

**Steigerung der Arbeitsgedächtnisleistung bei Verwendung  
bimodaler gegenüber unimodaler Stimuli  
in einem n-back Paradigma**

**Bachelorarbeit  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität Tübingen**

**vorgelegt von  
Stefanie Erhardt**

**Tübingen, April 2015**

**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 08.04.2015**

## **Danksagung**

Mein Dank richtet sich an den gesamten Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft für die lockere und freundliche Arbeitsatmosphäre, in der man sich sofort wohl gefühlt hat. Ich danke Herrn Prof. Dr. Hanspeter Mallot, der sich regelmäßig Zeit für Bachelorbesprechungen und Fragen nahm. Einen besonderen Dank möchte ich an Dr. Gregor Hardiess richten, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand und sich immer Zeit für offene Fragen genommen hat.

Ganz besonders möchte ich auch meinen Eltern danken, die mich stets unterstützt und ermutigt haben, ohne sie wäre das alles nicht möglich gewesen. Ebenso danke ich allen Versuchspersonen, die sich Zeit für die Teilnahme an meinem Experiment genommen haben.



<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1. Arbeitsgedächtnismodelle .....	1
1.1.1. Das Gedächtnismodell nach Atkinson und Shiffrin .....	1
1.1.2. Das Gedächtnismodell nach Miller et al. ....	2
1.1.3. Das Arbeitsgedächtnismodell nach Cowan.....	2
1.1.4. Das Arbeitsgedächtnismodell nach Ericsson und Kintsch .....	3
1.1.5. Das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley und Hitch.....	3
1.2. Limitierungen des Arbeitsgedächtnisses .....	4
1.2.1. Kapazität des Arbeitsgedächtnisses .....	5
1.2.2. Verlust über die Zeit.....	5
1.3. Einfluss Multimodaler Stimuli auf das Arbeitsgedächtnis .....	6
1.4. Multimodale Integration im Gehirn .....	7
<b>2. MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>10</b>
2.1. Versuchspersonen .....	10
2.2. Generelle Versuchsdurchführung .....	10
2.3. Versuchsaufbau .....	11
2.4. Stimuli.....	12
2.5. Versuchsablauf .....	15
2.6. Datenauswertung.....	18
<b>3. ERGEBNISSE</b> .....	<b>19</b>
3.1. Genereller Einfluss der Faktoren Modalität und Block auf die Arbeitsgedächtnisleistung ..	19
3.2. Faktorstufeneffekte bei Modalität und Block auf $d'$ .....	20
3.3. Einfluss der Modalität und des Blocks auf die Reaktionszeit .....	24
3.4. Einfluss der Reaktionszeit auf den Sensitivitätsindex $d'$ .....	26
<b>4. DISKUSSION UND AUSBLICK</b> .....	<b>27</b>
4.1. Einfluss der bimodalen Modalität auf die Arbeitsgedächtnis-leistung.....	28
4.1.1. Einfluss der Modalität auf den Sensitivitätsindex $d'$ .....	28
4.1.2. Einfluss der Modalität auf die Reaktionszeit .....	29

<b>4.2. Einfluss der Messwiederholungen auf <math>d'</math> und die Reaktionszeit</b> .....	<b>30</b>
4.2.1. Einfluss der Messwiederholung auf $d'$ .....	30
4.2.2. Einfluss der Messwiederholung auf die Reaktionszeit .....	31
<b>4.3. Korrelation der Arbeitsgedächtnisparameter</b> .....	<b>31</b>
<b>4.4. Ausblick</b> .....	<b>32</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>33</b>
<b>ANHANG A: INSTRUKTION 2-BACK TASK</b> .....	<b>35</b>
<b>ANHANG B: HIT-VERTEILUNG</b> .....	<b>37</b>
<b>ANHANG C: FRAGEBOGEN</b> .....	<b>38</b>

## Zusammenfassung

Vorherige Studien haben bereits gezeigt, dass die Präsentation von semantischen, bimodalen Stimuli die Effektivität des Arbeitsgedächtnisses signifikant steigerte. Das Ziel dieser Arbeit war es, mittels eines *2-back* Task ebenfalls eine signifikante Verbesserung des Arbeitsgedächtnisses bei Verwendung von non-semantischen, bimodalen (visuell-auditiv gekoppelt) Stimuli im Vergleich zu unimodalen Stimuli (visuell oder auditiv) zu finden. Das Versuchsdesign bestand aus einem *within-subject* Design, d.h. jede Versuchsperson musste das Experiment in allen drei Modalitäten (visuell, auditiv und bimodal) durchlaufen. Die Quantifizierung der Arbeitsgedächtnisleistung erfolgte mit Hilfe der Berechnung des Sensitivitätsindex  $d'$  (gesprochen: *d-prime*) und der Messung der Reaktionszeit der Versuchspersonen.

Durch diesen Untersuchungsansatz konnten signifikant höhere  $d'$ -Werte in der bimodalen Modalität gegenüber beider unimodalen Modalitäten gefunden werden. Die Reaktionszeiten in der auditiven und der bimodalen Modalität waren signifikant höher als in der visuellen Modalität. Die Ergebnisse sprechen für ein integrierendes Arbeitsgedächtnissystem, welches Eingänge aus verschiedenen Modalitäten zusammenführen kann um dadurch die allgemeine Leistung des Arbeitsgedächtnisses zu erhöhen. Ebenso konnte für jede Modalität ein Trainingseffekt über das gesamte Experiment detektiert werden. Die Ergebnisse dieser Studie stützen die Hypothese, dass auch die Präsentation von non-semantischen, bimodalen Stimuli die Arbeitsgedächtnisleistung signifikant steigern kann.



# 1. Einleitung

Wie funktioniert unser Gedächtnis und wie viele Ebenen des Gedächtnisses gibt es? Wissenschaftliche Studien, welche sich mit dieser Fragestellung beschäftigen, gehen zurück auf Hermann Ebbinghaus. Er führte bereits 1885 eine Studie durch, in welcher er sein eigenes Erlernen und Vergessen von neuen Informationen untersuchte. Ebbinghaus stellte fest, dass flüchtig erfasste Informationen später nicht mehr aus dem Gedächtnis abgerufen werden können, vielmehr benötigt man für ein beständiges Erinnern meist eine nochmalige Wiederholung. James (1890) unterschied schon zwischen Primärgedächtnis, welches aktuelle Bewusstseinsinhalte speichert, und einem sekundären Gedächtnis, welches eine weitaus größere Menge an Information über das ganze Leben speichert. Im Langzeitgedächtnis (LTM) werden Repräsentationen von früheren Ereignissen und damit eine unzählbare Menge an Wissen gespeichert (Cowan, 2008).

## 1.1. Arbeitsgedächtnismodelle

### 1.1.1. Das Gedächtnismodell nach Atkinson und Shiffrin

Laut Atkinson und Shiffrin (1968) besteht das Gedächtnis aus einem sensorischen Register, einem Kurzzeitspeicher (STS) und einem Langzeitspeicher (LTS). Im sensorischen Register wird die Information nur sehr kurz gespeichert, erstmals verarbeitet und in den Kurzzeitspeicher weitergeleitet. Im STS wird die Information für rund 30 s oder kürzer gespeichert, falls sie nicht wiederholt wird. Während ein Teil der Information im STS verbleibt, werden andere Teile der Information an den LTS weitergeleitet. Dieser stellt einen dauerhaften Aufbewahrungsort dar (Atkinson & Shiffrin, 1968).

### 1.1.2. Das Gedächtnismodell nach Miller et al.

Der Begriff Arbeitsgedächtnis, engl. *working memory*, wurde erstmals von Miller, Galanter und Pribram in den 1960er Jahren benutzt. Das Arbeitsgedächtnis ist ihrer Ansicht nach nötig, um Informationen von externen Stimuli in einer aktiven Form im Gedächtnis zu behalten, um damit ein bestimmtes Verhaltensziel zu erreichen. Dies bedeutet, dass das Arbeitsgedächtnis nötig ist, um ein bestimmtes Verhalten zu planen und auszuführen. Zum Erreichen eines primären Verhaltenszieles stecken wir uns nach Ansicht von Miller et al. (1986) Unterziele, welche wir Schritt für Schritt abarbeiten. Um das „Hauptziel“ zu erreichen, brauchen wir aber noch ein sekundäres- bzw. Langzeitgedächtnis, um die hierarchische Reihenfolge der Unterziele zu repräsentieren. Die Unterziele werden aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen und der Reihe nach im Arbeitsgedächtnis repräsentiert. So ist es möglich auch eine komplexe Aufgabe durch dieses Bilden und Abrufen von Unterzielen zu lösen (Miller et al., 1986).

### 1.1.3. Das Arbeitsgedächtnismodell nach Cowan

Nach dem Modell von Cowan (1988) stellt das Arbeitsgedächtnis kein separates System dar, sondern ist als ein Teil des Langzeitgedächtnisses anzusehen. Dieser Ansicht nach sind Repräsentationen des Arbeitsgedächtnisses Untereinheiten der Langzeitgedächtnisrepräsentationen und sind in zwei Ebenen organisiert. Die erste Ebene besteht aus aktivierten Langzeitgedächtnisrepräsentationen und besitzt kein Kapazitätslimit. Die zweite Ebene, welche als Fokus der Aufmerksamkeit (engl. *focus of attention*) bezeichnet wird, ist als Kapazitätslimit anzusehen und kann gleichzeitig bis zu vier aktivierte Repräsentationen aufrecht erhalten (Cowan, 1988). Oberauer (2002) fügte eine dritte Komponente hinzu, welcher ein kleinerer Fokus der Aufmerksamkeit zugeschrieben wird und diese somit nur ein Element behalten kann. Diese dritte Komponente ist in einem vier-Elemente Fokus eingebettet. Dies bedeutet, dass zuerst nur ein Element aus diesen vier Elementen herausgenommen und verarbeitet werden kann. Erst dann wird der Aufmerksamkeitsfokus ein anderes der vier Elemente gezogen (Oberauer, 2002).

#### 1.1.4. Das Arbeitsgedächtnismodell nach Ericsson und Kintsch

Ericsson und Kintsch stellten 1995 die Langzeit-Arbeitsgedächtnis (LTWM) Theorie auf. Eine Kodierung von Informationen erfolgt hier durch wissensbasierte Assoziationen, welche bestimmte Elemente mit anderen Elementen oder mit Langzeitgedächtnis-Mustern, beziehungsweise Schemas verknüpft. Diese Assoziationen erlauben eine integrierte Repräsentation der Information im Langzeitgedächtnis (Ericsson & Kintsch, 1995). Das LTWM stellt eine Weiterentwicklung der *skilled memory* Theorie dar. Diese besagt, dass Informationen durch zahlreiche und elaborierte Hinweise im Zusammenhang mit vorherigem Wissen verschlüsselt werden. Ebenso sind die Wissens-Abrufstrukturen wichtig - hier werden während des Verschlüsselungsvorgangs die Abrufreize mit dem Erinnerten assoziiert. Dadurch ist es möglich, die Informationen zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzurufen. Die Zeit, welche zur Kodierung und für den Abrufvorgang benötigt wird, sinkt mit steigender Praxis (Gobet, 2000).

#### 1.1.5. Das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley und Hitch

Baddeley und Hitch führten 1974 das Multikomponenten Modell des Arbeitsgedächtnisses ein. Dieses ist das bis heute einflussreichste Modell des Arbeitsgedächtnisses. Laut diesem Modell sind zwei *slave systems* für die Aufrechterhaltung von Informationen im Arbeitsgedächtnis verantwortlich. Demnach besteht es aus einer phonologischen Schleife, engl. *phonological loop*, für die Bearbeitung verbaler Information und dem visuell-räumlichen Notizblock, engl. *visuospatial sketchpad*, welcher visuelle und räumliche Informationen speichert. Ebenfalls gibt es einen zentralen Speicher, welche abstrakte Informationen speichert und eine Kontrolleinheit darstellt (Baddeley, Hitch, 1974).

Die phonologische Schleife speichert Sprachinformationen, welche aber ohne inneres Sprechen, engl. *rehearsal*, schon nach wenigen Sekunden wieder zerfällt. Es können aber auch visuelle Sprachreize in einen phonologischen Code umgewandelt und somit in der phonologischen Schleife gespeichert werden. Durch den visuell-räumlichen Notizblock ist es möglich, eine temporäre Aufrechterhaltung und Manipulation von visuell-räumlichen Informationen zu erhalten. Er spielt eine wichtige Rolle in der räumlichen Orientierung und in der Lösung von visuell-räumlichen Problemen (Baddeley, 2000).

1986 modifizierte Baddeley das ursprüngliche Modell. Demnach findet die Speicherung von Informationen nur noch im visuell-räumlichen Notizblock und in der phonologischen Schleife statt. Der zentrale Speicher selbst stellt nun kein Gedächtnis mehr dar. Die nun als zentrale

Exekutive bezeichnete Einheit ist für die Verarbeitung und die Koordination der *slave systems* verantwortlich. Sie lenkt die Aufmerksamkeit auf relevante Informationen, unterdrückt irrelevante Informationen und koordiniert kognitive Prozesse, sobald mehr als eine Aufgabe zur selben Zeit ausgeführt werden muss (Baddeley, 1986).

