur Folge hatte. Wurden die Kosten für die Akquisition erhöht, indem die Verzögerung der Maske länger wurde, so nahm die Anzahl an Blickwechseln signifikant ab und die mittlere Verweildauer tendenziell zu, d.h. der Trade-off verschob sich hin zur

Memorisierungsstrategie. Die Probanden versuchten intuitiv, den erhöhten Kosten für die Akquisition zu begegnen und seltener zwischen den Spalten hin und her zu schauen. Um die Vergleichsaufgabe weiterhin adäquat lösen zu können, mussten sie sich nun mehrere Symbole merken wodurch die mittlere Verweildauer innerhalb einer Spalte zum Memorieren stieg. Wurden dagegen die Kosten für die Memorisierung erhöht, indem Formsymbole statt Farbsymbole gezeigt wurden, so nahm die Anzahl an Blickwechseln zu. Der Trade-off verschob sich also in Richtung Akquisitionsstrategie. Die Tiersilhouetten waren deutlich schwerer zu memorieren als die Farben. Die Probanden mussten die beiden Spalten häufiger vergleichen und brauchten eine längere Zeit, um sich die Konturen der Tiere einzuprägen als die Farbkreise. Schon Hardiess et al. (2011) fanden mithilfe der block-copying Aufgabe heraus, dass das Arbeitsgedächtnis mehr beansprucht wird, je komplexer die zu memorierenden Muster sind. Sie vermuteten, dass komplexe Gegenstände im Arbeitsgedächtnis durch mehr als eine Informationseinheit repräsentiert werden und der Proband sich somit eine geringere Anzahl an komplexen Symbolen merken kann als an einfachen, was für die häufigeren Blickwechsel bei höheren Memorisierungskosten spricht. Eine höhere Arbeitsgedächtnisnutzung braucht Zeit und resultiert somit beim Symboltyp Form in einer höheren mittleren Verweildauer. Auch die Zeit, die die Probanden benötigten, um einen der 36 Durchgänge zu absolvieren (Trialdauer), war beim Symboltyp Form deutlich höher als beim Symboltyp Farbe (Abbildung 4). Unabhängig von der Verzögerungsbedingung brauchten die Probanden beim Vergleichen der Tiersilhouetten etwa 10 s länger. Der Anstieg der Trialdauer beim Symboltyp Form basierte auf dem kombinierten Anstieg von Blickwechsel und mittlerer Verweildauer.

Mit hoher Signifikanz ( $p < 0,001$ ) wurde belegt, dass die mittlere Verweildauer für die linke Spalte (unabhängig von den Versuchsbedingungen) sehr viel höher war als für die rechte Spalte (Abbildung 7). Das Erkennen der Unterschiede zwischen den Spalten benötigt die Perzeption und das Enkodieren des Symbols in einer Spalte, den Blickwechsel zur anderen Spalte, die Perzeption des Symbols dort und das Vergleichen mit dem bereits memorierten Symbol. Darauf folgt der Blickwechsel zurück zur Spalte, in der das erste Symbol enkodiert wurde. Da für jede Bedingung eine erhöhte mittlere Verweildauer in der linken Spalte zu finden war, liegt es nahe, dass die Probanden primär in der linken Spalte enkodierten und in der rechten Spalte verglichen, was bereits durch frühere Studien belegt wurde (u.a. Hardiess et al., 2008; Hardiess & Mallot, submitted). Grund dafür könnte die gewohnte Leserichtung (links nach rechts) der Probanden sein, deren Muttersprache Deutsch ist.

Durch das within-subject Design der CVS-Aufgabe war es möglich, die Trade-off-Strategien eines jeden einzelnen Probanden hinsichtlich aller Bedingungen zu untersuchen. Für die Quantifizierung der Akquisitionsstrategie wurden die Blickwechsel gewählt, für die Quantifizierung der Memorierungsstrategie die mittlere Verweildauer. Im potentiellen Strategieraum zeigten einige Probanden eine generell starke Präferenz zur Akquisitionsstrategie (Punkte in der rechten unteren Ecke in Abbildung 8), andere eine generell starke Präferenz zur Memorierungsstrategie (linke obere Ecke). Die Strategieverteilung aller Probanden (Punkte in Abbildung 8) folgte einer Regressionsgeraden, welche durch das Potenzgesetz  $y = 64,085x^{-1,321}$  beschrieben wurde. Keiner der Probanden präferierte Strategien mit geringen Blickwechseln und einer geringen mittleren Verweildauer (linke untere Ecke des potentiellen Strategieraums) oder Strategien mit sehr vielen Blickwechseln und einer hohen mittleren Verweildauer (rechte obere Ecke des potentiellen Strategieraums). Dieses Ergebnis resultierte wahrscheinlich aus der Anweisung,

