

Das räumliche Arbeitsgedächtnis - Der Einfluss von Interferenz, Augenbewegung, Distanz und Verzögerung

Bachelorarbeit der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von
Eva Vennemann
Tübingen, November 2019

1 Erklärung

Hiermit erkläre ich, Eva Vennemann,

- dass ich diese Arbeit selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.
- dass alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet sind,
- dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist oder bereits veröffentlicht wurde.

Tübingen, den 12. November 2019

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Erklärung	1
2	Zusammenfassung	3
3	Einleitung	3
3.1	Das Gedächtnis	3
3.2	Das Arbeitsgedächtnis	4
3.2.1	Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell	4
3.2.2	Embedded Processing Model nach Cowan	6
3.3	Neuronale Grundlage	6
3.3.1	Lage des Arbeitsgedächtnisses im Gehirn	6
3.3.2	Persistente Neuronenaktivität während der Verzögerungszeit	8
3.4	Räumliche Interferenz	10
3.5	Augenbewegung	12
3.6	Verzögerungszeit	14
3.7	Neuheiten und Hypothesen	15
4	Material und Methoden	16
4.1	Versuchspersonen	16
4.2	Stimulus	17
4.3	Design	17
4.4	Prozedur	18
4.5	Statistische Analysen	18
5	Resultate	19
5.1	Effekte der verschiedenen Versuchsbedingungen	19
5.1.1	Überblick	19
5.1.2	Interaktionen	28
5.2	Rohdaten der Mausclicks	31
5.3	<i>overshoots</i> und <i>undershoots</i>	34
5.4	Mauspfade	36
6	Diskussion	37
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	38
6.2	Beurteilung der Hypothesen	38
6.3	Details der vier Versuchsbedingungen	38
6.3.1	Interferenz	39
6.3.2	Augenbewegung	40
6.3.3	Verzögerungszeit	40
6.3.4	Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz	41
6.4	<i>overshoots</i> und <i>undershoots</i>	42
6.5	Mauspfade und Sakkaden	42
6.6	Schlussfolgerung	44

2 Zusammenfassung

Das räumliche Arbeitsgedächtnis ist relevant für viele alltägliche Situationen wie Kochen, Navigieren und allgemein kognitive Aufgaben. Um weitere Erkenntnisse über das Arbeitsgedächtnis zu erlangen wird in der vorliegenden explorativen Arbeit getestet, welche Einflussfaktoren die Leistungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses beeinflussen. Die vier gewählten Faktoren Interferenz, Augenbewegung, Verzögerung und Abstand und haben jeweils zwei Ausprägungen. Beim Faktor Interferenz wird in der Verzögerungszeit der Hauptaufgabe eine akustische Nebenaufgabe gestellt, in welcher Probanden die Richtung eines Klangs identifizieren sollen. Die Augenbewegung ist entweder fixiert auf einem Kreuz in der Mitte des Monitors oder frei wählbar. Für die Verzögerung werden zwei Verzögerungszeiten (eine Sekunde und sechs Sekunden) verwendet. Der Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz wird jeweils normiert auf einen kurzen und einen langen Abstand (gemessen in Pixeln). Die Auswirkungen der vier Faktoren werden in einer räumlichen Verzögerungsaufgabe, welcher der aus Funahashi et al. (1989) nachempfunden ist, getestet. Dabei soll der Ort eines für kurze Zeit erscheinenden Punktes erinnert und nach der Verzögerung mittels Mausclick wiedergegeben werden. Auf Grundlage der gemessenen Daten von 16 Probanden werden Genauigkeits- und Präzisionsfehler ermittelt. Die Interferenzaufgabe zeigt dabei keinen Effekt auf den berechneten Genauigkeitsfehler. Die Präzisionsfehler hingegen sind sensitiv in Bezug auf die Interferenzaufgabe. Des weiteren führt eine fixierte Augenbewegung zu einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit in der Hauptaufgabe. Eine längere Verzögerung und ein längerer Abstand haben ebenfalls einen starken negativen Effekt auf die Leistungsfähigkeit.

3 Einleitung

3.1 Das Gedächtnis

Das Gedächtnis bietet die Möglichkeit Informationen zu speichern, zu transformieren, zu manipulieren und wiederzugeben. Es lässt sich zwischen drei Gedächtnisarten unterscheiden: dem sensorischen Gedächtnis, dem Kurzzeitgedächtnis und dem Langzeitgedächtnis (Atkinson and Shiffrin, 1968). Wie lange Informationen gespeichert werden können, variiert zwischen den Gedächtnissen. Das sensorische Gedächtnis kann Informationen für Millisekunden bis Sekunden speichern (Averbach and Coriell, 1961) und wird daher auch Ultrakurzzeitgedächtnis genannt. Das Kurzzeitgedächtnis behält Informationen länger und zwar für mehrere Sekunden (Engel et al., 2018, S.899). Im Gegensatz zum sensorischen Gedächtnis und Kurzzeitgedächtnis ist das Langzeitgedächtnis kein temporärer, sondern ein permanenter Speicher und kann Informationen für Monate bis Jahre speichern (Engel et al., 2018, S.899). Außerdem unterscheiden sich die Gedächtnisse in der Art der Informationen, die sie speichern. Das sensorische Gedächtnis behält sensorische Informationen, beispielsweise visuelle oder auditive. Das Kurzzeitgedächtnis, welches Teil des Arbeitsgedächtnisses ist, kann eine begrenzte Menge an Informationen speichern und abrufbar halten. Das Langzeitgedächtnis lässt sich in das deklarative und das prozedurale Gedächtnis unterteilen. Des weiteren wird das deklarative Gedächtnis in das semantische und das episodische Gedächtnis unterteilt. Das semantische Gedächtnis speichert allgemeine Fakten, wie dass Berlin die Hauptstadt von Deutschland ist. Das episodische Gedächtnis beinhaltet Episoden, Ereignisse und Fakten aus dem eigenen Leben, beispielsweise der Name der Mutter. Das prozedurale Gedächtnis speichert Verhalten und Fertigkeiten, wie Fahrrad fahren oder Klavierspielen (Engel et al., 2018, S.906).