Im Jahr 2000 erweiterte Baddeley das Modell nochmals, indem er den episodischen Puffer hinzufügte. Dieser stellt einen zeitlichen Speicher dar und bindet Informationen in einheitlichen episodischen Repräsentationen. Der episodische Puffer stellt darüber hinaus die Verbindung zum Langzeitgedächtnis her (Baddeley, 2000; siehe Abbildung 1).

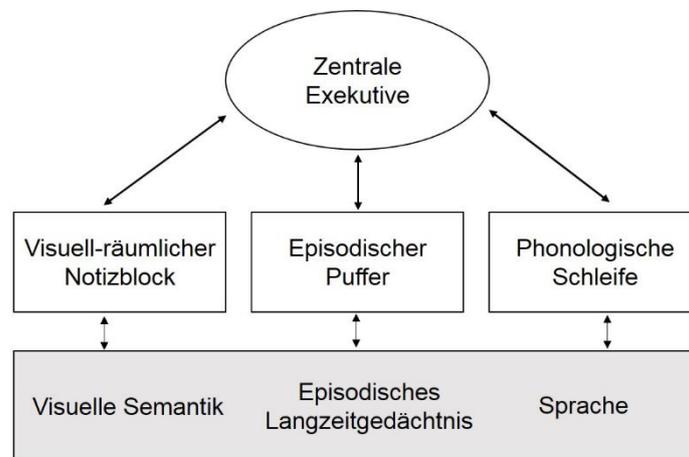


Abbildung 1: schematische Darstellung des Multikomponentenmodells des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley und Hitch. Die zentrale Exekutive kontrolliert den visuell-räumlichen Notizblock, die phonologische Schleife und den episodischen Puffer. Die Elemente des Arbeitsgedächtnisses interagieren mit Repräsentationen bzw. Informationen aus dem Langzeitgedächtnis. Geändert nach Baddeley (2000).

## 1.2. Limitierungen des Arbeitsgedächtnisses

Es gibt zwei Arten die das Arbeitsgedächtnis limitieren. Dies ist zum einen die Kapazität, d.h. wie viele Elemente gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gehalten werden können und zum anderen die Zeitdauer, in welcher Repräsentationen (ohne Auffrischung) im Arbeitsgedächtnis verbleiben.

### 1.2.1. Kapazität des Arbeitsgedächtnisses

Die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses ist begrenzt. Über die Höhe der Arbeitskapazität herrschen verschiedene Ansichten. Miller postulierte 1956 in seiner Arbeit die „*magical number seven plus or minus two*“, dass die Kapazität bei Erwachsenen bei sieben plus / minus zwei *chunks* liegt. Als *chunk* bezeichnete er das Organisieren und Bündeln von Informationen in sinnvolle Speichereinheiten (Miller, 1956). Broadbent dagegen nimmt an, dass die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses bei nur drei Elementen liegt. Dies ist die Anzahl der Elemente, welche fehlerfrei aus dem Gedächtnis abgerufen werden können (Cowan, 2000). Nach Cowan liegt die Kapazität bei Erwachsenen zwischen drei und fünf Elementen, sofern sie in den Fokus der Aufmerksamkeit gelangen (Cowan, 2000).

Durch Gruppieren von *chunks* in eine sinnvolle Einheit und das hierarchische Anordnen dieser Gruppen ist es möglich, eine höhere Anzahl an Elementen im Arbeitsgedächtnis zu speichern als z.B. die von Cowan angenommenen drei bis fünf Elemente. So können auch komplexere Aufgaben, wie etwa eine schwere mathematische Aufgabe, im Kopf gelöst werden. Doch variiert die Kapazität zwischen Individuen und hängt stark von der kognitiven Leistungsfähigkeit einer Person ab. Es gibt auch Autoren die annehmen, dass die Kapazität nicht ohne weiteres durch eine bestimmte Anzahl an *chunks* oder Elemente festgelegt werden kann (Cowan, 2008).

Der von Baddeley et al. (1975) eingeführte Wortlängeneffekt besagt, dass die Gedächtnisspanne mit der Zeit korreliert die gebraucht wird, um ein Wort auszusprechen. So können zum Beispiel mehr dreisilbige Wörter im Arbeitsgedächtnis gespeichert und wieder abgerufen werden, als fünfsilbige. Ebenso ist die Wahrscheinlichkeit alle Wörter später korrekt wiederzugeben bei niedrigerer Silbenzahl höher (Baddeley et al., 1975).

### 1.2.2. Verlust über die Zeit

Der Verlust von Informationen über einen Zeitraum wird als *decay* bezeichnet. Cowan nimmt an, dass aktivierte Erinnerungen über die Zeit hinweg limitiert sind, sofern sie nicht wiederholt werden. Für die Limitierung spielt wahrscheinlich die relative Zeit eine größere Rolle als die absolute Zeit (Cowan, 2008).

Es gibt zwei Konzepte die diese Limitierung über die Zeit beschreiben. Eines ist, dass Erinnerungen unaufhaltsam über eine Zeitspanne verschwinden. Das *time-based resource-sharing* Modell (TBRS) beinhaltet, dass Verarbeitung und Erhaltung gewisse Aufmerksamkeit des Arbeitsgedächtnisses erfordern. Ist diese nicht vorhanden, verschwindet der Gedächtnisfad, engl. *memory trace*. Das Vergessen ist also eine Funktion der proportionalen Zeit die durch die Distraktor-Aufgabe belegt wird (kognitive Last). Sind die Distraktoren, also störende oder ablenkende Elemente, relativ groß dann ist die kognitive Last hoch. Dadurch werden mehr Gedächtnisinhalte aus dem Arbeitsgedächtnis gestrichen beziehungsweise vergessen (Barrouillet et al., 2004).

Das andere Konzept besagt, dass Interferenzen dazu führen, Gedächtnisinhalte zu vergessen (Lewandowsky et al., 2008). Lewandowsky und Kollegen haben gezeigt, dass Vergessen durch zu-artikulierendes Material an und aus geschaltet werden kann. Sind die Distraktoren gleich, so lässt sich nach Lewandowsky et al. kein Vergessen nachweisen. Sobald die Distraktoren selbst unterschiedlich sind, lässt sich eine Interferenz im Arbeitsgedächtnis nachweisen, folglich hemmen unterschiedliche Distraktoren das Arbeitsgedächtnis. Was umgekehrt dann bedeutet, dass gleiche Distraktoren mit ins Arbeitsgedächtnis aufgenommen werden und somit die Arbeitsgedächtnisleistung nicht hemmen (Lewandowsky et al., 2008).

### 1.3. Einfluss Multimodaler Stimuli auf das Arbeitsgedächtnis

Die *dual code* Theorie von Allan Paivio (1971) stellt die Hypothese auf, dass das Gedächtnis aus zwei Systemen bestehe, einem verbalen und einem visuellen. Das Sprachsystem speichert linguistische Repräsentationen. Das visuelle oder imaginäre Kodierungssystem speichert und verarbeitet Repräsentationen von non-verbalen Objekten und Ereignissen. Jedoch stehen die zwei Systeme im Informationsaustausch. So können Informationen, die sowohl verbal als auch visuell enkodiert werden können, besser im Gedächtnis bleiben, während abstrakte Informationen nur im verbalen System gespeichert werden können. Für diese abstrakten Informationen, wie zum Beispiel das Wort „Wahrheit“, gibt es keine bildlichen Äquivalente. Die einfach kodierten Repräsentationen verschwinden deshalb leichter aus dem Gedächtnis, als diejenigen Informationen die sowohl bildlich als auch verbal gespeichert werden (Paivio, 1971).

Mayer und Sims (1994) stellten auf Grundlage der *dual code* Theorie nach Paivio (1971) und des Multikomponentenmodells nach Baddeley (2000) die Theorie auf, dass Lernen stark von den präsentierten Modalitäten beeinflusst wird. Kann zu lernendes Material sowohl als Bild (im visuell-räumlichen Notizblock), als auch als Wort (in der phonologischen Schleife) verarbeitet werden, so führt dies zu einer stärkeren Verarbeitung der Information und die Information kann

besser im Gedächtnis gehalten werden. Die Verarbeitung einer Information in zwei separaten Kanälen führt also zu einer verbesserten Gedächtnisleistung (Mayer & Sims, 1994).

Goolkasian und Foos (2005) haben ein Experiment durchgeführt, in welchem Versuchspersonen entweder unimodale Stimuli (geschriebene Wörter, gesprochene Wörter oder Bilder) oder bimodale Stimuli (Bilder und geschriebene Wörter, Bilder und gesprochene Wörter oder geschriebene Wörter und gesprochene Wörter) präsentiert wurden. Während diese aus dem Gedächtnis abrufen werden mussten, waren die Versuchspersonen dazu aufgefordert zu entscheiden, ob mathematische Sätze korrekt sind. Goolkasian und Foos fanden heraus, dass alle bimodal präsentierten Informationen zu einer besseren Arbeitsgedächtnisleistung führten als die unimodalen, wobei audiovisuell präsentierte Informationen am besten verarbeitet und erinnert wurden.

#### **1.4. Multimodale Integration im Gehirn**

Das Arbeitsgedächtnis stellt also eine zentrale kognitive Funktion als Schnittstelle zwischen sensorischer Wahrnehmung, Speicherung und motorischer Aktion dar. Es ist immer aktiv, wenn Informationen über eine gewisse Zeit behalten und manipuliert werden müssen, um eine Verhaltensreaktion zu lenken. Um diese Funktion zu bewerkstelligen muss das Arbeitsgedächtnis in der Lage sein, Informationen verschiedener Modalitäten zu integrieren. Nach Baddeleys Multikomponenten Modell des Arbeitsgedächtnisses können die *slave systems* und die zentrale Exekutive diese verschiedenen Eingänge verarbeiten. Sie sind über den episodischen Puffer mit dem Langzeitgedächtnis verbunden (Baddeley, 2000).

Durch die Integration von mehreren Stimuli ist es möglich ein stattfindendes Ereignis oder dargebotenes Objekt schneller und besser zu detektieren. Das Zusammenwirken zwischen den verschiedenen Sinnen und deren Fusion wird in diesem Zusammenhang als multisensorische Integration bezeichnet. Multisensorische Integration hängt von der Effektivität des Zusammenwirkens von multimodalen Stimuli ab. Multimodale Stimuli sind Reize, die zwei oder mehreren sensorischen Modalitäten ansprechen (Stein & Stanford, 2008). Auf ein einzelnes Neuron bezogen spricht man von multisensorischer Integration, wenn Neuronen bei multimodalen Stimuli signifikant mehr feuern als bei den individuellen Einzelreizen (Meredith & Stein, 1983). Integrierende Neurone, die auf Stimuli, bestehend aus mehreren Modalitäten, antworten können, befinden sich in Regionen des superioren Colliculus und des Kortex. Sie besitzen räumlich korrespondierende rezeptive Felder und können somit, verglichen zu unimodalen Stimuli, eine überadditive Antwort auf multimodale Stimuli des gleichen Ortes zeigen. Werden zum Beispiel zwei verschiedene Stimuli in zeitlicher Nähe zueinander gegeben, kann dies zu einer Steigerung der neuronalen Antwort führen, während

keine Änderung oder sogar eine Unterdrückung der neuronalen Antwort durch räumlich und zeitlich unterscheidbare Stimuli hervorgerufen wird (Stein und Meredith, 1993).

Frassinetti et al. (2002) haben gezeigt, dass durch auditorische Stimuli die Effektivität des visuellen Systems beim Lösen von schwierigen Detektions-Aufgaben gesteigert werden kann. Neurophysiologische und funktionelle bildgebende Verfahren haben hierzu multisensorische Regionen im Kortex von Menschen gefunden. Um sich zum Beispiel an einem Ort zu einer bestimmten Zeit zu orientieren ist es notwendig, dass sich deckungsgleiche Stimuli gegenseitig verstärken und damit zur multisensorischen Integration führen. Ebenso wichtig ist es, dass sich räumlich unterschiedliche Stimuli nicht verstärken beziehungsweise zu einer multisensorischen Verminderung führen (Frassinetti et al., 2002).

Für die Kognition des Menschen spielt das Arbeitsgedächtnis eine zentrale Rolle. Es ist wichtig, dass wir unser Verhalten und unsere Handlungen planen und adäquat ausführen können. Nur durch die Funktionen des Arbeitsgedächtnisses können wir komplexe Inhalte verstehen und verarbeiten. Doch sind viele Aspekte des Arbeitsgedächtnisses noch nicht geklärt. Multisensorische Integration spielt bei der Kognition ebenso eine wichtige Rolle.

Bis jetzt wurde nur ein Arbeitsgedächtnisvorteil für semantische und verbale bimodale Stimuli gefunden. Es ist noch unklar, wie sich bimodale non-semantische und non-verbale Stimuli auf die Arbeitsgedächtnisleistung auswirken. Santangelo et al. (2006) führte einen *n-back* Task mit non-semantischen Stimuli durch. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass sich die Reaktionszeit bei Koppelung von auditiven und visuellen Stimuli, im Vergleich zur Präsentation von rein auditiven oder visuellen Stimuli, verkürzt. Durch die Präsentation von bimodalen Stimuli ist man folglich in der Lage Ereignisse schneller zu detektieren. Es wurde jedoch noch nicht untersucht, ob durch bimodalen Stimuli auch andere Arbeitsgedächtnisleistungen verbessert werden.