die Unterschiede zwischen den beiden Spalten so genau und schnell wie möglich zu detektieren. Da die Probanden die Aufgabe so korrekt wie möglich durchführen sollten, brauchten sie eine gewisse Anzahl an Blickwechseln und eine gewisse mittlere Verweildauer, um die Symbole zu memorieren. Die Anweisung, die Aufgabe so schnell wie möglich zu absolvieren, hielt die Probanden davon ab, eine extrem hohe mittlere Verweildauer und sehr viele Blickwechsel zu vollziehen. Offensichtlich interpretierten alle Probanden diese Anweisung ähnlich, indem sie sich etwa dasselbe Zeitlimit setzten.

Interessanterweise war die Varianz zwischen den Strategien der Probanden größer als innerhalb eines Probanden. Die Varianz innerhalb der Probanden könnte geringer sein, da sich jeder einzelne schon zu Beginn des Versuchs über die individuellen Kosten bewusst war und diese während des Versuchs nicht anpassen, sondern lediglich auf die Manipulation der Kosten reagieren musste. Die höhere Varianz zwischen den Probanden könnte an den individuellen Präferenzen der Probanden gelegen haben, deren Herkunft bisher unklar war und die durch die verschiedenen Vorversuche untersucht werden sollte.

#### 4.2 Korrelationen zwischen den Vorversuchen und dem Hauptversuch

Die Ergebnisse der Vorversuche wurden mit den einzelnen Variablen (Blickwechsel, mittlere Verweildauer,  $T_i$ ) des Hauptversuches korreliert, um möglicherweise Aufschluss darüber zu bekommen, warum ein Proband mehr zur Akquisitions- oder zur Memorisierungsstrategie neigte. Die Vorversuche wurden so gewählt, dass verschiedene Bereiche und Funktionen des Arbeitsgedächtnisses abgedeckt wurden. Am wenigsten schwierig sollte der Corsi-Test sein, gefolgt vom n-back-Test bis zum komplexesten und schwierigsten Test, dem Operation Span-Test. Der n-back-Test streute bei jeder Korrelation der Vorversuche mit den Variablen des Hauptversuches so stark, dass keinerlei Aussagen über mögliche Tendenzen gemacht werden konnten (Abbildung 10, Abbildung 13, Abbildung 16). Vermutlich sprach der n-back-Test nicht oder nur wenig auf Funktionen des Arbeitsgedächtnisses an, die in Zusammenhang mit den im Hauptversuch aktiven Funktionen standen oder diese in einer Weise beeinflussten.

Keiner der Vorversuche korrelierte signifikant mit der Anzahl an Blickwechseln, die in der CVS-Aufgabe zwischen den Spalten gemacht wurden (Tabelle 1). Mit zunehmendem Corsi Span war jedoch ein leichter Anstieg in der Anzahl der Blickwechsel zu sehen (Abbildung 9). Da die Blickwechsel zur Quantifizierung der Akquisitionsstrategie dienten, würde dies bedeuten, dass die Probanden mit einem höheren Corsi Span tendenziell mehr Blickwechsel vollzogen und somit die Akquisitionsstrategie der Memorisierungsstrategie vorzogen. Der Corsi Span als typische Arbeitsgedächtnis-Aufgabe gibt Aufschluss über die passive räumliche Aufnahmekapazität des Arbeitsgedächtnisses (z.B. Vecchi & Cornoldi, 1999). Da also Probanden mit einem höheren Corsi Span vermutlich mehr Kapazität haben, die Symbole zu memorieren, wären genau umgekehrte Ergebnisse plausibel gewesen. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die Probanden mit höherem Corsi Span weniger Blickwechsel brauchten, um die Unterschiede zwischen den Spalten zu finden, da sie sich mehr Symbole merken konnten.