Informationen, die vom sensorischen Gedächtnis in das Kurzzeit- beziehungsweise Arbeitsgedächtnis gelangen sollen, müssen aufarbeitet werden. Dies wird zum Beispiel durch eine Merkmalsanalyse, eine Benennung oder eine Wiedererkennung von Mustern bewerkstelligt. Im Arbeitsgedächtnis

nis können die Informationen durch Wiederholung abrufbar gehalten werden. Um Informationen nun langfristig zu speichern, sie also in das Langzeitgedächtnis zu überführen, müssen diese mit Hilfe des Arbeitsgedächtnisses eingeübt werden. Dies geschieht, indem die Informationen immer wieder abgerufen und wiederholt werden. Eine gespeicherte und abrufbare Information wird dann Engramm genannt. Das Gedächtnis bildet sich aus der Gesamtheit aller Engramme (Engel et al., 2018, S.906).

3.2 Das Arbeitsgedächtnis

Das folgende Beispiel soll verdeutlichen, wie die unterschiedlichen Gedächtnisse in alltäglichen Situationen funktionieren und interagieren. Das Kochen nach einem Rezept benötigt Prozesse des Arbeitsgedächtnisses, aber auch Prozesse des Kurzzeitgedächtnisses und des Langzeitgedächtnisses. Welche Zutaten wurden bereits verarbeitet? Diese Information wird im Kurzzeitgedächtnis ist (Cowan, 2008) vorübergehend gespeichert. Prozesse des Arbeitsgedächtnisses sorgen für eine Aufrechterhaltung der Information und können diese für mehrere Sekunden bis Minuten verfügbar halten (Eriksson et al., 2015). Zukünftige Schritte (des Kochens) müssen geplant werden, dies geschieht über Prozesse des Arbeitsgedächtnisses. Die Fähigkeit Informationen vorausschauend zu nutzen unterscheidet das Arbeitsgedächtnis vom Kurzzeitgedächtnis, welches Informationen passiv speichert (Eriksson et al., 2015). Müssen wir nun in einem nächsten Schritt zum Beispiel eine Zwiebel schneiden, benötigen wir Informationen aus dem Langzeitgedächtnis. Hier werden Fakten und Ereignisse für Monate bis Jahrzehnte gespeichert (Engel et al., 2018) und können mit Hilfe des Arbeitsgedächtnisses reaktiviert werden (Cowan, 2008).

Die Speicherung im Langzeitgedächtnis beruht auf physiologischen und morphologischen Veränderungen der Synapsen. Je öfter man sich Informationen ins Gedächtnis ruft, desto stärker verfestigen sich die Wege im Langzeitgedächtnis. Im Gegensatz zu dieser Speicherung in Form von Hirnstruktur, werden die Informationen im Arbeitsgedächtnis in Form von Hirnaktivität gespeichert (Funahashi et al., 1989).

Das Arbeitsgedächtnis lässt sich als ein kognitives System definieren, welches kurzzeitig Informationen speichert, die für Erkenntnisse und Handlungen nötig sind (Zimmer, 2008). Beschränkungen erfährt es durch Zeit, Repräsentationsformat (beispielsweise Vorstellungsvermögen), Aufmerksamkeitskontrolle und Menge der gespeicherten Informationen. Aufgaben des Arbeitsgedächtnisses finden im Jetzt statt, nicht in Vergangenheit oder Zukunft. Diese Aufgaben sind komplexe kognitive Leistungen wie Planen, Ausführung von Verhalten (Cowan, 2008), logisches Denken, Beurteilung und Treffen von Entscheidungen (Funahashi and Andreau, 2013).

3.2.1 Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell

Früher galt das Arbeitsgedächtnis als einheitliches System, das nur eine Aufgabe bearbeiten kann. Das änderte sich, als Baddeley et al. (1974) entdeckten, dass das Gedächtnis sehr wohl mehrere Aufgaben gleichzeitig bearbeiten kann, sofern die Aufgaben unterschiedlichen Typs waren; zum Beispiel eine räumliche und eine visuelle Aufgabe. Sollten zwei Aufgaben gleichen Typs durchgeführt werden, verschlechterte sich die Leistungsfähigkeit der Hauptaufgabe. Daraus schlussfolgern Baddeley et al. (1974), dass das Arbeitsgedächtnis, welches für diese Leistungen verantwortlich ist, aus mehreren Komponenten bestehen muss. Es entstand das Mehrkomponentenmodell des Arbeitsgedächtnisses. Demnach besteht das Arbeitsgedächtnis aus drei Komponenten: der zentralen Exekutive, der phonologischen Schleife und dem visuell-räumlichen Notizblock. Die zentrale Exekutive ist die Kontrollinstanz der Subsysteme und dient der Koordination zwischen ihnen. Zudem kann sie zwischen Strategien des logischen Denkens und Speicherstrategien auswählen. Sie hat eine limitierte Aufmerksamkeitskapazität. Außerdem wird sie durch die beiden Speichersysteme: die phonologische Schleife und den visuell-räumlichen Notizblock, unterstützt (Baddeley, 2003).