Diehl (2013) und Utz (2014) führten daher im Rahmen ihrer Bachelorarbeiten Experimente mit non-semantischen Stimuli durch. Ihr Ziel war es, einen Arbeitsgedächtnisvorteil für bimodale Stimuli zu identifizieren. Es wurde ein *2-back* (Diehl, 2013) und *3-back* (Utz, 2014) Task in einem *between-subject* Design mit jeweils drei Gruppen durchgeführt. Jede Gruppe wurde in der visuellen, auditiven oder in der bimodalen Modalität getestet. Diehl (2013) fand eine Tendenz der verbesserten Arbeitsgedächtnisfunktion für die bimodale Modalität, konnte dies aber nicht mit signifikanten Ergebnissen belegen. Utz (2014) konnte allerdings keinerlei Unterschiede zwischen den uni- und bimodalen Stimuli feststellen. Der dort durchgeführte *3-back* Task hat sich als zu schwierig für die Versuchspersonen herausgestellt, sodass eventuell vorhandene Vorteile in der bimodalen Modalität nicht detektiert werden konnten.

Um die Hypothese zu prüfen, ob die Präsentation von non-semanticen, bimodalen Stimuli im Vergleich zu unimodalen Stimuli, zu einer verbesserten Arbeitsgedächtnisleistung führt, wurde in dieser Arbeit ein *2-back* Task mit non-semanticen Stimuli unter Verwendung eines *within-subject* Designs entwickelt. Mit diesem Design soll ausgeschlossen werden, dass Modalitätspräferenzen der einzelnen Versuchspersonen die Ergebnisse verfälschen. Weiterhin soll somit die hohe Variabilität der Arbeitsgedächtnisleistung zwischen den Versuchspersonen kontrolliert werden.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Versuchspersonen

Am Experiment nahmen 21 freiwillige Versuchsteilnehmer teil (12 weiblich und 9 männlich, mit einem Durchschnittsalter von 23 Jahren). Hierbei handelte es sich fast ausschließlich um Studenten der Eberhard Karls Universität Tübingen und Personen aus dem Bekanntenkreis. Die Versuchspersonen mussten dem Versuch gegenüber naiv sein, um eine Beeinflussung der Daten durch vorheriges Lernen oder Wissen auszuschließen. Die Versuchspersonen wurden randomisiert auf drei Gruppen verteilt (vgl. Tabelle 1).

### 2.2. Generelle Versuchsdurchführung

Der experimentelle Ablauf und die benötigten Stimuli wurden mit Hilfe der Software MATLAB® (R2013b, 32-bit) generiert. Das dafür notwendige Programm wurde freundlicherweise von Herrn Dr. Gregor Hardiess zur Verfügung gestellt.

Die Versuchsteilnehmer mussten einen *n-back* Task mit  $n = 2$  durchführen. Dieses Paradigma wurde ursprünglich von Kirchner (1958) als visuell-räumliche Aufgabe eingeführt. Heute wird ein solches Paradigma oft verwendet, um Arbeitsgedächtnisleistungen zu bestimmen. Im *n-back* Task wird eine Sequenz von Stimuli nacheinander präsentiert und der Proband muss jeweils entscheiden, ob der momentan präsentierte Stimulus identisch ist zu dem  $n$  Stellen zuvor. Jede Versuchsperson musste den *2-back* Task in einer visuellen Modalität, einer auditiven Modalität und einer bimodalen (visuell-auditiv gekoppelt) Modalität ausführen. Das Experiment wurde mit MATLAB® und der Psychophysics Toolbox (Version 3) realisiert. Zu Beginn erschien auf dem Bildschirm eine kurze Instruktion. Der Versuchsteilnehmer konnte das Experiment durch Drücken einer beliebigen Tastaturtaste starten. Zunächst erschien ein Fixationskreuz (Dauer 2 s) auf dem Bildschirm, welches fixiert werden sollte. Danach folgten pro Modalität fünf *2-back* Sequenzen (Blöcke) von jeweils 60 Stimuli (5 Blöcke á 60 Stimuli = 300 Stimuli pro Modalität). Nach jedem Block wurde auf dem Bildschirm ein Hinweis gezeigt, dass der Block beendet wurde. Durch einen weiteren Tastendruck konnte die Versuchsperson mit dem nächsten Block beginnen (genauer Versuchsablauf siehe Abschnitt 2.5. und Abbildung 5). Nach Abschluss einer Modalität konnten die Versuchspersonen vor dem Beginn der nächsten Modalität eine Pause von wenigen Minuten einlegen. Die 21 Versuchsteilnehmer wurden zufällig in drei Gruppen á 7 Personen eingeteilt. Jede Gruppe durchlief eine andere Reihenfolge der drei Modalitäten. Die Bestimmung der Modalitätenreihenfolge erfolgte über

das lateinische Quadrat, dies wird in der statistischen Versuchsplanung angewendet, um die benötigte Anzahl an Versuchspersonen zu minimieren. Es werden nicht alle möglichen Kombinationen getestet, sondern es muss nur jeder Faktor (Modalität) in jeder Gruppe eine andere Position haben (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Versuchsgruppeneinteilung und Reihenfolge der Modalitäten im Versuch. Die Bestimmung der Modalitätenreihenfolge erfolgte über das lateinische Quadrat.*

<b>Gruppennummer</b>	<b>Modalitätsreihenfolge</b>		
<b>Gruppe 1</b>	<i>visuell</i>	<i>auditiv</i>	<i>bimodal</i>
<b>Gruppe 2</b>	<i>bimodal</i>	<i>visuell</i>	<i>auditiv</i>
<b>Gruppe 3</b>	<i>auditiv</i>	<i>bimodal</i>	<i>visuell</i>

Während des Experiments mussten die Versuchsteilnehmer fortlaufend entscheiden, ob der momentane Stimulus dem zwei Stellen zuvor gezeigten entspricht. Das Antwortverhalten der Versuchspersonen wurde über die Computermouse registriert. Wurde der Stimulus als identisch bewertet, musste die linke Maustaste gedrückt werden. War dies nicht der Fall, so musste die rechte Maustaste gedrückt werden. Wurde keine Maustaste gedrückt, so wurde dies als Antwort ‚nicht identischer Stimulus‘ gewertet. Eine Antwort konnte sowohl während der Stimulus Präsentation, als auch während der Pause danach gegeben werden. Die Reaktionszeit zwischen Beginn des Stimulus und der Antwort der Versuchsperson (Maustastendruck) wurde ebenfalls über MATLAB® registriert. Wurden alle fünf Blöcke einer Modalität durchlaufen, erschien ein Hinweis auf dem Bildschirm und die Versuchsperson konnte durch Drücken einer Taste das Experiment verlassen und die Daten wurden durch das Programm gespeichert.

### 2.3. Versuchsaufbau

Der Versuch wurde in einem gesonderten Raum mit gedimmtem Licht durchgeführt. Das Programm lief auf einem Computer mit dem Betriebssystem Windows® 7 und wurde über einen Samsung SyncMaster 931bf Bildschirm mit einer Bildhöhe von 19 Zoll und einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixeln gezeigt. Die Versuchsperson saß ca. 70 cm vom Bildschirm entfernt. Am PC war eine handelsübliche Tastatur und Computermouse angeschlossen. In der auditiven und der bimodalen Bedingung wurden dem Versuchsteilnehmer die akustischen Stimuli mit konstanter Lautstärke über einen Kopfhörer eingespielt.

## 2.4. Stimuli

Für das Versuchsdesign mussten Stimuli in drei verschiedenen Modalitäten generiert werden: visuelle, auditive und bimodale (visuell und auditiv gekoppelte) Stimuli. Es wurden zwölf visuelle Stimuli mittels Adobe Photoshop® CS2 Version 9.0. generiert. Jeder Stimulus bestand aus einem Punktemuster mit jeweils sechs schwarzen Punkten in einem weißen Quadrat von 5 x 5 cm. Die Quadrate wurden unter einem Sehwinkel von 4.09° präsentiert. Die visuellen Stimuli unterschieden sich nur in der Anordnung der sechs Punkte. Die Punkte wurden so arrangiert, dass sie möglichst unbekannt und neu für die Versuchsteilnehmer erschienen und damit keine Assoziationen im Langzeitgedächtnis hervorrufen konnten und nicht verbalisierbar waren. Außerdem sollten sich die 12 Muster voneinander gleich gut unterscheiden lassen. Für die visuelle und die bimodale Bedingung wurden jeweils 6 der Punktemuster verwendet (siehe Abbildung 2).

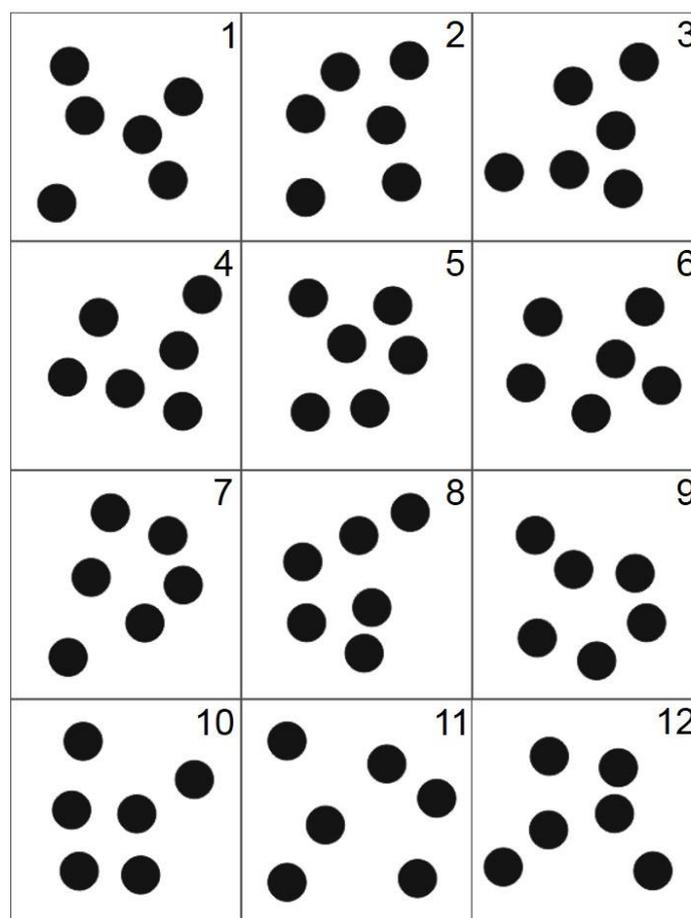


Abbildung 2: Punktemuster als visuelle Stimuli für die visuelle und die bimodale Modalität. Muster 1 – 6 wurden für die visuelle Bedingung verwendet, Muster 7 – 12 für die bimodale Bedingung.

Für die zwölf auditiven Stimuli wurden sechs verschiedene Gitarren- und sechs verschiedene Pianoakkorde verwendet (siehe Spektrogramme in Abbildung 3). Die Akkorde stammten aus der Sounddatenbank freesound.org und wurden mittels der Open-Source-Software Audacity (Version 2.0.6.0) in eine Stereospur umgewandelt und auf eine Dauer von 1,5 Sekunden gekürzt. Die Samplefrequenz der Akkorde betrug bei allen zwölf Akkorden 44100 Hz und Frequenzen oberhalb von 10000 Hz wurden herausgefiltert. Weiterhin wurden bei jedem Akkord die ersten 150 ms eingeblendet (Lautstärkeprofil stieg linear von null auf 100% an) und die letzten 150 ms ausgeblendet (Lautstärkeprofil fiel linear von 100% auf null ab). In der auditiven Bedingung wurden die Gitarrenakkorde und in der bimodalen Bedingung die Pianoakkorde verwendet (siehe Abbildung 3).