Signifikante Korrelationen waren zwischen dem Corsi Span und der mittleren Verweildauer zu sehen (Tabelle 2). Probanden mit einem höheren Corsi Span brauchten eine geringe mittlere Verweildauer, um den Versuch zu absolvieren (Abbildung 12). Die Probanden mit höherem Corsi Span brauchten also weniger Zeit zum Memorieren der Symbole, bis sie zur nächsten Spalte wechselten. Da sie jedoch mit leichter Tendenz auch mehr Blickwechsel

vollzogen, könnte die geringe mittlere Verweildauer auch bedeuten, dass sie nicht weniger Zeit brauchten, um dieselbe Anzahl an Symbolen zu memorieren, sondern dass sie sich weniger Symbole merkten, bis sie den nächsten Blickwechsel vollzogen.

Der  $T_i$  wurde berechnet, um die Zeit zu erhalten, welche die Probanden benötigten, um ein Symbol zu enkodieren. Signifikant negativ korrelierte  $T_i$  mit zunehmendem Corsi Span (Tabelle 3, Abbildung 15). Die Probanden mit höherem Corsi Span brauchten also eine geringere Zeit, um ein Symbol zu enkodieren, als die Probanden mit niedrigerem Corsi Span. Sie merkten sich aufgrund der höheren Anzahl an Blickwechseln also nicht, wie eben vermutet, weniger Symbole, bis sie einen Blickwechsel vollzogen, sondern brauchten zum Enkodieren weniger Zeit. Dabei brauchten sie für komplexe Symbole (Form) etwas mehr Zeit als für simple (Abbildung 15), was an der erhöhten Arbeitsgedächtnisnutzung bei den komplexen Symbolen liegt.

Zwischen der mittleren Verweildauer und dem Operation Span (Abbildung 14) und  $T_i$  und dem Operation Span (Abbildung 17) waren fast waagerechte Korrelation zu sehen. Der Operation Span steht also in keinem Zusammenhang zu der mittleren Verweildauer und  $T_i$ . Der Operation Span-Test als komplexester der Vorversuche untersucht u.a. die exekutive Aufmerksamkeit der Probanden. Je höher der Operation Span, desto besser konnte ein Proband seine Aufmerksamkeit und andere Arbeitsgedächtnisprozesse kontrollieren und auf bestimmte Stimuli lenken. Deshalb wäre beim Operation Span eine negative Korrelation mit der mittleren Verweildauer und  $T_i$  zu erwarten gewesen. Da die Probanden mit hohem Operation Span ihre Aufmerksamkeit auf die zu memorierenden Symbole lenken konnten, ohne sich ablenken zu lassen, wäre zu erwarten gewesen, dass sie weniger Zeit zum Enkodieren brauchten. Jedoch beansprucht der Operation Span-Test nicht nur das Arbeitsgedächtnis, sondern z.B. auch die Rechenfähigkeit. So ist ein Proband vielleicht dazu in der Lage, seine Aufmerksamkeit größtenteils auf das Merken der Buchstaben zu lenken, wird dabei jedoch gestört, da es ihm schwer fällt, die Rechenaufgaben zu lösen. Unter den Probanden mit hohem Operation Span gibt es so vielleicht Probanden, denen das Rechnen sehr leicht fällt, die Aufmerksamkeitskontrolle jedoch weniger. Diese Probanden hätten aufgrund der geringen Störung des Memorierens im Endeffekt einen höheren Operation Span.

Wie aus zahlreichen anderen Studien bekannt ist, bedeutet ein hoher Corsi Span eine hohe passive räumliche Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses (z.B. Vecchi & Cornoldi, 1999). Die Korrelation zeigt, dass wohl auch die CVS-Aufgabe des Hauptversuches das passive räumliche Arbeitsgedächtnis beansprucht. Offenbar befähigt ein hoher Corsi Span die Probanden jedoch auch dazu, einen Stimulus schnell zu enkodieren. Zwischen dem Corsi Span und der CVS-Aufgabe ist also eine Art Span-Kognition-Korrelation zu sehen. Bei diesen Korrelationen deuten die Ergebnisse des Span-Tests auf kognitive Prozesse, wie z.B. logisches Denken oder Verständnis (z.B. Ackerman et al., 2005). In diesem Fall deutet ein hoher Corsi Span auf die Präferenz zur Akquisitionsstrategie (geringe mittlere Verweildauer, hohe Anzahl an Blickwechseln).