Die in ihrer Kapazität limitierte phonologische Schleife basiert auf Lauten und Sprache und dient dazu, sprachliche Informationen zu manipulieren und zu speichern. Sie ist ein Zwei-Komponentenmodell, bestehend aus einem passivem phonologischem Speicher, welcher auditorische Informationen für ein paar Sekunden speichern kann und einem artikulatorischen Wiederholungsprozess (Rehearsal). Dieser Wiederholungsprozess ermöglicht es sprachliche Informationen durch ein inneres Sprechen (subvocal speech) aufzufrischen. Auditorische Informationen, beispielsweise ein ausgesprochenes Wort, werden instantan in den passiven phonologischen Speicher aufgenommen, können aber über den artikulatorischen Wiederholungsprozess aufgefrischt und dadurch kurzfristig erhalten werden. Informationen, die nicht auditorisch sind, beispielsweise ein geschriebenes Wort, müssen erst codiert werden, um in den phonologischen Speicher aufgenommen zu werden. Die Codierung erfolgt durch die Verbalisierung des Wortes, also durch inneres Sprechen (Baddeley, 2003).

Der visuell-räumliche Notizblock ist ebenfalls relevant für die Speicherung und Veränderung von Informationen, genauer gesagt für die Speicherung und Veränderung von visuellen und räumlichen Informationen. Räumliche und visuelle Informationen werden getrennt verarbeitet. Das zeigt sich vor allem darin, dass die Leistungsfähigkeit bei räumlichen Hauptaufgaben kaum von visuellen Aufgaben gestört wird und umgekehrt (Klauer and Zhao, 2004). Das Limit der Kapazität visueller Arbeitsgedächtnisprozesse liegt bei drei bis vier Objekten (Luck and Vogel, 1997).

Mit diesem Drei-Komponentenmodell des Arbeitsgedächtnisses gibt es allerdings einige Probleme. So wird die Interaktion von Arbeitsgedächtnis und Langzeitgedächtnis nicht miteinbezogen. Auch gibt es keinen Mechanismus, bei welchem das phonologische und das visuell-räumliche Subsystem interagieren können. Das Modell kann des weiteren das Chunking (die Gruppenbildung von Objekten zu Einheiten und die damit gesteigerte Kapazität) nicht erklären (Baddeley, 2003). Aufgrund dessen fügt Baddeley (2000) eine vierte Komponente hinzu: den Episodischen Puffer (Siehe Abb.1). Dieser stellt einen weiteren Speicher mit limitierter Kapazität dar, der Informationen unterschiedlicher Modalität verbindet, um sie als integrierte Episoden abzuspeichern. Auch die Verbindung vom Langzeit- und Arbeitsgedächtnis wird ermöglicht. Langzeitinformationen werden in den Episodischen Puffer geladen und können dadurch vom Arbeitsgedächtnis manipuliert werden. Zudem können dabei neue Repräsentationen gebildet werden (Baddeley, 2003).

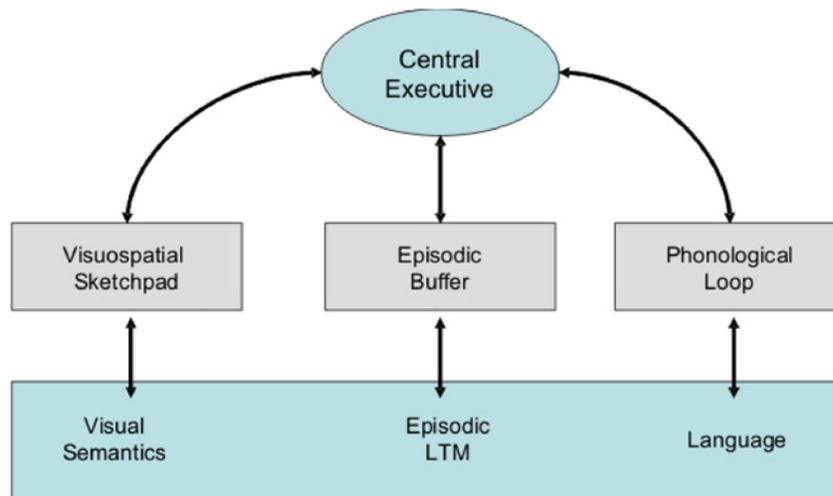


Abbildung 1: Mehrkomponenten-Modell des Arbeitsgedächtnis nach Baddeley, aus Zimmer (2008).

2008 fasst Zimmer die Erkenntnisse über das visuelle und das räumliche Arbeitsgedächtnis in einer Übersichtsarbeit zusammen. Zimmer bestätigt, dass das Arbeitsgedächtnis visuelle und räum-

liche Informationen unterschiedlich verarbeitet. Das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis beinhaltet Prozesse, die auf Basis von sensorischen, beispielsweise visuellen oder auditorischen, und auf räumlichen Informationen agieren. Diese Informationen können über mediale Strukturen des Temporallappens untereinander oder mit Merkmalen verbunden werden. Zudem können die Informationen über Strukturen des Präfrontalkortex, welcher Teil des Frontallappens ist, reaktiviert oder manipuliert werden. Damit bildet der Präfrontalkortex eine wichtige Kontrollstruktur, die in Kapitel 3.3.1 genauer beschrieben wird.

Anders als bisher angenommen, beschreibt Zimmer (2008) das Arbeitsgedächtnis nicht als einheitliches System, welches unabhängig von anderen neuronalen Systemen arbeitet. Vielmehr ist es ein verteiltes Netzwerk aus unterschiedlichen neuronalen Strukturen. Die unterschiedlichen Komponenten dieses Netzwerks können miteinander interagieren und sind teilweise strukturell verbunden beziehungsweise nutzen teilweise sogar die gleichen neuronalen Strukturen. Dies gilt sowohl für die einzelnen Komponenten des Arbeitsgedächtnis als auch für andere kognitive Prozesse. So nutzen die Wahrnehmung und die Bildsprache das gleiche neuronale Netzwerk wie das Arbeitsgedächtnis. Auch das Langzeitgedächtnis und das Arbeitsgedächtnis haben gemeinsame neuronale Strukturen. Informationen des Langzeitgedächtnis können in den Speicher des Arbeitsgedächtnis geladen werden und sind damit abrufbar (Cowan, 2008). Da die Anforderungen der beiden Gedächtnisse aber unterschiedlich sind, sind auch deren Charakteristika andere (Zimmer, 2008).