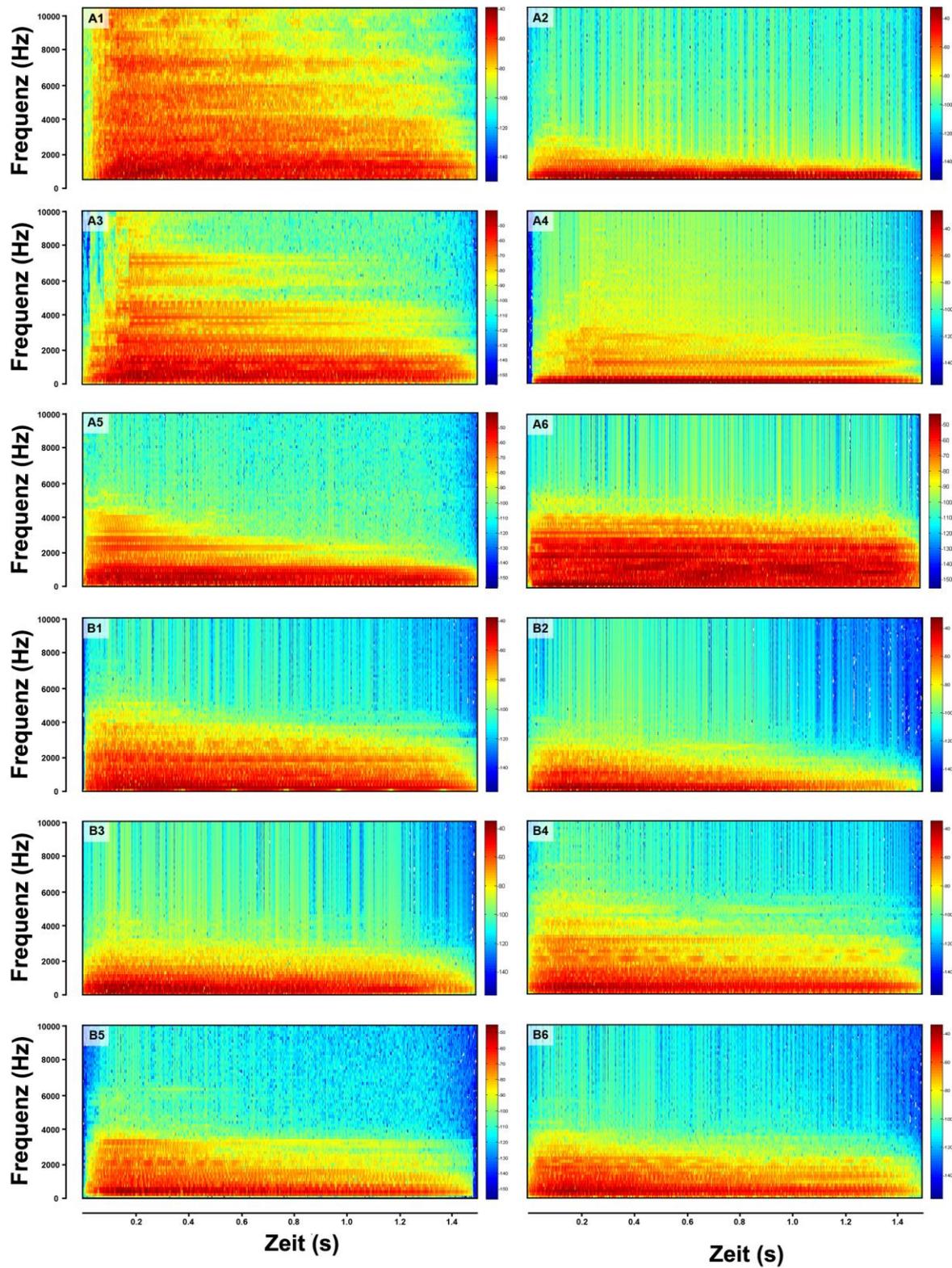


Abbildung 3: Spektrogramme der Akkorde der verschiedenen auditiven Stimuli. Es wurde die Frequenz(Hz) über die Zeit (s) geplottet. Die Farbintensitäten stellen die verschiedenen Amplituden dar (blau: gering, ca. -140 dB; rot: hoch, ca. -40 dB). A1 bis A6 zeigen die Spektrogramme für die auditive Bedingung. B1 bis B6 zeigen die Spektrogramme der bimodalen Bedingung.

Für die bimodale Bedingung wurden sechs Paare bestehend je aus einem der visuellen Stimuli 7 bis 12 (siehe Abbildung 2) und einem der auditiven Stimuli B1 bis B2 (siehe Abbildung 3) gebildet und zeitgleich präsentiert. Dabei blieb die Paarung zwischen dem auditiven und dem visuellen Stimulus immer die Gleiche.

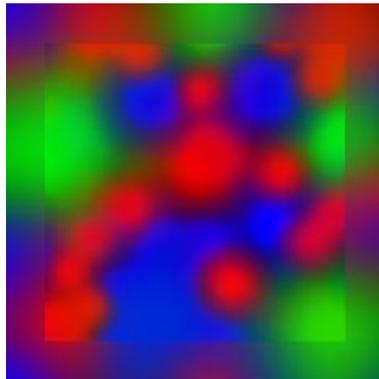
## 2.5. Versuchsablauf

Die Versuchspersonen wurden auf die drei Gruppen aufgeteilt. Jeder Gruppe war eine andere Abfolge der drei Modalitäten zugeordnet, um einen möglichen Lerneffekt über die Modalitäten hinweg auszuschließen bzw. zu balancieren (siehe Tabelle 1). Für jede Versuchsperson wurden Datum, Uhrzeit (der Experimentdurchführung) und Alter protokolliert.

Vor dem Experiment musste jede Versuchsperson eine Instruktion (siehe Anhang A) mit der Erklärung aller Versuchsbedingungen lesen um das Prinzip des Experiments zu verstehen. Fragen konnten an den anwesenden Versuchsleiter gestellt werden.

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin einen *n-back* Task nach Kirchner (1958) mit  $n=2$  zu absolvieren. Alle Versuchspersonen mussten den *2-back* Task für alle drei Modalitäten durchlaufen. Erst wenn alle fünf Blöcke einer Modalität absolviert wurden, konnte der Versuchsteilnehmer mit der nächsten Modalität beginnen. Je nach dem in welcher Gruppe die Versuchsperson war, wurde entweder das visuelle, auditive oder das bimodale Programm in MATLAB® gestartet. Nach Eingabe der Versuchspersonennummer erschien auf dem Bildschirm eine weitere Instruktion. Der Versuchsteilnehmer konnte dieser entnehmen, welche Bedingung gerade getestet wurde und wurde dazu aufgefordert zu Beginn des Experiments das Fixationskreuz zu fixieren. Durch Drücken einer beliebigen Taste konnte der Versuchsteilnehmer das Experiment beginnen. Zunächst wurde für zwei Sekunden ein weißes Fixationskreuz auf schwarzem Hintergrund gezeigt. Danach folgte für 1,5 s der erste Stimulus. In der visuellen und der bimodalen Modalität wurde unmittelbar nach dem Stimulus ein Distraktorbild für 150 ms eingeblendet. Dieses sollte verhindern, dass die Versuchspersonen in der Interstimulus Phase ein Nachbild des visuellen Stimulus sehen konnten. Der Distraktor stellte ein 6 x 6 cm großes Quadrat mit einem bunten Muster dar und wurde unter einem Sehwinkel von ca. 5° gesehen (siehe Abbildung 4: Distraktor verwendet in der visuellen und in der bimodalen Modalität.). Nach dem Distraktor folgte die Interstimulus Phase von 850 ms, in dieser wurde ein grauer Bildschirm gezeigt. Daraufhin folgte wieder ein neuer Stimulus (siehe Abbildung 5). In der auditiven Bedingung war kein Distraktor notwendig. Hier folgte nach der Stimuluspräsentation von 1,5 s eine Interstimulus Phase von einer Sekunde. In der bimodalen Modalität wurden der Akkord und das Bild gleichzeitig für 1,5 s präsentiert. Danach wurde wieder der visuelle Distraktor für 150 ms gezeigt, gefolgt von einer Interstimulus Phase

von 850 ms. Dadurch wurde verhindert, dass durch das Nachbild bedingt, die visuellen Stimuli länger wirkten als die auditiven. Die Versuchsperson musste während des ganzen Experimentes fortlaufend entscheiden, ob der Stimulus, welcher momentan gezeigt wurde, demjenigen entspricht, welcher  $n=2$  zurückliegt. War dies der Fall, so musste die linke Maustaste gedrückt werden. Wurde der Stimulus als nicht identisch bewertet, musste die rechte Maustaste gedrückt werden. Die Versuchsperson konnte während des Stimulus oder während der Interstimulus Phase die entsprechende Maustaste drücken. Es wurde immer nur der erste Tastendruck gewertet. Wurden die 60 Stimuli eines Blocks gezeigt, endete der Block automatisch und die Versuchsperson konnte den nächsten Block durch Drücken einer Taste beginnen. Wurden alle fünf Blöcke einer Modalität absolviert, konnte die Versuchsperson das Programm durch Tastendruck verlassen. Nach einer individuellen, kurzen Pause, wurde mit der nächsten Modalität begonnen. Welche Modalität als nächstes absolviert werden musste, war durch die Gruppeneinteilung festgelegt (siehe Tabelle 1).



*Abbildung 4: Distraktor verwendet in der visuellen und in der bimodalen Modalität.*

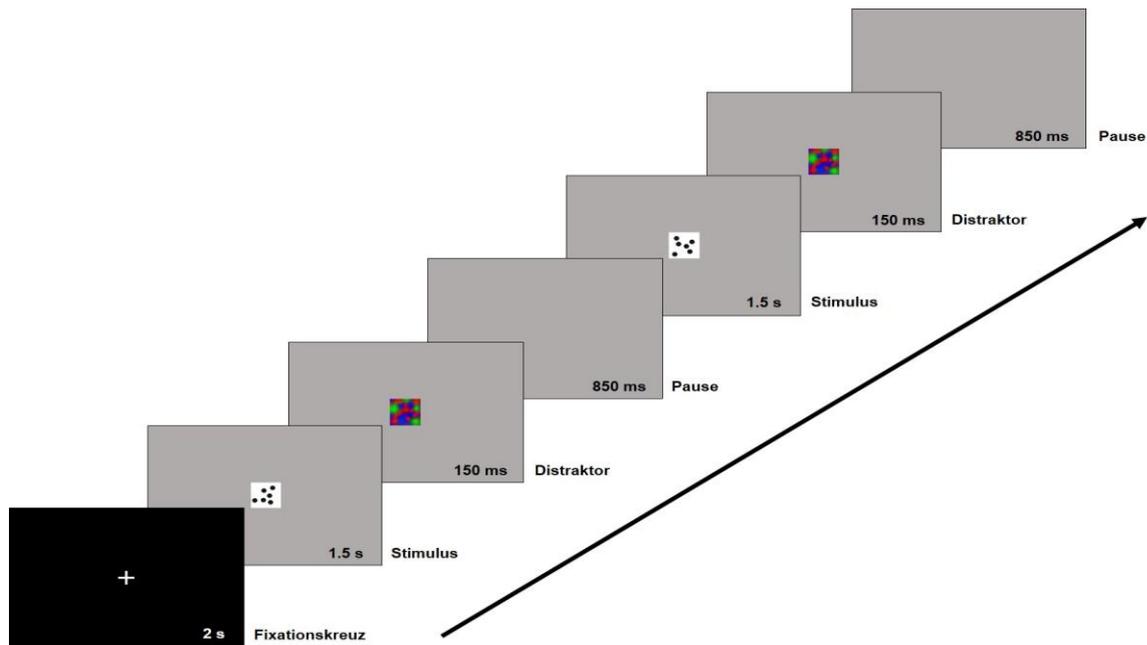


Abbildung 5: Zeitliche Sequenz des Versuchsaufbaus eines Blocks exemplarisch für die visuelle Modalität. In der Mitte des Bildschirms wird zu Beginn für zwei Sekunden ein Fixationskrenz eingeblendet. Danach folgt der Versuchsblock mit 60 Stimuli. Jeder Stimulus wird 1,5 s gezeigt. In der visuellen und in der bimodalen Bedingung folgte für 150 ms ein Distraktor. Danach folgte eine Interstimulus Pause von 850 ms. In der auditiven Bedingung (ohne Distraktor) betrug diese Pausenlänge 1 s.

Tabelle 2 zeigt für die Blöcke 1 bis 5 (für die ersten 15 Stimuli) an welcher Stelle innerhalb eines Blockes ein *hit* ( $x$ ) vorkam, d.h. an welcher Stelle der gleiche Stimulus gezeigt wurde wie  $n=2$  zuvor (Tabelle der vollständigen *hit*-Verteilung im Anhang B). In der Summe über alle 5 Blöcke gab es 100 *hits* pro Modalität (siehe Tabelle 3). Die *hit*-Verteilung war in allen drei Modalitäten gleich.

Tabelle 2: *hit*-Verteilung über alle 5 Blöcke für die ersten 15 Stimuli. Das  $x$  markiert die Stelle, an welcher  $n=2$  Stellen zuvor der gleiche Stimulus präsentiert wurde.

Stimulus / Block	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			x			x		x			x				x
2				x			x						x		x
3			x	x			x			x		x			x
4			x		x		x			x			x		
5				x			x		x		x			x	

Tabelle 3: *hit*-Anzahl für jeden Block 1 bis 5.

Block	1	2	3	4	5	Gesamt
hits pro Block	20	16	22	24	18	100

Nach Beendigung des Experimentes mussten alle Versuchsteilnehmer einen Fragebogen ausfüllen. Dabei wurde neben Motivation und Schwierigkeitsgrad, auch nach möglichen Strategien zum Lösen der Aufgabe gefragt (siehe Anhang C).

## 2.6. Datenauswertung

Für die Auswertung des Experimentes wurde angenommen, dass die Entscheidung identisch/nicht identisch der Versuchspersonen der Signaldetektionstheorie nach Green und Swets (1966) folgt. Der Sensitivitätsindex *d-prime* oder *d'* ist Maß für die Erkennungsleistung in der Signaldetektionstheorie. Hier ist es wichtig, dass die Entscheidung identisch/nicht-identisch funktioniert, d.h. die verwendeten Stimuli dürfen nicht zu schwer aber auch nicht zu leicht zu unterscheiden sein.