Sowohl zwischen dem n-back-Test und dem Hauptversuch und dem Operation Span-Test und dem Hauptversuch konnten keine Span-Kognition-Korrelationen gefunden werden. Wenn angenommen werden kann, dass der Hauptversuch tatsächlich ein Kognitions-Test ist, dann schienen der n-back-Test und der Operation Span-Test nicht die kognitiven Prozesse angesprochen zu haben, die auch in der CVS-Aufgabe genutzt wurden. Vermutlich beanspruchten die beiden Vorversuche also Bereiche und Funktionen des

Arbeitsgedächtnisses, die nicht für den Hauptversuch relevant waren. Dass keine signifikanten Korrelationen zwischen dem n-back-Test und dem Vorversuch und dem Operation Span-Test und dem Vorversuch zu verzeichnen waren, könnte jedoch auch an der geringen Anzahl an Probanden liegen. Aufgrund des Zeitlimits zur Durchführung dieser Studie war es allerdings nicht möglich, mehr Probanden zu testen.

Laut der ‚strategy affordance hypothesis‘ (Bailey et al., 2008) existiert eine Span-Kognition-Korrelation dann, wenn sowohl im Span-Test als auch im Kognitions-Test dieselben Strategien beansprucht werden. Bei der Korrelation zwischen Corsi-Test und der CVS-Aufgabe könnte dies das Enkodieren passiver räumlicher Stimuli sein. Bei einer Span-Kognition-Korrelation zwischen dem Operation Span und der CVS-Aufgabe müsste die Verbindung in beiden Versuchen z.B. im Paar-assoziertes Lernen (Richardson et al., 1998) oder der freien Wiedergabe von einer Liste von Wörtern oder Buchstaben zu finden sein (Hertzog et al., 1998). Dass der Operation Span mit keiner der Variablen des Hauptversuches korreliert, deutet jedoch darauf hin, dass im Operation Span-Test nicht dieselben Strategien gefordert wurden wie bei der CVS-Aufgabe, bei der es darum ging, Stimuli zu enkodieren, zu halten und zu vergleichen. Ebensolche Strategien sollten jedoch auch beim n-back-Test angewendet werden. Auch hier müssen die Buchstaben enkodiert und über bis zu zwei Buchstaben hinweg gehalten werden, bis sie mit dem Buchstaben n Schritte zuvor verglichen werden können. Allerdings gab es zwischen dem  $d'$ (gesamt), der Variable des n-back-Tests, und den Variablen des CVS-Hauptversuchs keinerlei Korrelationen. Die Daten streuten sehr stark. Möglicherweise lag der Unterschied darin, dass die Symbole bei der CVS-Aufgabe passiv gehalten wurden, um sie mit dem jeweiligen Symbol in der anderen Spalte zu vergleichen, und die gehaltenen Informationen beim n-back-Test ständig aktiv durch weitere Buchstaben beeinflusst wurden. Dadurch könnten unterschiedliche Bereiche des Arbeitsgedächtnisses beansprucht worden sein.

Innerhalb der Vorversuche gab es keinerlei signifikante Korrelationen (Daten nicht gezeigt). Schon Jaeggi et al. (2010a,b) oder Kane et al. (2007) hatten herausgefunden, dass ‚complex span‘-Tests nicht mit dem n-back-Test korrelieren. Dies könnte darauf basieren, dass im Operation Span-Test und dem n-back-Test verschiedene Prozesse gefordert sind. Beim Operation Span-Test ist es die korrekte Wiedergabe der Buchstaben, beim n-back-Test ist es das Erkennen des passenden Buchstabens. Außerdem konnte gezeigt werden, dass ein regelmäßiges Arbeitsgedächtnistraining mit n-back-Tests zu keiner erhöhten Leistung in ‚complex span‘-Tests führte (z.B. Chooi & Thompson, 2012). Daneman & Merikle (1996) und Unsworth & Engle (2007) fanden heraus, dass ‚complex span‘-Tests mit Tests korrelierten, die höhere kognitive Fähigkeiten beanspruchten, wie Leseverständnis, logisches Denken oder mathematische Leistungen.