3.2.2 Embedded Processing Model nach Cowan

Cowan stellt 1999 ein alternatives Modell des Arbeitsgedächtnis auf, das Embedded Processing Model, welches das modulare Modell von Baddeley teilweise in Frage stellt. Baddeley zeigt, dass Aufgaben gleichen Typs sich gegenseitig stören und schließt daraus auf sein Modell. Allerdings kann sich auch die Verarbeitung von Informationen unterschiedlichen Typs sich gegenseitig negativ beeinflussen. Versucht man sich beispielsweise eine Telefonnummer zu merken, wird die Zahlenfolge verbal in der phonologischen Schleife gespeichert. Wenn nun während der Verzögerungszeit, also während der Aufrechterhaltungsphase, nicht-verbaler Hintergrundlärm präsentiert wird, stört das die Verarbeitung der Zahlenfolge und zwar umso mehr, je größer der Lärm in Amplitude und Frequenz schwankt (Jones et al., 1993). Auch Awh et al. (1998) zeigen, dass die Leistungsfähigkeit bei einer räumlichen Aufgabe sinkt, wenn die Aufmerksamkeit durch eine visuelle Aufgabe abgelenkt wird. Das Embedded Processing Model handelt weniger von einem Arbeitsgedächtnis, welches abhängig von der Modalität ist, sondern vielmehr stellt es die selektive Aufmerksamkeit in den Vordergrund. Die Leistungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses ist durch den begrenzten Fokus der Aufmerksamkeit limitiert (Karnath and Thier, 2012).

Es hat sich gezeigt, dass das Arbeitsgedächtnis verbale, visuelle und räumliche Informationen auf unterschiedliche Weise verarbeitet. Daher können nur begrenzt Aufgaben zweier Modalitäten zeitgleich bearbeitet werden. Das funktioniert allerdings nur, wenn der Fokus der Aufmerksamkeit nicht überlastet ist. Die Verarbeitung der Informationen hängt damit nicht nur von der Art und Menge der Information, sondern auch von der Kapazität der selektiven Aufmerksamkeit ab.

3.3 Neuronale Grundlage

3.3.1 Lage des Arbeitsgedächtnisses im Gehirn

Die Prozesse des Arbeitsgedächtnisses zur Aufrechterhaltung der Information eines visuellen Objekts sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Wahrnehmung des Objekts geschieht durch den Occipitallappen. Die Aufmerksamkeit wird im Parietallappen und im Frontallappen repräsentiert. Die Aufmerksamkeit ist relevant für die Aufrechterhaltung der Objektinformationen, des Ziels der Aufgabe und den

Regeln der Aufgabe. Die Aufrechterhaltung der Informationen geschieht durch den Wiederholungsprozess. Zudem können die Objektinformationen durch das Langzeitgedächtnis im Temporallappen repräsentiert und durch Lernprozesse dauerhaft gespeichert werden. Abbildung 2 zeigt, wie sehr die Prozesse und Repräsentationen im Gehirn verteilt sind. Außerdem interagieren die verschiedenen Gehirnstrukturen miteinander.

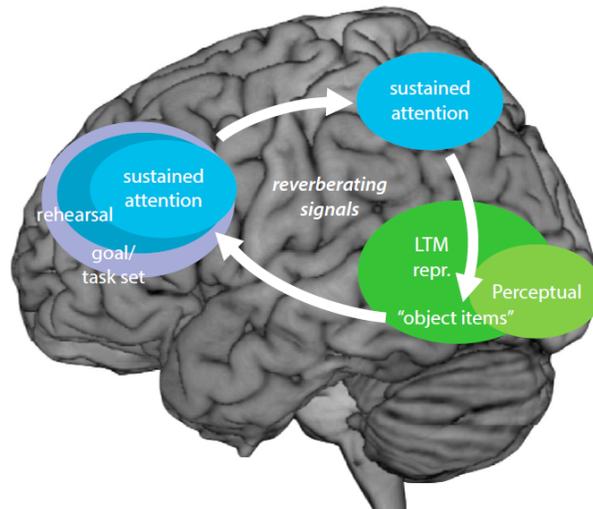


Abbildung 2: Schematische Kartierung der Arbeitsgedächtnisprozesse während der Aufrechterhaltung einer visuellen Information, aus Eriksson et al. (2015).

Nach den Ergebnissen aus Läsionsstudien ist der Temporallappen für das visuelle und das verbale Arbeitsgedächtnis relevant. So zeigt ein Patient mit einer Läsion im Temporallappen eine Beeinträchtigung des visuellen und verbalen, nicht aber des räumlichen Arbeitsgedächtnisses. Bei Läsionen des Parietallappens zeigte sich ein umgekehrter Effekt. Der Parietallappen ist demnach an der Verarbeitung räumlicher Informationen beteiligt.

Welche Gehirnregionen in die Prozesse des Arbeitsgedächtnisses involviert sind, hängt von einigen Faktoren ab. Darunter die Art der zu speichernden Informationen, welche beispielsweise visuell, räumlich oder verbal sind, der Aufgabe - zum Beispiel Aufrechterhaltung oder Manipulation der Information - und das Stadium der Aufgabe - zum Beispiel während der Codierung, Verzögerungszeit oder Antwortphase. Dabei kann ein Objekt in unterschiedlichen Regionen repräsentiert werden. So kann ein visuelles Objekt sowohl visuelle als auch räumliche Informationen beinhalten (Eriksson et al., 2015).