Der Sensitivitätsindex *d'* lässt sich aus der z-transformierten Wahrscheinlichkeit für die *hits*  $z[p(H)]$  minus die z-transformierte Wahrscheinlichkeit für die *false alarms*  $z[p(FA)]$  berechnen.

$$d' = z[p(H)] - z[p(FA)]$$

Bei einem *hit* gab die Versuchsperson korrekterweise an, dass der Stimuli identisch mit demjenigen zwei Stellen zuvor war. Bei einem *false alarm* hat die Versuchsperson den Stimuli fälschlicherweise als identisch bewertet. Umso höher der *d'*-Wert, desto besser war die Detektionsleistung der Versuchspersonen (*d'* = 0 bedeutet hierbei Ratelevel). Von jeder Versuchsperson wurde mittels MATLAB® der *d'*-Wert für jede Modalität, pro Block und über alle Blöcke gemittelt, bestimmt.

Die Reaktionszeiten der Versuchspersonen wurden mittels MATLAB® für jede Modalität, pro Block und über alle 5 Blöcke gemittelt, bestimmt. In die Datenauswertung gingen dabei nur die Reaktionszeiten bei einem *hit* ein. Mit dem Programm IBM SPSS Statistics® Version 22.0 wurde danach eine *mixed-model* ANOVA mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Hierbei wurden die Modalität (mit 3 Faktorstufen) und die Blöcke (mit 5 Faktorstufen) als Innersubjektfaktoren (engl. *within factor*) und die Modalitätsreihenfolge als Zwischensubjektfaktor (engl. *between factor*) behandelt. Weitere Auswertungen erfolgten mit dem Programm Excel 2013.

## 3. Ergebnisse

Der Ergebnisteil zeigt, dass die verschiedenen Stimulusmodalitäten und die Wiederholungen der Stimulation einen Einfluss auf den Sensitivitätsindex  $d'$  und die Reaktionszeit und damit auf die Arbeitsgedächtnisleistung haben.

Je höher die Sensitivität, desto besser waren die Versuchspersonen in der Lage ein passendes Objekt von einem nicht passenden Objekt zu diskriminieren. Dabei wurde der Einfluss der verschiedenen Modalitäten auf den Sensitivitätsindex  $d'$  untersucht. Ebenfalls sollte der Einfluss der Blöcke (als Indikator für Lernen) auf  $d'$  bestimmt werden und wie sich die verschiedenen Modalitäten auf die Reaktionszeit auswirken.

### 3.1. Genereller Einfluss der Faktoren Modalität und Block auf die Arbeitsgedächtnisleistung

Mögliche signifikante Effekte bezüglich der  $d'$ -Werte aller Versuchspersonen für die getesteten Modalitäten (visuell, auditiv, bimodal) wurden anhand einer (3-faktoriellen) *mixed-model* ANOVA untersucht. Dabei wurden Modalität und Block als Innersubjektfaktoren und die Reihenfolge der Modalitäten als Zwischensubjektfaktor behandelt. Der Mauchly Test auf Sphärizität zeigte homogene Varianzen der beiden unabhängigen Faktoren Modalität und Block. Der Faktor Modalität hatte einen signifikanten Einfluss mit hoher Effektstärke auf  $d'$  ( $F(2, 36) = 42,86$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2_p = 0,7$ ). Der Faktor Block zeigte ebenfalls einen signifikanten Einfluss mit hoher Effektstärke auf  $d'$  mit  $F(4,72) = 15,56$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2_p = 0,46$ . Die Interaktion der beiden unabhängigen Faktoren Modalität und Block war nicht signifikant ( $F(8,144) = 0,669$ ;  $p = 0,669$ ;  $\eta^2_p = 0,036$ ). Die Reihenfolge der Modalitäten hatte keinen signifikanten Einfluss auf  $d'$  ( $F(2) = 0,5$ ;  $p = 0,61$ ;  $\eta^2_p = 0,05$ ).

### 3.2. Faktorstufeneffekte bei Modalität und Block auf $d'$

Alle Post-hoc-Tests der Faktorstufeneffekte von Modalität und Block auf  $d'$  wurden Bonferroni korrigiert. Hinsichtlich des Faktors Modalität zeigte der Test zwischen allen drei Faktorstufen (Bedingungen) signifikante Unterschiede (siehe Abbildung 6). Hierbei führte die bimodale Bedingung zu den höchsten und die visuelle Bedingung zu den kleinsten  $d'$ -Werten.

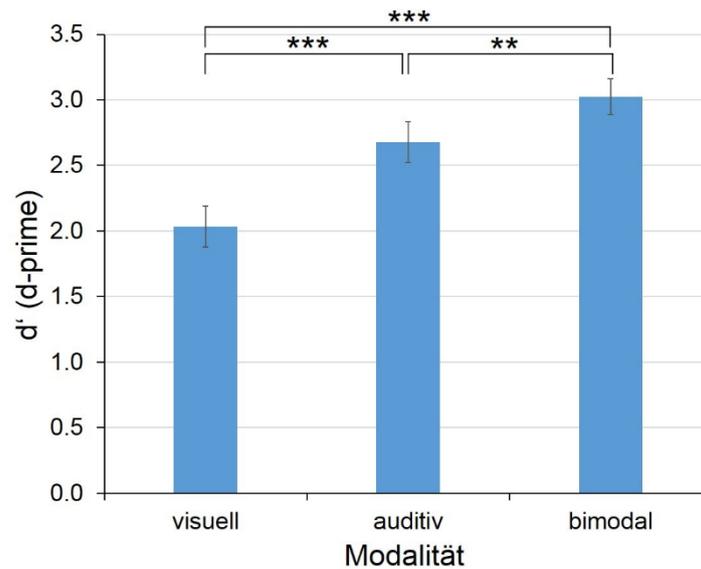


Abbildung 6: Balkendiagramm der gemittelten  $d'$ -Werte für jede Modalität. Jeder Balken stellt den gemittelten  $d'$ -Wert von 21 Versuchspersonen über alle Blöcke dar. Signifikante Post-hoc Effekte sind folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p \leq 0,05$ ; \*\*  $\rightarrow p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $\rightarrow p \leq 0,001$ .

Abbildung 7 zeigt die gemittelten  $d'$ -Werte pro Block über alle Modalitäten hinweg. Block 4 und Block 5 zeigen ein signifikant höheres  $d'$  als Block 1, 2 und 3.

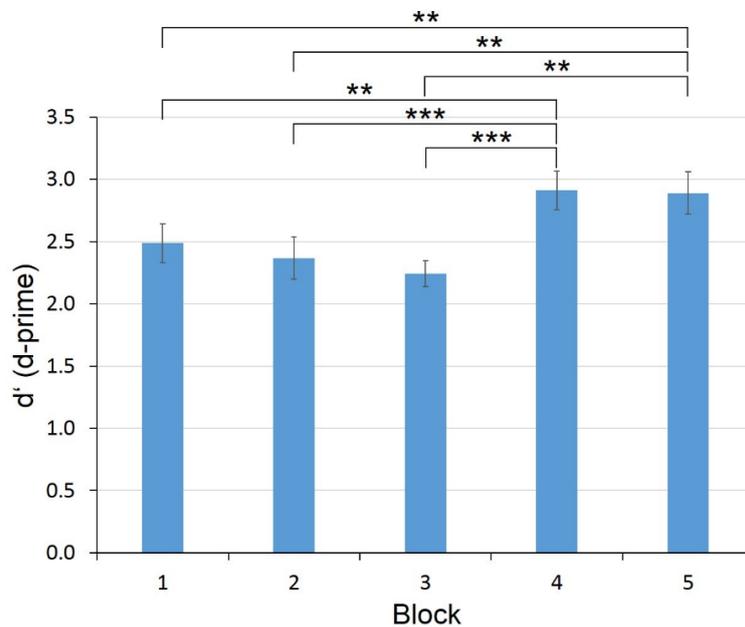


Abbildung 7: Balkendiagramm der gemittelten  $d'$ -Werte pro Block über alle Modalitäten. Zwischen den Blöcken 1 - 3 und den Blöcken 4 und 5 findet sich ein signifikanter Anstieg im  $d'$ . Post-hoc Signifikanzen sind folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p \leq 0,05$ ; \*\*  $\rightarrow p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $\rightarrow p \leq 0,001$ .

Abbildung 8 zeigt die gemittelten  $d'$ -Werte über alle Versuchspersonen für jede Modalität in Abhängigkeit des Blocks. In der auditiven und der bimodalen Bedingung wurde der Anstieg zwischen Block 3 und Block 4 als signifikant getestet ( $p < 0,01$ ).

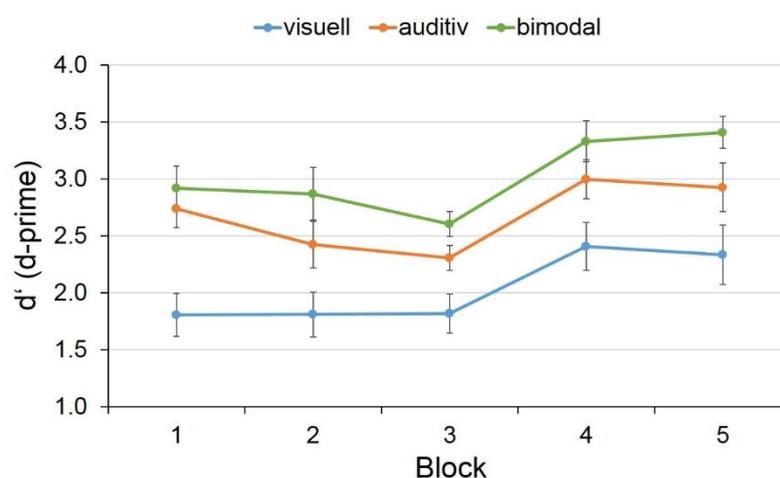


Abbildung 8: Das Liniendiagramm zeigt die über die Versuchspersonen ( $n=21$ ) gemittelten  $d'$ -Werte in den drei Modalitäten für jeden Block.

Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang der Sensitivitätsindices der einzelnen Versuchspersonen zwischen je zwei Modalitäten. Jeder Datenpunkt stellt den Zusammenhang zwischen zwei Modalitäten für eine Versuchsperson dar. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson verweist auf einen signifikanten positiven linearen Zusammenhang zwischen allen Modalitätskombinationen (siehe Tabelle 4).

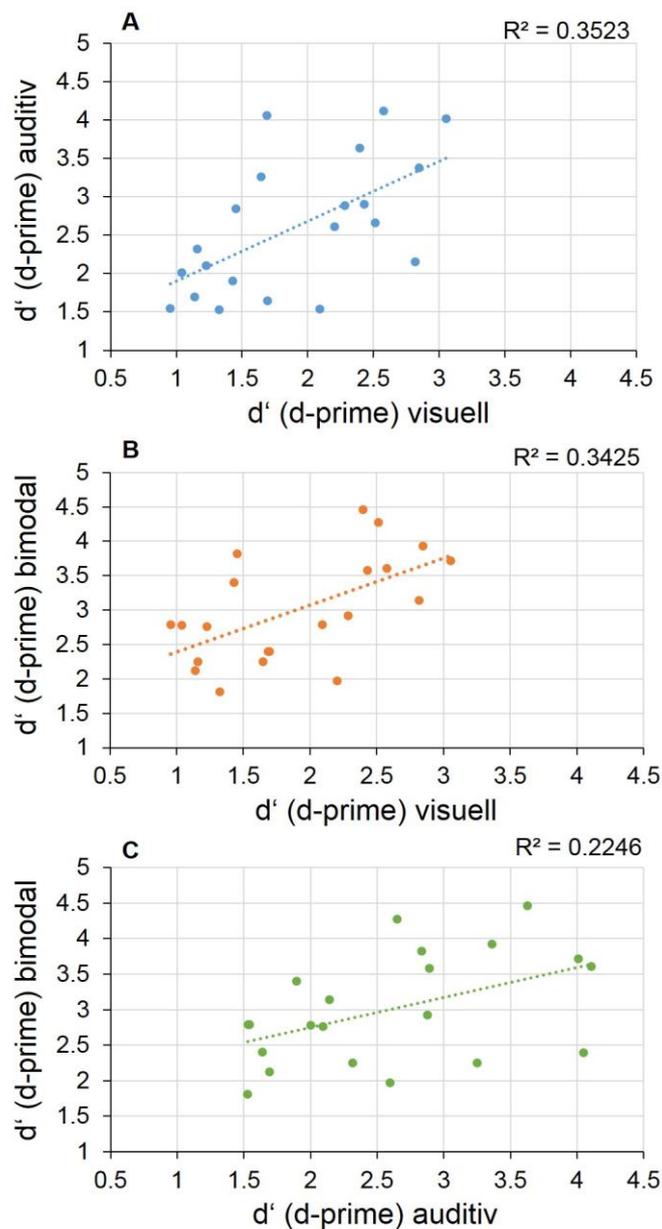


Abbildung 9 Streudiagramm der  $d'$ -Werte zwischen je zwei Modalitäten. Jeder Datenpunkt stellt die Korrelation zweier Modalitäten einer Versuchsperson dar. **A:** Korrelation der auditiven Modalität gegen die visuelle Modalität; Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,3523$ . **B:** Korrelation der bimodalen Modalität gegen die visuellen Modalität mit  $R^2 = 0,3425$ . **C:** Korrelation der bimodalen Modalität gegen die auditive Modalität, mit  $R^2 = 0,2246$ .