#### 4.3 Ausblick

Um zu definieren, ob und wie das Arbeitsgedächtnis mit dem unterschiedlichen Strategieverhalten der Probanden im Hauptversuch zusammenhängt, müssen weitere Tests durchgeführt werden. Glaubt man der ‚strategy affordance hypothesis‘, so sollten in den Vorversuchen dieselben Strategien gefordert werden wie im Hauptversuch. Für die Korrelation zwischen dem Corsi-Test und dem Hauptversuch könnte das Enkodieren räumlicher Stimuli oder zutreffender das passive Encodieren und Halten der Stimuli ausschlaggebend gewesen sein. Um daran anzuknüpfen und diese Hypothese zu überprüfen, könnte ein weiterer Vorversuch gewählt werden, der einzig das passive Halten und Reproduzieren von Informationen berücksichtigt. Passend dafür wäre ein ‚recall‘-Test,

bei dem die Probanden dazu aufgefordert werden, z.B. eine Reihe von Wörtern oder Zahlen zu memorieren und zu reproduzieren. Um die Aufmerksamkeitskontrolle in einem Vorversuch zu behandeln, könnte der Stroop-Test (Stroop, 1935) verwendet werden. Bei dem Test werden die Probanden dazu aufgefordert, die Schriftfarbe eines Wortes wiederzugeben. Allerdings sind die Wörter selbst Farben, was zu Interferenzeffekten führen kann. Z.B. ist das Wort ‚grün‘ in roter Schrift geschrieben. Reproduziert werden muss dann ‚rot‘. Der Stroop-Test zählt zu den simplen Arbeitsgedächtnis-Tests. Um zu untersuchen, ob der Hauptversuch mit einem noch komplexeren Vorversuch als dem n-back-Test oder dem Operation Span-Test korreliert, könnte der ‚Wisconsin card sorting‘-Test (Grant & Berg, 1948) verwendet werden. In dem Versuch werden den Probanden Karten mit Formen (Herz, Pik, Karo, Kreuz) gezeigt. Die Karten unterscheiden sich in der Farbe der Formen, der Anzahl der Formen und der Anordnung der Formen. Die Probanden werden aufgefordert, die Karten in zwei Stapel zu sortieren, wobei ihnen nicht mitgeteilt wird, nach welcher Dimension sie die Karten sortieren sollen. Der Versuchsleiter sagt den Probanden jedoch, ob sie die Karten richtig aufgeteilt haben oder nicht. Während des Versuchs werden die Regeln für das korrekte Sortieren jedoch geändert und der Proband muss die neuen Regeln herausfinden, um die Karten richtig zu sortieren. Verlässt man sich allerdings auf die Hypothese von Daneman & Merikle (1996) oder Unsworth & Engle (2007), komplexe Span-Test korrelierten mit Tests, die höhere kognitive Fähigkeiten beanspruchten, so würde man nicht erwarten, dass der Wisconsin card sorting-Test mit dem Hauptversuch korreliert, da dort ‚nur‘ eine vergleichende visuelle Suche gefordert ist.

Bestenfalls würde man Vorversuche finden, die untereinander nicht korrelieren, allerdings alle signifikante Korrelationen mit dem Hauptversuch zeigen. Somit hätte man verschiedene Bereiche des Arbeitsgedächtnisses identifiziert, die auch im Hauptversuch gebraucht werden oder mit den im Hauptversuch aktiven Bereichen in Verbindung stehen. Damit könnten Arbeitsgedächtnisbereiche oder –funktionen definiert werden, die Aufschluss darüber geben, ob der Proband im Hauptversuch die Memorierungs- oder die Akquisitionstrategie präferiert.