Der Präfrontalkortex Der Präfrontalkortex spielt eine wichtige Rolle bei der Funktion des Arbeitsgedächtnisses. Denn er hat als Ort der Zentralen Exekutiven einige kognitive Kontrollfunktionen, auch exekutive Funktionen genannt. Einige dieser Funktionen sind die Kontrolle der Aufmerksamkeit, die Organisation des Verhaltens, das Planen von komplexen zielgerichteten Aufgaben, Fähigkeit Langzeitinformationen zugänglich zu machen und zu verändern und die Überwachung von aktuellen internen und externen Zuständen. Dazu gehört auch die Überwachung anderer kortikaler und subkortikaler Strukturen durch top-down-Befehlsignale. Diese Signale kontrollieren auch Prozesse der Langzeiterinnerung im Temporallappen wie die Codierung der Erinnerung und den Abruf von Information (Funahashi and Andreau, 2013). Der aktive Wiederholungsprozess wird vom Präfrontalkortex durchgeführt. Vor allem nach einer Ablenkung wird dieser Prozess durch top-down-Signale medial-temporaler Strukturen unterstützt. Diese Strategie führt zu einer endogenen Erholung, bei

welcher es keine exogenen Hinweise benötigt (Zimmer, 2008). Die Wichtigkeit des Präfrontalkortex zeigt sich an einer Läsionsstudie. Ein Patient mit einer Läsion des Präfrontalkortex ging bei einer Labyrinthaufgabe immer wieder in die gleichen Sackgassen und konnte die Aufgabe nicht lösen. Demnach konnte er den aktuellen Zustand, also die Information an die bereits missglückten Wege, nicht überwachen und aktualisieren. Auch das Planen einer alternativen Route war stark beeinträchtigt (Engel et al., 2018, S.903).

Des Weiteren weist der Präfrontalkortex eine räumliche Spezialisierung auf. Der ventrale Kortex ist mehr in verbalen und der dorsale Kortex mehr in räumlichen Aufgaben involviert (Nee et al., 2012).

3.3.2 Persistente Neuronenaktivität während der Verzögerungszeit

Funahashi et al. (1989) legen eine Basis für die neuronale Grundlage des Arbeitsgedächtnisses. Sie postulieren die persistente Aktivität präfrontaler Neuronen als ein neuronales Korrelat für die kurzzeitige Speicherung von räumlichen Informationen. Dazu untersuchen Funahashi et al. (1989) drei Rhesusaffen in einer blickmotorischen Verzögerungsaufgabe. In einer Fixationsphase sollen die Affen auf ein Kreuz in der Mitte eines Monitors schauen. Anschließend wird in der Peripherie ein visueller Punkt an einem von acht Orten für 0,5 Sekunden präsentiert. Nach einer Verzögerungszeit von 1,5 Sekunden, drei Sekunden oder sechs Sekunden beginnt die Antwortphase der Aufgabe. Das Fixationskreuz verschwindet und die Affen sollen eine Sakkade zu dem erinnerten Ort des Punktes machen. Nach jedem Durchlauf gibt es eine Pause von fünf Sekunden. Die Blickkoordinaten und die Aktivität während der Verzögerungszeit einiger präfrontaler Neurone werden gemessen. Eine Sakkade gilt als korrekt ausgeführt, wenn sich diese in einem Durchmesser von 6° um den Ort des Punktes befindet. Die Neurone werden durch ihre unterschiedliche Aktivität während der Verzögerungszeit eingeteilt. Es lässt sich zwischen einer directionalen und einer omnidirektionalen Aktivität unterscheiden. Die directionalen Neurone zeigen eine Aktivitätsänderung an bestimmten Orten des Punktes. So zeigt das präfrontale Neuron 5211 nur eine erhöhte Aktivität, wenn sich der Punkt bei 270° befindet (Siehe Abb.3). Bei den restlichen möglichen Orten ist die Neuronenaktivität supprimiert. Damit hat jedes directionale Neuron ein rezeptives Feld. Nur wenn der Punkt in diesem Feld gezeigt wird, zeigt das Neuron eine Aktivität.

Die omnidirektionalen Neurone sind unabhängig vom Ort des Punktes. Inhibitorische omnidirektionale Neurone supprimieren möglicherweise alle Sakkaden während der Verzögerungszeit.

Des Weiteren codieren präfrontale Neurone innerhalb jeder Hemisphäre meistens für kontralaterale Orte des Stimulus. Die Erinnerung an räumliche Informationen sind daher vermutlich lateralisiert (Funahashi et al., 1989).

Die Studie trägt zu weiteren Erkenntnissen bei. Die Neurone des Präfrontalkortex zeigen eine tonische Erregung. Diese hält auch während einer Verzögerungszeit von sechs Sekunden an und endet erst bei der Antwortinitiation. Verlängert sich die Verzögerungszeit, hält auch die Neuronenaktivität länger an, ebenso hält sie kürzer an, wenn sich die Verzögerungszeit verkürzt. Die persistente Aktivität der directionalen Neurone codiert für die räumlichen Koordinaten des präsentierten Punktes. Funahashi (2015) fügt später hinzu, dass auch visuelle, auditorische und taktile Informationen sowie Aufgabenregeln und vorhersehbare Belohnung in dieser Weise codiert werden können. Bei Fehlern der Affen war die Aktivität der Neurone geringer. Wenn die persistente Aktivität vermindert ist, ist es wahrscheinlicher Fehler zu begehen (Constantinidis et al., 2018). Dies zeigt, dass die präfrontalen Neurone nicht ausschließlich für räumliche Eigenschaften codieren, sondern für höhere Konzepte, wie Aufgabenstellung, Belohnung oder Erwartungen. Zudem zeigen Funahashi et al. (1989) den Einfluss der Verzögerung auf die Leistungsfähigkeit bei der Bearbeitung der Aufgabe. Je größer die Zeit zwischen Punktpräsentation und Antwortinitiation ist - je länger also die Verzögerung - desto weiter

sind die Landepositionen der Sakkaden der Affen gestreut. Jedoch sind auch bei diesen längeren Verzögerungszeiten die Sakkaden fast immer korrekt (Funahashi et al., 1989).