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten mit Signifikanzen nach Pearson für die Korrelationen zwischen den Modalitäten (vgl. Abbildung 9). Signifikanzen sind folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p \leq 0,05$ ; \*\*  $\rightarrow p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $\rightarrow p \leq 0,001$ .

Daten	Korrelationskoeffizient (r)	Signifikanz (p)
visuell vs. auditiv	<b>0.594 **</b>	0.005
visuell vs. bimodal	<b>0.585 **</b>	0.005
auditiv vs. bimodal	<b>0.474 **</b>	0.005

Der Vergleich der einzelnen Blöcke ergab in jeder Modalität und über alle Modalitäten gemittelt meist einen signifikanten Korrelationskoeffizient  $r$  nach Pearson. Dabei wurde in jeder Modalität und über alle Modalitäten gemittelt der Korrelationskoeffizient  $r$  von jedem Block von 1 bis 5 mit einem anderen Block von 1 bis 5 ermittelt. Ebenso wurde das Signifikanzniveau  $p$  ermittelt. Es zeigt sich meist eine signifikante Korrelation innerhalb der Modalitätsblöcke und über alle Modalitäten gemittelt. Die signifikante Korrelation lässt darauf schließen, dass die Versuchspersonen innerhalb einer Modalität und über die Modalitäten hinweg die gleiche Strategie verfolgt haben (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Tabelle der Korrelationskoeffizienten  $r$  nach Pearson für jede Modalität und über alle Modalitäten gemittelt. Es werden alle zehn möglichen Kombinationen an Blöcken miteinander verglichen.  $r$  gibt den Korrelationskoeffizienten nach Pearson an,  $p$  die dazugehörigen Signifikanzen. Alle signifikanten Korrelationskoeffizienten sind fett markiert und folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p < 0,05$ ; \*\*  $\rightarrow p < 0,01$ ; \*\*\*  $\rightarrow p < 0,001$ .

Daten	visuell		auditiv		bimodal		Mittelwert visuell   auditiv   bimodal	
	r	p	r	p	r	p	r	p
1 Block 1 vs. Block 2	<b>.683**</b>	0.001	<b>.806***</b>	.000	<b>.686**</b>	.001	<b>.886***</b>	.000
2 Block 1 vs. Block 3	<b>.460*</b>	.036	<b>.585**</b>	.005	<b>.749***</b>	.000	<b>.685**</b>	.001
3 Block 1 vs. Block 4	<b>.443*</b>	.044	<b>.732***</b>	.000	<b>.601**</b>	.004	<b>.805***</b>	.000
4 Block 1 vs. Block 5	<b>.457*</b>	.037	<b>.809***</b>	.000	.408	.067	<b>.854***</b>	.000
5 Block 2 vs. Block 3	.342	.130	<b>.581**</b>	.006	<b>.636**</b>	.002	<b>.551**</b>	.010
6 Block 2 vs. Block 4	<b>.457*</b>	.037	<b>.865***</b>	.000	<b>.519*</b>	.016	<b>.840***</b>	.000
7 Block 3 vs. Block 4	.376	.093	<b>.778***</b>	.000	<b>.627**</b>	.002	<b>.753***</b>	.000
8 Block 3 vs. Block 5	<b>.452*</b>	.040	<b>.667**</b>	.001	<b>.600**</b>	.004	<b>.654**</b>	.001
9 Block 3 vs. Block 5	.209	.364	<b>.711***</b>	.000	<b>.496*</b>	.022	<b>.661**</b>	.001
10 Block 4 vs. Block 5	<b>.757***</b>	.000	<b>.875***</b>	.000	<b>.181</b>	.432	<b>.780***</b>	.000

### 3.3. Einfluss der Modalität und des Blocks auf die Reaktionszeit

Eine weitere (3-faktorielle) *mixed-model* ANOVA wurde durchgeführt um zu untersuchen, ob sich die Reaktionszeiten zwischen den Modalitäten ändern. Ebenfalls wurde getestet, ob es im Laufe einer Modalität zu einer Veränderung in der Reaktionszeit über die Blöcke kam. Als Reaktionszeit wurde im Experiment der erste Tastendruck des Probanden gewertet. Ein Tastendruck konnte im *2-back* Task während der Stimuluspräsentation oder in Pause zwischen zwei Stimuli erfolgen. Nur bei einem *hit* wurden die Reaktionszeiten gespeichert und für die Datenauswertung verwendet. Wurde ein Stimulus als nicht identisch oder fälschlicherweise als identisch (*false alarm*) gewertet, so ging diese Reaktionszeit nicht mit die Auswertung mit ein. Ebenso wenn keine Taste gedrückt wurde.

Alle Post-hoc-Tests der Faktorstufeneffekte von Modalität und Block wurden Bonferroni korrigiert. Der Innersubjektfaktor Modalität zeigte einen signifikanten Einfluss mit hoher Effektstärke auf die Reaktionszeit ( $F(2,40) = 51,6$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2_p = 0,721$ ). Die visuelle Modalität zeigte eine signifikant schnellere Perzeption gegenüber der auditiven und der bimodalen Modalität (siehe Abbildung 10).

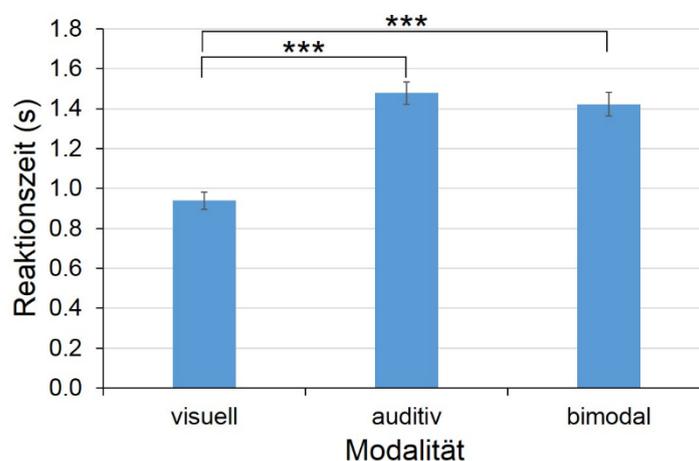


Abbildung 10: Balkendiagramm der gemittelten Reaktionszeit in Sekunden. Die Reaktionszeit wurde pro Modalität über alle Blöcke und Versuchspersonen hinweg gemittelt. Post-hoc Signifikanzen sind folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p \leq 0,05$ ; \*\*  $\rightarrow p \leq 0,01$ ; \*\*\*  $\rightarrow p \leq 0,001$ .

Über die Blöcke hinweg sanken die Reaktionszeiten in der visuellen Bedingung signifikant ab ( $F(4,80) = 9,86$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2_p = 0,33$ ; siehe Abbildung 11). Die Daten der visuellen Reaktionszeit wurden Greenhouse-Geisser korrigiert. Dabei fand in den Blöcken 4 und 5 keine weitere Verringerung der Reaktionszeiten mehr statt.

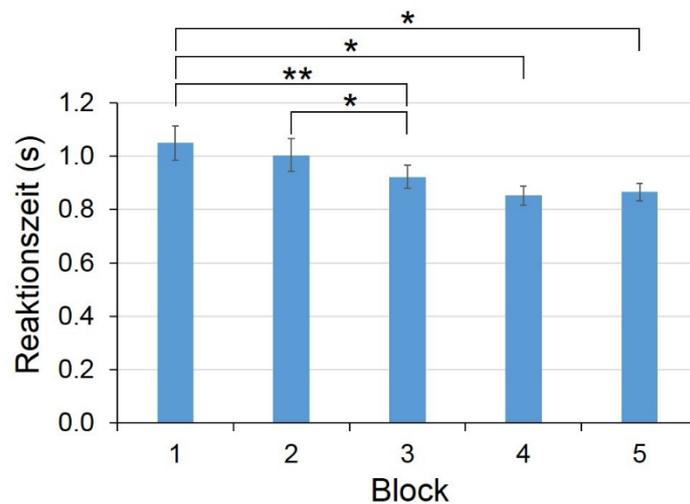


Abbildung 11: Balkendiagramm der gemittelten Reaktionszeit in Sekunden in der visuellen Bedingung für jeden Block. Die Reaktionszeiten wurden für  $n=21$  Versuchspersonen für jeden Block gemittelt und Greenhouse-Geisser korrigiert. Post-hoc Signifikanzen sind folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p \leq 0,05$ ; \*\*  $\rightarrow p \leq 0,01$ , \*\*\*  $\rightarrow p \leq 0,001$ .

Auch die Reaktionszeiten in der auditiven Bedingung sanken über die Blöcke 1 bis 3 hinweg signifikant ab ( $F(4, 80) = 19,17$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2_p = 0,49$ ; siehe Abbildung 12).

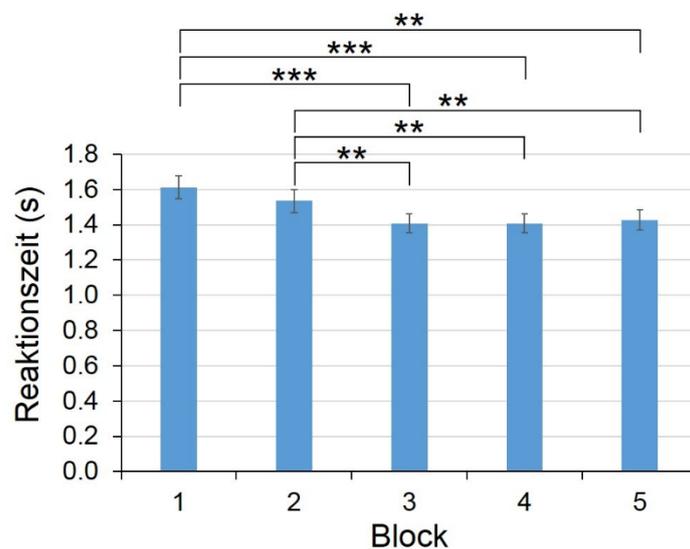


Abbildung 12: Balkendiagramm der gemittelten Reaktionszeit in s in der auditiven Bedingung. Die Reaktionszeiten wurden für  $n=21$  Versuchspersonen für jeden Block gemittelt. Post-hoc Signifikanzen sind folgendermaßen gekennzeichnet: \*  $\rightarrow p \leq 0,05$ , \*\*  $\rightarrow p \leq 0,01$ , \*\*\*  $\rightarrow p \leq 0,001$ .

Die Post-hoc Analyse der bimodalen Reaktionszeiten zeigte keinen signifikanten Unterschied über die Blöcke hinweg. Die mittlere Reaktionszeit lag für  $n = 21$  Versuchspersonen bei 1,42 s.

### 3.4. Einfluss der Reaktionszeit auf den Sensitivitätsindex $d'$

In dem durchgeführten Experiment wurde für alle 21 Versuchspersonen gleichzeitig der Sensitivitätsindex  $d'$  und die Reaktionszeit bestimmt. Es wurde bestimmt, ob die gemittelten Reaktionszeiten der einzelnen Versuchspersonen signifikant mit den gemittelten  $d'$ -Werten korrelierten. Für die auditive Bedingung zeigte sich eine solche Korrelation mit dem Bestimmungsmaß  $R^2 = 0,48$  und einem Korrelationskoeffizient nach Pearson von  $R = -0,692$  mit  $p < 0,001$  (siehe Abbildung 13).

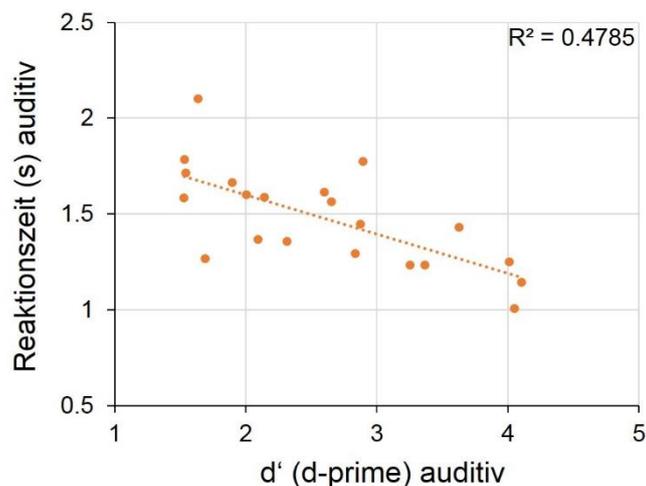


Abbildung 13: Reaktionszeit (s) der auditiven Bedingung in Abhängigkeit des  $d'$  der auditiven Bedingung. Jeder Datenpunkt stellt die gemittelten Werte einer Versuchsperson dar. Bestimmungsmaß  $R^2 = 0,4785$  und der Korrelationskoeffizient nach Pearson  $R = -0,69$

In der visuellen und in der bimodalen Modalität konnten keine signifikanten Korrelationen zwischen Reaktionszeiten und Sensitivitätsindizes festgestellt werden. Das Bestimmungsmaß der visuellen Bedingung war  $R^2 = 0,002$  und der Korrelationskoeffizient nach Pearson betrug  $R = -0,048$  mit  $p = 0,848$ . Die visuelle Modalität zeigte eine schnellere Perzeption gegenüber der auditiven- und der bimodalen Modalität und eine kleinere Streuung der Daten. Die Reaktionszeiten korrelierten nicht mit den  $d'$ -Werten der Versuchspersonen. In der bimodalen Modalität betrug  $R^2 = 0,0336$  und der Korrelationskoeffizient nach Pearson  $R = -0,184$  mit  $p = 0,428$ . Es ist hier ebenfalls kein linearer Zusammenhang zwischen der Reaktionszeit und des Sensitivitätsindex festzustellen.