## Literaturverzeichnis

- Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2005). Working memory and intelligence: The same or different constructs?. *Psychological bulletin*, *131*(1), 30.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of learning and motivation*, *2*, 89-195.
- Awh, E., & Jonides, J. (2001). Overlapping mechanisms of attention and spatial working memory. *Trends in cognitive sciences*, *5*(3), 119-126.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory?. *Trends in cognitive sciences*, *4*(11), 417-423.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation*, *8*, 47-89.
- Baddeley, A. D., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *14*(6), 575-589.
- Bailey, H., Dunlosky, J., & Kane, M. J. (2008). Why does working memory span predict complex cognition? Testing the strategy affordance hypothesis. *Memory & Cognition*, *36*(8), 1383-1390.
- Ballard, D., Hayhoe, M., & Pelz, J. (1995). Memory representations in natural tasks. *Cognitive Neuroscience, Journal of*, *7*(1), 66-80.
- Bays, P. M., Catalao, R. F., & Husain, M. (2009). The precision of visual working memory is set by allocation of a shared resource. *Journal of Vision*, *9*(10), 7.
- Brandimonte, M. A., Hitch, G. J., & Bishop, D. V. (1992). Verbal recoding of visual stimuli impairs mentalimagetransformations. *Memory & Cognition*, *20*(4), 449-455.
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage*, *5*(1), 49-62.
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: their structure, growth, and action*.
- Chooi, W. T., & Thompson, L. A. (2012). Working memory training does not improve intelligence in healthy young adults. *Intelligence*, *40*(6), 531-542.
- Corsi, P. M. (1973). *Human memory and the medial temporal region of the brain* (Doctoral dissertation, ProQuest Information & Learning).
- Cowan, N. (1997). *Attention and memory*. Oxford University Press.



- Daneman, M., & Merikle, P. M. (1996). Working memory and language comprehension: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, *3*(4), 422-433.
- Darwin, C. J., Turvey, M. T., & Crowder, R. G. (1972). An auditory analogue of the Sperling partial report procedure: Evidence for brief auditory storage. *Cognitive Psychology*, *3*(2), 255-267.
- Fan, J., McCandliss, B. D., Fossella, J., Flombaum, J. I., & Posner, M. I. (2005). The activation of attentional networks. *Neuroimage*, *26*(2), 471-479.
- Fuster, J. M. The prefrontal cortex: Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe, 1997. *Raven, New York*.
- Fuster, J. M., & Bressler, S. L. (2012). Cognit activation: a mechanism enabling temporal integration in working memory. *Trends in cognitive sciences*, *16*(4), 207-218.
- Grant, D. A., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of experimental psychology*, *38*(4), 404.
- Hardiess, G., Basten, K., & Mallot, H. A. (2011). Acquisition vs. Memorization Trade-Offs Are Modulated by Walking Distance and Pattern Complexity in a Large-Scale Copying Paradigm. *PloS one*, *6*(4), e18494.
- 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*, *8*(1), 7.
- Hardiess, G. & Mallot, H. A. (submitted). Allocation of cognitive resources in comparative visual search - individual and task dependent effects
- Hayhoe, M. M., Bensinger, D. G., & Ballard, D. H. (1998). Task constraints in visual working memory. *Vision research*, *38*(1), 125-137.
- Hertzog, C., McGuire, C. L., & Lineweaver, T. T. (1998). Aging, attributions, perceived control, and strategy use in a free recall task. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *5*(2), 85-106.
- Irwin, D. E., & Andrews, R. V. (1996). Integration and accumulation of information across saccadic eye movements. *Attention and performance XVI: Information integration in perception and communication*, *16*, 125-155.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(19), 6829-6833.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Perrig, W. J., & Meier, B. (2010a). The concurrent validity of the N-back task as a working memory measure. *Memory*, *18*(4), 394-412.

- Jaeggi, S. M., Studer-Luethi, B., Buschkuhl, M., Su, Y. F., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2010b). The relationship between n-back performance and matrix reasoning—implications for training and transfer. *Intelligence*, *38*(6), 625-635.
- Kane, M. J., Conway, A. R., Miura, T. K., & Colflesh, G. J. (2007). Working memory, attention control, and the n-back task: A question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *33*(3), 615.
- Keppel, G., & Underwood, B. J. (1962). Proactive inhibition in short-term retention of single items. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *1*(3), 153-161.
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of experimental psychology*, *55*(4), 352.
- Kosslyn, S. M. (2005). Mental images and the brain. *Cognitive Neuropsychology*, *22*(3-4), 333-347.
- Lewandowsky, S., Oberauer, K., Yang, L. X., & Ecker, U. K. (2010). A working memory test battery for MATLAB. *Behavior Research Methods*, *42*(2), 571-585.
- Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature neuroscience*, *17*(3), 347-356.
- Merikle, P. M. (1980). Selection from visual persistence by perceptual groups and category membership. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*(3), 279.
- 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.
- Peterson, L., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of experimental psychology*, *58*(3), 193.
- Pomplun, M., Sichelschmidt, L., Wagner, K., Clermont, T., Rickheit, G., & Ritter, H. (2001). Comparative visual search: A difference that makes a difference. *Cognitive Science*, *25*(1), 3-36.
- Quinn, J. G., & McConnell, J. (2006). The interval for interference in conscious visual imagery. *Memory*, *14*(2), 241-252.
- Richardson, J. T. (1998). The availability and effectiveness of reported mediators in associative learning: A historical review and an experimental investigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, *5*(4), 597-614.
- Simons, D. J., & Levin, D. T. (1997). Change blindness. *Trends in cognitive sciences*, *1*(7), 261-267.
- Simons, D. J., Franconeri, S. L., & Reimer, R. L. (2000). Change blindness in the absence of a visual disruption. *Perception-London*, *29*(10), 1143-1154.

Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological monographs: General and applied*, 74(11), 1.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6), 643.

Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent?. *Journal of memory and language*, 28(2), 127-154.

Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). On the division of short-term and working memory: an examination of simple and complex span and their relation to higher order abilities. *Psychological bulletin*, 133(6), 1038.

van den Berg, R., Shin, H., Chou, W. C., George, R., & Ma, W. J. (2012). Variability in encoding precision accounts for visual short-term memory limitations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22), 8780-8785.

Vecchi, T., & Cornoldi, C. (1999). Passive storage and active manipulation in visuo-spatial working memory: Further evidence from the study of age differences. *European Journal of Cognitive Psychology*, 11(3), 391-406.

Wilken, P., & Ma, W. J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, 4(12), 11.

Multi-dimensional N-Back Software: Copyright (c) 2011 Nick Penaranda, George Mason University (<https://github.com/nickpenaranda>)

## Anhang

Im Anhang befindet sich die Versuchsanleitung zum Hauptversuch, die den Probanden zu Beginn des Hauptversuches vorgelegt wurde.

# Vergleichende Visuelle Suche

## 1. Aufgabe

- Ihre Aufgabe ist es, in jedem Durchlauf zwei (fast) identische Spalten, die jeweils 24 Symbole enthalten, auf Unterschiede zu überprüfen.
- Eine der beiden Spalten ist dabei immer durch eine graue Maske verdeckt, welche Sie während der Suchaufgabe durch Klicken mit der Maus verschieben können.
- In jedem Durchlauf müssen entweder **ein ODER zwei** Fehler (d.h. nicht identische Symbole) gefunden werden.
- Es gibt zwei Arten von Durchgängen:
  - a) alle Objekte unterscheiden sich nur in der Form
  - b) alle Objekte unterscheiden sich nur in der FarbeD.h. es gibt entweder nur Formfehler oder nur Farbfehler zu finden!
- Des Weiteren gibt es drei Verzögerungsstufen bzgl. der Zeit die vergeht bis sich (nach dem Mausclick) die Maske verschiebt (0, 0.5 und 1 s).

## 2. Ablauf

- Sie absolvieren insgesamt 36 Durchläufe.
- Nach 18 Durchläufen gibt es eine kleine Pause.
- Zu Beginn jedes Durchlaufs wird in der Mitte des Bildschirms ein Kreuz für 3 Sekunden angezeigt, welches fixiert werden soll bis die Suchaufgabe beginnt.
- Um die Sicht auf die verdeckte Spalte freizugeben drücken Sie bitte
  - ... **die rechte Maustaste um die rechte Hälfte freizugeben!**
  - ... **die linke Maustaste um die linke Hälfte freizugeben!**

<ul style="list-style-type: none"><li>• Während jedes Durchlaufs sprechen Sie bitte drei verschiedene Silben (<i>la-le-lu</i>) leise vor sich her.</li></ul>
--

- Drücken Sie die Leertaste **sobald Sie alle Fehler gefunden** haben (der Durchlauf wird daraufhin beendet) und nennen Sie die **Anzahl der Fehler** (ein oder zwei) dem Versuchsleiter.
- Danach folgt der nächste Durchlauf (beginnend mit dem Fixationskreuz).

## 3. Übungsdurchlauf

- Bevor das Experiment beginnt, absolvieren Sie 4 Übungsdurchläufe.
- Bei Fragen wenden Sie sich bitte an die Versuchsleiter.

**Bitte führen Sie die Suchaufgabe so zügig und so genau wie möglich aus!**

Viel Spaß beim Suchen ☺