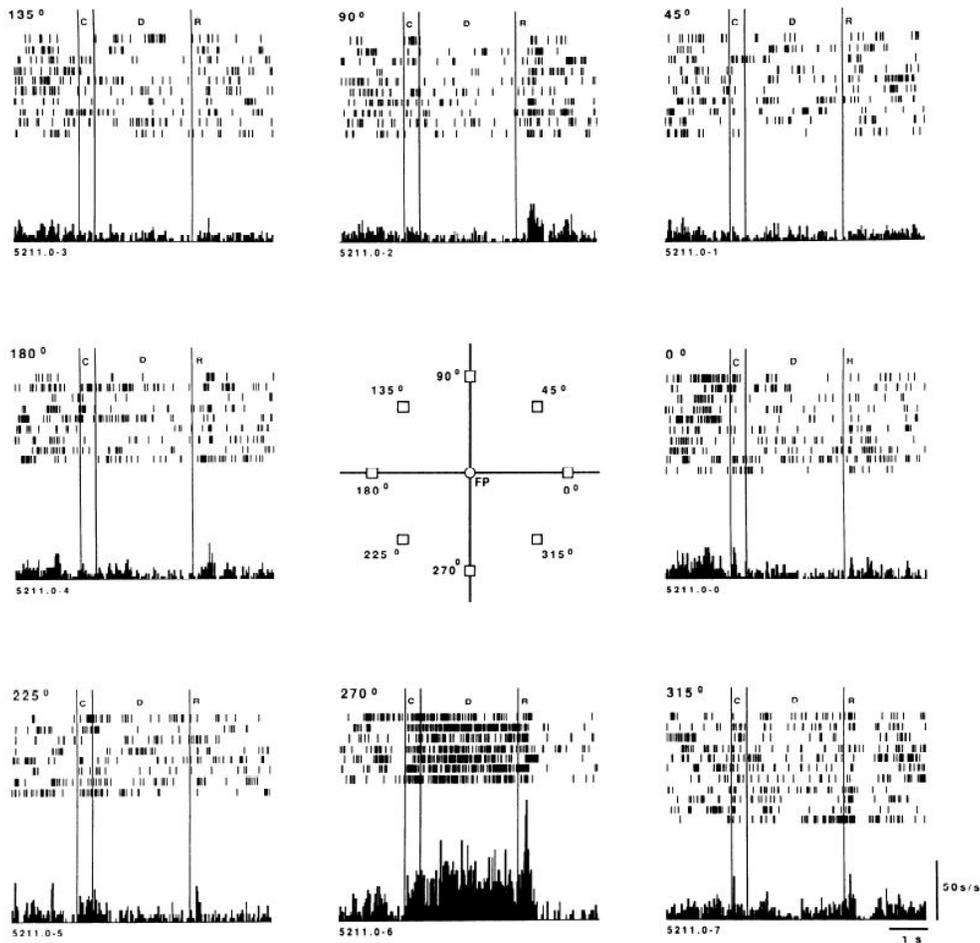


Abbildung 3: Direktionale Aktivität des präfrontalen Neurons 5211 während der Verzögerungszeit bei einer blickmotorischen Verzögerungsaufgabe, aus Funahashi et al. (1989).

Grundsätzlich ist die persistente Aktivität präfrontaler Neurone während der Verzögerungszeit ein neuronales Korrelat der temporären Informationsspeicherung und damit ein Korrelat des Kurzzeit- beziehungsweise Arbeitsgedächtnisses. Dieses neuronale Korrelat bezieht sich allerdings nur auf die kurzzeitige Speicherung von Informationen, nicht auf weitaus komplexere Funktionen des Arbeitsgedächtnis wie logisches Denken, Manipulationen oder das Rechnen einer Matheaufgabe. Für solche komplexeren Aufgaben wurde noch kein eindeutiges neuronales Korrelat gefunden.

Hinzuzufügen ist noch, dass das Lösen einer Aufgabe zu einer Aktivität einzelner Neurone bestimmter neuronaler Strukturen, wie zum Beispiel die des Präfrontalkortex, führt. Solange die Neurone aktiv sind, ist auch die Information abrufbar. Stoppt die äußerliche Aktivierung, beginnen die Repräsentationen zu verblassen. Sie müssen daher entweder durch einen endogenen oder exogenen Hinweis aufgefrischt werden. Nur dann sind die Repräsentationen Teil des mentalen Prozesses und die Informationen befinden sich im Arbeitsgedächtnis und sind abrufbar (Zimmer, 2008).