## 4. Diskussion und Ausblick

Mit dieser Studie sollte der Einfluss von non-semanticen, uni- und bimodalen Stimuli auf die Arbeitsgedächtnisleistung untersucht werden. Die Quantifizierung der Arbeitsgedächtnisleistung erfolgte dabei über die Ermittlung des Sensitivitätsindex ( $d'$ ; ausgesprochen *d-prime*) und der Reaktionszeit mittels einen *2-back* Tasks. Insgesamt liegen dieser Untersuchung die Werte von 21 Versuchspersonen zu Grunde, wobei alle Versuchspersonen in einem *within-subject* Design den *2-back* Task in allen drei Modalitäten (visuell, auditiv und bimodal) durchführen mussten. Das *within-subject* Design wurde gewählt, um eine Verfälschung der Daten durch persönliche Präferenzen der Versuchspersonen auszuschließen und deren individuelle Variationen zu kontrollieren. Der *2-back* Task wurde verwendet, da er eine aktive Kontrolle, Aktualisierung und Manipulation der zu erinnernden Informationen im Arbeitsgedächtnis erfordert. Diese Anforderungen stellen Schlüsselprozesse der Arbeitsgedächtnisfunktion dar (Owen et al. 2005). Für die Auswertung der Daten wurde eine *mixed-model* ANOVA angewandt. Mit dieser können gleichzeitig Effekte über Varianzanalysen der Innersubjektfaktoren (Modalität und Block) und dem Zwischensubjektfaktor (Modalitätenreihenfolge) identifiziert werden.

In vorherigen Experimenten (Diehl, 2013 und Utz, 2014) wurde bereits versucht, den Einfluss von non-semanticen, uni- und bimodalen Stimuli auf die Arbeitsgedächtnisleistung zu untersuchen. Die verwendeten *2-back* und *3-back* Tasks ließen aber nur Tendenzen erkennen und lieferten keine signifikanten Ergebnisse. Das könnte daran liegen, dass der zuvor verwendete *3-back* Task zu schwer für die Versuchspersonen war und die gewählten auditiven Stimuli, in Form von reinen Sinustönen, zu schwer zu diskriminieren waren. Ein weiterer Grund, warum die zuvor durchgeführten Experimente keine signifikanten Ergebnisse lieferten, könnte das verwendete *between-subject* Design sein. Jede Versuchsperson musste den *2-back* bzw. *3-back* Task nur in einer Modalität (visuell, auditiv oder bimodal) durchführen. Persönliche Präferenzen könnten hier die Ergebnisse zu stark beeinflusst haben.

Daher wurde in diesem Experiment ein neues Design gewählt. Der *2-back* Task ist für die Versuchspersonen leichter zu bewältigen und Verbesserungen in der Arbeitsgedächtnisleistung können so leichter detektiert werden. Mit dem verwendeten *within-subject* Design konnte der Einfluss von persönlichen Präferenzen der Versuchspersonen ausgeschlossen werden. Ebenfalls wurde durch die Verwendung von Akkorden als auditive Stimuli die Diskriminationsleistung in der auditiven Modalität erhöht, wodurch Verbesserungen in der bimodalen Bedingung leichter erkannt werden konnten.

## 4.1. Einfluss der bimodalen Modalität auf die Arbeitsgedächtnisleistung

### 4.1.1. Einfluss der Modalität auf den Sensitivitätsindex $d'$

Aus der *mixed-model* ANOVA ergab sich ein signifikant höherer  $d'$  in der bimodalen Modalität gegenüber beider unimodalen Modalitäten. Dieser Vorteil ergab sich im Experiment bei 15 von 21 Versuchspersonen. Ebenfalls zeigte die auditive Bedingung einen signifikant höheren  $d'$  gegenüber der visuellen Bedingung. Diese Ergebnisse zeigen, dass non-semantische, bimodale Stimuli einen positiven Einfluss auf die Arbeitsgedächtnisleistung haben.

Die vorliegenden Ergebnisse geben Evidenz für ein integrierendes Arbeitsgedächtnissystem und sind konsistent mit dem Multikomponentenmodell nach Baddeley (2000). Dieses Modell setzt voraus, dass es im Arbeitsgedächtnis unabhängige Subsysteme (*slave systems*) gibt, in denen Eingänge von verschiedenen Modalitäten unabhängig voneinander verarbeitet werden. Nach dem Multikomponentenmodell wird die auditive Information in der phonologischen Schleife gespeichert und die visuelle Information im visuell-räumlichen Notizblock. Baddeley geht davon aus, dass verschiedene Modalitäten nicht in den Speichern verarbeitet werden können und die phonologische Schleife und der visuell-räumliche Notizblock die Stimuli nur für sehr kurze Zeit speichern können. Die Erhöhung der Arbeitsgedächtnisleistung in der bimodalen Modalität erfolgt nach diesem Modell in einem weiteren Subsystem, dem episodischen Puffer. Danach integriert der episodische Puffer Stimuli von verschiedenen Modalitäten zu einer einheitlichen Episode und macht sie für die zentrale Exekutive bewusst abrufbar. Der episodische Puffer ist in diesem Modell als Speicher anzusehen (Baddeley, 2000). Die Steigerung der Arbeitsgedächtnisleistung ist in diesem Experiment also als längere Speicherung und Integration der beiden unimodalen Stimuli im episodischen Puffer anzusehen, welche daher besser abrufbar sind und daher die Arbeitsgedächtnisleistung erhöhen.

Die integrierte einheitliche Episode nach dem Multikomponentenmodell könnte auch als *chunk* angesehen werden. Durch *chunks* ist es möglich die Arbeitsgedächtniskapazität zu erhöhen, was ebenso zu einer Steigerung der Arbeitsgedächtnisleistung führen könnte (Miller, 1956).

Nach der *dual-code* Theorie von Paivio (1971) lässt sich die verbesserte Arbeitsgedächtnisleistung in der bimodalen Modalität damit erklären, dass es zwei Subsysteme von Repräsentationen gibt: ein non-verbales, welches nicht-sprachbasierte Objekte und Bilder speichert, und ein verbales Subsystem, welches sprachbasierte Informationen speichert. Laut dieser Theorie werden bimodale Stimuli in zwei Speicher enkodiert und sind somit robuster gegenüber Vergessen als unimodale Stimuli. Jedoch lässt sich die *dual-code* Theorie nur auf verbalisierbare/semantische Stimuli anwenden. Daher stellt diese Theorie, für den im Experiment verwendeten Versuchsaufbau, keine hinreichende Erklärung für den signifikanten Vorteil in der bimodalen Bedingung dar, da hier keine semantischen Stimuli verwendet wurden (Paivio, 1990).

Die Steigerung der Arbeitsgedächtnisleistung bei Präsentation von bimodalen Stimuli könnte auch durch eine Steigerung der Effektivität des Arbeitsgedächtnisses erklärt werden. Mousavi et al. (1995) haben festgestellt, dass die bimodale Präsentation von zu lernendem Material die Arbeitsgedächtniskapazität erhöht. Durch die mentale Integration, welche eine Aufteilung der Aufmerksamkeit auf zwei Modalitäten erfordert, wird die Effektivität des Arbeitsgedächtnisses erhöht. Frassinetti et al. (2002) haben ebenfalls gezeigt, dass die Präsentation von bimodalen Stimuli zu einem erhöhten  $d'$  führt, wenn die visuellen und auditiven Stimuli an einer gleichen räumlichen Position zeitgleich gezeigt werden. Frassinetti et al. haben die Steigerung in der Arbeitsgedächtnisleistung mit einer Steigerung der Wahrnehmungsempfindlichkeit des visuellen Systems erklärt, die die Diskriminationsleistung des Arbeitsgedächtnisses deutlich steigert.

#### 4.1.2. Einfluss der Modalität auf die Reaktionszeit

Gegenüber dem Sensitivitätsindex zeigte sich bei der Auswertung der Reaktionszeiten kein signifikanter Vorteil der bimodalen Modalität; die Reaktionszeiten sind im Vergleich zur visuellen Modalität sogar signifikant höher.

Die Ergebnisse weichen von vorherigen Experimenten und Untersuchungen ab (Diederich & Colonius, 2004; Hughes et al., 1994; Giard & Peronnet, 1999). In diesen wurde festgestellt, dass die Präsentation von visuell-auditiv gekoppelten Stimuli zu einer kürzeren Reaktionszeit führen. Vor allem bei Detektionsaufgaben führen bimodale Stimuli zu einer verbesserten Detektionsleistung und einer verkürzten Reaktionszeit (Miller, 1982). Santangelo et al. (2006) führte ein vergleichbares *n-back* Experiment durch in welchem non-semantische, bimodale Stimuli gezeigt wurden. Auch hier wurden signifikant kürzere Reaktionszeiten in der bimodalen Modalität festgestellt.

Die Ergebnisse der Reaktionszeiten geben zwar Evidenz für ein integrierendes System, sprechen aber eher für eine späte Integration der visuellen und auditiven Stimuli. Dieses Ergebnis lässt sich ebenfalls mit dem Multikomponentenmodell von Baddeley erklären. Die zwei Modalitäten müssen erst dem jeweiligen Subsystem (phonologische Schleife bzw. visuell-räumlicher Notizblock) zugeführt werden, bevor sie im episodischen Puffer integriert werden können. Da erst nach der separaten Speicherung der beiden Modalitäten eine Integration im episodischen Puffer stattfinden kann, war nach dem Multikomponentenmodell zu erwarten, dass die Reaktionszeit in der bimodalen Modalität, der längsten der unimodalen Modalität entspricht. Die längste Reaktionszeit war in diesem Experiment die in der auditiven Modalität.

Warum dies in früheren Experimenten nicht der Fall war, könnte an der Wahl der auditiven Stimuli bzw. an der gewählten Stimuluslänge liegen. Durch die Dynamik der in diesem Experiment verwendeten Akkorde, könnten die Versuchspersonen eine längere Diskriminationszeit benötigen, als bei den zeitlich unveränderlichen visuellen Stimuli.

## 4.2. Einfluss der Messwiederholungen auf $d'$ und die Reaktionszeit

### 4.2.1. Einfluss der Messwiederholung auf $d'$

Die *mixed-model* ANOVA zeigte einen signifikanten Einfluss der Messwiederholungen auf den  $d'$ . Über die fünf Blöcke hinweg konnte in jeder Modalität ein signifikanter Anstieg des  $d'$  festgestellt werden. Dies spricht für einen Lerneffekt während des Versuchs. In einem Arbeitsgedächtnisexperiment an Kindern wurde ebenfalls ein Lerneffekt während eines *n-back* Tasks festgestellt. Hier stieg mit steigendem Training auch die Arbeitsgedächtnisleistung signifikant an (Jaeggi et al., 2011). Der Trainingseffekt war nicht über alle Blöcke hinweg signifikant steigend, was an einem Abfall der Aufmerksamkeit liegen könnte. Aufmerksamkeit spielt eine wichtige Rolle bei der sensorischen und postperzeptuellen Verarbeitung von Informationen (Awh et al., 2006). Da die Arbeitsgedächtniskapazität limitiert ist (Miller, 1956; Cowan, 2000) und Informationen über die Zeit verloren gehen, wird angenommen, dass das Behalten von Informationen im Arbeitsgedächtnis ein hohes Maß an Aufmerksamkeit erfordert. Ist diese nicht vorhanden, verschwindet der Gedächtnispfad und die Gedächtnisinhalte gehen verloren (Barrouillet, 2004). Die nicht dauerhaft signifikante Steigerung der  $d'$ -Wert könnte folglich daran liegen, dass durch die Dauer des Experimentes bedingt, die Aufmerksamkeit abfällt und dadurch die Arbeitsgedächtnisleistung nicht mehr weiter ansteigt.

### 4.2.2. Einfluss der Messwiederholung auf die Reaktionszeit

In der visuellen und in der auditiven Modalität sank die Reaktionszeit über die Blöcke hinweg signifikant ab. Ein Trainingseffekt könnte einen solchen Abfall der Reaktionszeit in der visuellen und in der auditiven Modalität ebenfalls erklären. Der durch die Messwiederholung entstandener Trainingseffekt führte dazu, dass die Versuchspersonen schneller in der Lage waren die Stimuli voneinander zu diskriminieren und eine Entscheidung treffen. In der bimodalen Modalität ließ sich keine Verkürzung der Reaktionszeit über die Blöcke hinweg feststellen. Das könnte daran liegen, dass es unter den Versuchspersonen zwei oder mehrere Gruppen gab, welche unterschiedliche Strategien beim Lösen der Aufgabe angewandt haben. Durch eine Einteilung der Versuchspersonen in zwei unterschiedliche Gruppen, bezüglich der Strategie beim Lösen des *2-back* Task, wäre es eventuell möglich auch hier eine signifikante Verkürzung der Reaktionszeit in der bimodalen Bedingung zu finden.

### 4.3. Korrelation der Arbeitsgedächtnisparameter

Der Korrelationskoeffizient (nach Pearson) zeigt sowohl im Vergleich der Modalitäten, als auch im Vergleich der einzelnen Blöcke pro Modalität eine signifikante Korrelation für den Vergleich der Arbeitsgedächtnisleistung. Obwohl diese Effekte relativ schwach ausfielen ( $p \leq 0,01$ ), lässt sich hier darauf schließen, dass die Versuchspersonen über die Blöcke hinweg eine Strategie beibehalten haben und diese auch während einer anderen Modalität nicht geändert haben. Außerdem zeigt sich dadurch, dass Versuchspersonen anhand ihrer individuellen, inhärenten Arbeitsgedächtnisfähigkeiten über die Bedingungen hinweg identifizierbar sind.

Die signifikant negative Korrelation zwischen der Reaktionszeit und dem  $d'$  in der auditiven Bedingung lässt darauf schließen, dass sich Versuchspersonen mit einem hohen  $d'$ -Wert auch schneller entscheiden. Dies kann daran liegen, dass Personen mit einem hohen  $d'$  durch ihre höhere fluide Intelligenz in der Lage sind, die Stimuli schneller miteinander zu vergleichen, um ihre Entscheidung zu treffen. Fry und Hale (1996) haben herausgefunden, dass Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtniskapazität und fluide Intelligenz stark voneinander abhängen. Personen mit einer schnellen Verarbeitung besitzen meist auch eine hohe Arbeitsgedächtnisleistung und somit eine hohe fluide Intelligenz. Durch eine hohe fluide Intelligenz ist man schneller in der Lage, ohne vorherige Lernerfahrung, Probleme zu lösen und sich neuen Situationen anzupassen. Dies könnte die negative Korrelation zwischen Reaktionszeit und  $d'$  in der auditiven Bedingung erklären.

In der visuellen Bedingung wurden keine Korrelation zwischen Reaktionszeit und  $d'$  festgestellt. Der Grund dafür könnte sein, dass durch die fehlende Zeitkomponente der visuellen Stimuli die Streuung der Daten (Varianz  $s^2 = 0,023$  s in Block 5 der visuellen Modalität;  $s^2 = 0,069$  s in Block 5 der auditiven Modalität) zu gering war und dadurch keine Korrelation detektiert werden konnte.

Trotz höherer Varianz in der bimodalen Modalität ( $s^2 = 0,152$  s in Block 5) konnte ebenfalls keine Korrelation zwischen Reaktionszeit und  $d'$  festgestellt werden. Der Grund hierfür könnte das Vorhandensein von zwei oder mehreren Strategien beim Lösen der Aufgaben sein. Leider konnten aus dem vorhandenen Datensatz keine klaren Strategiegruppen detektiert werden, um diesen Punkt zu unterlegen. Es ist anzunehmen, dass ein Teil der Versuchspersonen ihre Entscheidung in der bimodalen Modalität mehr auf die visuellen Stimuli stützten und ein anderer Teil eher auf die Auditiven.

#### **4.4. Ausblick**

Da die vorliegenden Ergebnisse deutlich für eine verbesserte Arbeitsgedächtnisleistung in der bimodalen Modalität sprechen, wäre es für weiterführende Experimente interessant, die Vergleichbarkeit und den Schwierigkeitsgrad der visuellen und der auditiven Modalität anzupassen. Zum einen wäre es möglich die Zeitkomponente aus der auditiven Modalität herauszunehmen. Beispielsweise durch eine zufällige Kombination von Sinustönen. Eine weitere Möglichkeit wäre in der visuellen Modalität eine Zeitkomponente hinzuzufügen, zum Beispiel durch sich zeitlich verändernde Punktemuster. Dadurch wäre es möglich, die Vergleichbarkeit der Stimuli zu verbessern. Ebenfalls wäre es sinnvoll, vor dem Hauptexperiment einige Vorversuche durchzuführen, um vorher bestimmte Strategiegruppen bilden zu können, die dann später in die Analyse der Gedächtniseffekte eingehen.

## Literaturverzeichnis

- 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., Vogel, E. K., & Oh, S. H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, 139(1), 201-208.
- Baddeley, A. D. (1986). Working memory. *Oxford, England: Clarendon Press*
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory?. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 417-423.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (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.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 83.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological bulletin*, 104(2), 163.
- Cowan, N. (2000). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and brain sciences*, 24, 87-185.
- Cowan, N. (2008). What are the differences between long-term, short-term, and working memory? *Progress in brain research*, 169, 323-338.
- Diederich, A., & Colonius, H. (2004). Bimodal and trimodal multisensory enhancement: effects of stimulus onset and intensity on reaction time. *Perception & psychophysics*, 66(8), 1388-1404.
- Diehl, M. (2013). Der Einfluss uni- und bimodaler Stimuli auf die Arbeitsgedächtnisleistung in einem „n-back Task“ unter Berücksichtigung multisensorischer Aufmerksamkeitsprozesse. *Bachelorarbeit der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, LS für Kognitive Neurowissenschaft, Tübingen*.
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological review*, 102(2), 211.
- Frassinetti, F., Bolognini, N., & Làdavas, E. (2002). Enhancement of visual perception by crossmodal visuo-auditory interaction. *Experimental Brain Research*, 147(3), 332-343.
- Fry, A. F., & Hale, S. (1996). Processing speed, working memory, and fluid intelligence: Evidence for a developmental cascade. *Psychological science*, 7(4), 237-241.
- Giard, M. H., & Peronnet, F. (1999). Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans: a behavioral and electrophysiological study. *Journal of cognitive neuroscience*, 11(5), 473-490.
- Gobet, F. (2000). Some shortcomings of long-term working memory. *British Journal of Psychology*, 91(4), 551-570.
- Goolkasian, P., & Foos, P. W. (2005). Bimodal format effects in working memory. *The American journal of psychology*, 118(1), 61-78.
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). Signal detection theory and psychophysics (1). *New York: Wiley*.
- Hughes, H. C., Reuter-Lorenz, P. A., Nozawa, G., & Fendrich, R. (1994). Visual-auditory interactions in sensorimotor processing: saccades versus manual responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(1), 131.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short-and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10081-10086.
- James, W. (1890). The principles of psychology. *New York: H. Holt and Company*.

- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55(4), 352-358.
- Lewandowsky, S., Geiger, S. M., & Oberauer, K. (2008). Interference-based forgetting in verbal short-term memory. *Journal of Memory and Language*, 59(2), 200-222.
- Mayer, R. E., & Sims, V. K. (1994). For whom is a picture worth a thousand words? Extensions of a dual-coding theory of multimedia learning. *Journal of educational psychology*, 86(3), 389.
- Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1983). Interactions among converging sensory inputs in the superior colliculus. *Science*, 221(4608), 389-391.
- 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.
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1986). Plans and the structure of behavior. *Adams Bannister Cox*.
- Miller, J. (1982). Divided attention: Evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive psychology*, 14(2), 247-279.
- Mousavi, S. Y., Low, R., & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of educational psychology*, 87(2), 319.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 411.
- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 25(1), 46-59.
- Paivio, A. (1971). Imagery and verbal processes. *New York: Holt, Rinehart & Winston*.
- Paivio, A. (1990). Mental representations: A dual coding approach. *Oxford University Press*.
- Santangelo, V., Mastroberardino, S., Botta, F., Marucci, F.S., & Olivetti Belardinelli, M. (2006). On the influence of audio-visual interactions on working memory performance: a study with non-semantic stimuli. *Cogn Process*. 7, 187.
- Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). The merging of the senses. *The MIT Press*.
- Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 255-266.
- Utz, A. (2014). The influence of uni- and bimodal stimuli on the working memory performance in a 3-back task. *Bachelorarbeit der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, LS für Kognitive Neurowissenschaft, Tübingen*.

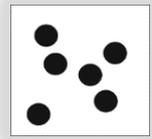
## Anhang A: Instruktion *2-back* Task

### 2-back Task

#### 1. Aufgabe

In 3 Bedingungen werden Sie mit je einer Sequenz bestehend aus der Abfolge von Stimuli einer dieser 3 Typen:

- 6 verschiedene Geräusche - AUDITIV
- 6 verschiedenen Bildern (z.b. Abbildung rechts) - VISUELL
- 6 verschiedenen Bilder und Töne gekoppelt - BIMODAL



konfrontiert. Die Stimuli sind randomisiert über die gesamte Sequenz verteilt.

- Jede Bedingung besteht aus 5 Blöcken mit je 60 Stimuli = 300 Stimuli.
- Ein Stimulus wird immer 1,5 Sekunden lang präsentiert, danach folgt eine Pause von 1 Sekunde in der Sie einen grauen Bildschirm sehen.
- In der auditiven Bedingung markiert ein Fixationskreuz am Bildschirm die Stimulus-Zeit von 1,5 Sekunden während Sie das Geräusch hören.
- **Ihre Aufgabe ist es**, bei jedem Stimulus zu entscheiden ob der gerade präsentierte Stimulus identisch ist mit dem, welcher zwei Positionen zuvor gezeigt wurde.
- Ist der Ton, das Bild oder Bild/Ton identisch mit dem zwei Stellen zuvor, muss die linke Maustaste gedrückt werden.
- Ist der Ton, das Bild oder Bild/Ton nicht identisch mit dem zwei Stellen zuvor, muss die rechte Maustaste gedrückt werden.
- Es muss also immer eine Maustaste gedrückt werden. Dies kann während der Stimulus-Präsentation geschehen, oder auch in der Pause danach.
- Bsp.-Sequenz: 1 - 4 - 1 - 2 - 3 - ... Bei der Präsentation des 3. Stimulus (1) muss die linke Maustaste gedrückt werden, da zwei Stellen davor auch eine 1 gezeigt wurde. Beim 4. Stimulus (2) dagegen die rechte Maustaste, da zwei Stellen vorher eine 4 präsentiert wurde.

... bitte wenden!

## **2. Ablauf**

- Sie absolvieren für jede der 3 Bedingungen 5 Blöcke mit jeweils 60 Stimuli.
- Zu Beginn jedes Blocks wird in der Mitte des Bildschirms ein Fixationskreuz für 2 Sekunden gezeigt, welches Sie fixieren sollen. Danach beginnt automatisch die Präsentation der jeweiligen Stimulus-Sequenz.
- Wenn ein Block beendet ist, wird dies auf dem Bildschirm angezeigt. Sie bestimmen, wann der nächste Block begonnen wird, indem Sie eine beliebige Tastatur-Taste drücken.
- Nach jedem Block und jeder Bedingung kann nach Bedarf eine Pause eingelegt werden.
- Das gesamte Experiment dauert ca. 40 Minuten.

Bei auftretenden Fragen wenden Sie sich bitte an den Versuchsleiter.

Bitte führen Sie die Aufgabe so genau wie möglich aus...

Viel Spaß! 😊

## Anhang B: Hit-Verteilung

Block																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1			x			x		x			x				x		x		x	
2				x			x						x		x			x		
3			x	x			x			x		x			x			x		x
4			x		x		x			x			x				x		x	
5				x			x		x		x			x				x		

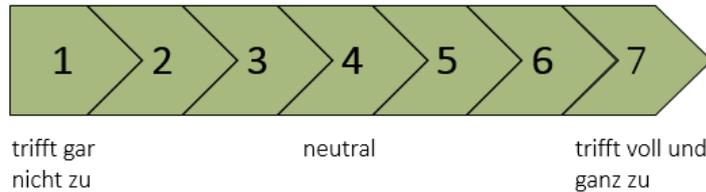
Block																				
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	x			x				x					x			x		x		
2	x			x			x							x			x			
3			x				x		x				x	x			x			x
4	x			x		x		x		x			x		x		x			x
5	x		x			x								x			x		x	

Block																				
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	x				x		x		x		x			x				x		
2			x		x			x			x			x			x			
3		x			x			x		x			x				x		x	
4			x				x		x		x			x		x		x		x
5	x			x				x			x		x			x				

## Anhang C: Fragebogen

### Fragebogen Experiment

Dieser Fragebogen enthält Aussagen zu Verhaltensweisen beim Lösen des 2-back Tasks. Bitte kreuzen Sie für jede Aussage an, inwieweit Sie dieser Aussage zustimmen.



Markieren Sie bitte die zutreffende Aussage durch Einkreisen.

1	Das Experiment hat mir Spaß gemacht	1	2	3	4	5	6	7
2	Während des Experimentes war ich motiviert	1	2	3	4	5	6	7
3	Ich fand die Aufgaben schwierig	1	2	3	4	5	6	7
4	Ich habe das Gefühl im Experiment gut abgeschnitten zu haben	1	2	3	4	5	6	7
5	Im Laufe des Experiments fiel mir das Lösen der Aufgabe leichter	1	2	3	4	5	6	7
6	Hatten Sie bestimmte Strategien zum Lösen der Aufgaben? Wenn ja, welche?							
7	Fanden Sie, dass eine Modalität besonders schwierig oder besonders einfach zu lösen war?							
8	Anmerkungen zur Versuchsdurchführung und zum Versuchsaufbau							