3.4 Räumliche Interferenz

Um Prozesse des Arbeitsgedächtnisses zu verstehen, betrachtet man den Einfluss von Interferenzen. Interferenz bezeichnet, nach dem Lexikon der Psychologie, »den störenden Einfluss eines Vorgangs auf einen anderen« (Wirtz et al., 2014). Weiter wird noch zwischen der proaktiven und der retroaktiven Interferenz unterschieden. Bei der proaktiven Interferenz interferieren vorherige Erinnerungen mit der Speicherung von neuen Erinnerungen (Papadimitriou et al., 2014). Sie tritt auch auf, wenn Versuchspersonen mehrere Durchläufe einer Aufgabe absolvieren. Die Leistungsfähigkeit bei der Aufgabe verschlechtert sich mit steigender Anzahl der Durchläufe (Underwood, 1957). Die vorherige Erinnerung kann Interferenz verursachen, indem sie die aktuelle Erinnerung überschreibt, nichtsystematische Geräusche hinzufügt oder zu einer Verzerrung der aktuellen Erinnerung führt (Papadimitriou et al., 2014). Die retroaktive Interferenz tritt auf, wenn neue Erinnerungen mit alten interferieren, zum Beispiel wenn jemand seine alte Handynummer erinnern möchte, ihm aber nur seine neue Nummer einfällt (Karnath and Thier, 2012).

Die proaktive und die retroaktive Interferenzen beziehen sich auf neue und alte Erinnerungen, die sich negativ beeinflussen. Im Folgenden wird auf die Interferenz eingegangen, die entstehen kann, wenn zwei aktuelle neue Erinnerungen sich negativ beeinflussen, indem sie beispielsweise dieselben Verarbeitungswege nutzen. So kann sich die Leistungsfähigkeit in einer räumlichen Aufgabe durch eine sekundäre räumliche Aufgabe verringern (Klauer and Zhao, 2004). Es kommt zu einer Interferenz der Informationen der ersten und der zweiten Aufgabe. Generell sind die Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis für Ablenkung und Interferenz anfällig (Eriksson et al., 2015). Es stellt sich die Frage, wann und warum eine Interferenz auftritt. Die Studien, die sich mit dieser Thematik befassen, verwenden wie Funahashi et al. (1989) Verzögerungsaufgaben. Der Ablauf dieser Aufgaben ist zumeist gleich. Sie beginnen meist mit einer Eingewöhnungsphase, an welche sich die Einprägungsphase anschließt. In der Einprägungsphase wird der Stimulus präsentiert und die Versuchsperson beziehungsweise das Versuchstier hat Zeit, sich die relevanten Informationen über den Stimulus zu merken. Der Stimulus verschwindet und die Verzögerungszeit folgt. In dieser werden die Informationen, mit Hilfe von Prozessen des Arbeitsgedächtnis beziehungsweise des Kurzzeitgedächtnis, aufrechterhalten. Während dieser Phase können Sekundäraufgaben gestellt werden, die möglicherweise eine Interferenz hervorrufen. Teilweise werden die Sekundäraufgaben auch in der Einprägungsphase gestellt (Vgl. Meilinger et al., 2008). In der anschließenden Phase soll die Antwort gegeben werden. Nach einer kurzen Pause beginnt der nächste Durchlauf.

Nach diesem Schema untersuchen Meilinger et al. (2008), welche Arbeitsgedächtnisprozesse bei der Wegfindung eine Rolle spielen. Die Versuchspersonen sollen einen zuvor gelernten Weg durch das virtuelle Tübingen wiederfinden. In der Verzögerungszeit wird keine oder eine von drei Sekundäraufgaben gestellt, diese ist entweder verbal, visuell oder räumlich. Bei der räumlichen Sekundäraufgabe ertönt ein Klang über Kopfhörer und der Proband muss angeben, ob dieser von links, rechts oder von vorne kam. Im Vergleich zu der Kontrolle, also der Bedingung ohne Sekundäraufgabe interferieren alle drei Aufgaben mit der Wegfindung. Die verbale sowie die räumliche Sekundäraufgabe lösen eine größere Interferenz bei der Wegfindung aus als die visuelle. Die visuelle Sekundäraufgabe interferiert nur wenig mit der Wegfindung. Das Auftreten von Interferenz lässt den Schluss zu, dass die Wegfindung auf Verarbeitungsprozesse verbaler und räumlicher und weniger auf visueller Natur beruht.

Kessels et al. (1999) zeigen ihren Probanden fünf Bilder von alltäglichen Gegenständen auf einem Touchscreen. Diese werden an unterschiedlichen Orten gezeigt. Nach einer bestimmten Einprägungszeit verschwinden die Bilder. Die Probanden sollen nun aus einer Auflistung von Gegenständen die fünf gezeigten Bilder auswählen und diese an den vorherigen Ort ziehen. In der Verzögerungszeit wird eine zusätzliche visuelle oder räumliche Aufgabe gestellt. Als Kontrolle dient eine Bedingung

ohne Nebenaufgabe. Die räumliche Nebenaufgabe ist passiv, dabei flimmert der Bildschirm und ein weißer und ein schwarzer Hintergrund wechselt sich ab. Dieses schwarz-weiße Flimmern hat einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der räumlichen Hauptaufgabe im Vergleich zur Kontrollaufgabe und damit interferieren die räumlichen Informationen der Hauptaufgabe mit denen der Nebenaufgabe.

Auch Hecker and Mapperson (1997) zeigen den Einfluss einer Interferenz bei der Verarbeitung räumlicher Informationen. Sie präsentieren Versuchspersonen am Bildschirm eine 3 x 3 - Matrix. Im Hauptversuch werden fünf der Quadrate zufällig gefärbt. Anschließend verschwinden die farbigen Quadrate und nur die Grundstruktur der Matrix bleibt erhalten. Nun soll in der Reihenfolge, in welcher die farbigen Quadrate erschienen sind, auf den erinnerten Ort geklickt werden. Die Nebenaufgabe besteht analog zu Kessels et al. (1999) aus einem schwarz-weiß flimmernden Bildschirm. Zusätzlich zu dieser von Hecker and Mapperson (1997) als räumlich bezeichneten Aufgabe, wird in einer anderen Bedingung eine visuelle Nebenaufgabe gestellt, die ebenfalls passiv ist und aus dem Flimmern von sechs farbigen Hintergründen besteht. Eine Bedingung ohne Nebenaufgabe gibt es nicht. Die Effekte der räumlichen und der visuellen Nebenaufgabe auf die Hauptaufgabe werden verglichen. Die räumliche Nebenaufgabe interferiert dabei mehr mit der räumlichen Hauptaufgabe, als es die visuelle Nebenaufgabe tut.

Klauer and Zhao (2004) beschäftigen sich mit der Frage, ob das Arbeitsgedächtnis in eine visuelle und eine räumliche Komponente aufgeteilt werden kann. Dazu testen sie, ob eine visuelle oder eine räumliche Sekundäraufgabe bei der visuellen oder räumlichen Hauptaufgabe zu einer Interferenz führt. Auf einem schwarzen Computerbildschirm wird ein Punkt, welcher an acht Orten erscheinen kann, präsentiert. Nach einer Verzögerungszeit von zehn Sekunden dürfen die Probanden mit der Maus an den Ort klicken, an welchem sie den Ort des Punktes vermuten. Diese räumliche Hauptaufgabe ist der blickmotorischen Verzögerungsaufgabe von Funahashi et al. (1989) ähnlich, mit dem Unterschied, dass die Probanden hier keine Sakkade zu dem erinnerten Ort tätigen, sondern ihn mit der Maus anklicken. Die räumliche Sekundäraufgabe zeigt elf Sternchen. Von diesen bewegen sich zehn und eines ist stationär. Das stationäre Sternchen muss identifiziert und angeklickt werden. Die Sekundäraufgaben werden wieder in der Verzögerungszeit gestellt. Zudem gibt es eine Versuchsbedingung ohne Interferenzaufgabe, bei dieser wird während der Verzögerungszeit nur ein schwarzer Bildschirm gezeigt. Anschließend zeigt sich, dass räumliche Sekundäraufgaben stärker mit der räumlichen als mit der visuellen Hauptaufgabe interferieren. Daraus schließen Klauer and Zhao (2004) die Trennung des Arbeitsgedächtnisses in visuell und räumlich. Die aktuellen räumlichen Informationen der beiden räumlichen Aufgaben stören sich demnach in ihrer Verarbeitung und so kann die Information der Hauptaufgabe schlechter aufrechterhalten und abgerufen werden.

Tresch et al. (1993) zeigen ebenfalls eine räumliche Interferenz. Die räumliche Verzögerungsaufgabe ist wieder ähnlich zu der von Funahashi et al. (1989) und Klauer and Zhao (2004). Auf einem Monitor mit schwarzem Hintergrund wird ein Punkt in der Peripherie an einem von 16 möglichen Orten gezeigt. Mit der Maus soll nach einer Verzögerungszeit von zehn Sekunden auf den vermuteten Ort des Punktes geklickt werden. Die Antwort ist korrekt, wenn der Mausclick innerhalb eines Kreisbogens von 11° um den korrekten Ort ist. Die räumliche Sekundäraufgabe wird während der Verzögerungszeit gegeben und beinhaltet 16 Sternchen, von denen 15 in Bewegung sind und eines ist stationär. Das stationäre soll angeklickt werden. In anderen Bedingungen wird entweder eine visuelle oder keine Nebenaufgabe gestellt. In dieser letzten Bedingung warten die Probanden, bis sie antworten durften. Wie schon Klauer and Zhao (2004) feststellen, zeigt sich eine verschlechterte Leistungsfähigkeit in der räumlichen Hauptaufgabe, wenn eine räumliche Nebenaufgabe gestellt wird. Im Gegensatz zu keinen oder zu zusätzlichen visuellen Informationen, zeigen zusätzliche räumliche Informationen einen negativen Einfluss - also eine Interferenz - auf die Erinnerung an den Ort des Stimulus.

Weitere Erkenntnisse zur räumlichen Interferenz bietet die Studie von Macoveanu et al. (2007). Diese Arbeit beschäftigt sich primär mit der neuronalen Grundlage bei visuell-räumlichen Aufgaben, lässt aber dennoch auch andere Schlüsse zu. Hier wird wieder eine räumliche Verzögerungsaufgabe ähnlich zu der aus Funahashi et al. (1989) verwendet. Dazu müssen die Versuchspersonen ein Fixationskreuz in der Mitte eines Monitors fixieren und erhalten in der Peripherie Punkte, die an einem von 16 Orten erscheinen können. Es werden insgesamt fünf Punkte nacheinander gezeigt. Zwischen dem dritten oder vierten Punkt wird ein Distraktor, in Form eines Vierecks, präsentiert, welcher ignoriert werden soll. Die Probanden sollen in der Antwortphase die fünf Punkte in der Reihenfolge anklicken, in der sie erschienen sind. Der Effekt des Distraktors wird über ein Genauigkeitsmaß gemessen. Das Genauigkeitsmaß ist dabei die Distanz in Grad von dem Ort des präsentierten Punktes zu dem Ort, welchen die Probanden für diesen Punkt vermutet und angeklickt haben. Je kleiner die Distanz zwischen dem Ort des Punktes und dem des Distraktors, desto schlechter ist der relevante Ort erinnert. Daraus kann einerseits geschlossen werden, dass die beiden Informationen über die Orte bei größerer Ähnlichkeit stärker miteinander interferieren, da sie ähnliche Informationen verarbeiten. Zum anderen könnte der Distraktor die Aufmerksamkeit von dem relevanten Ort zu dem irrelevanten Ort verlagert haben, wodurch der eigentliche Ort schlechter erinnert werden kann. Auch dabei würde man nach der Definition des Lexikons der Psychologie (Wirtz et al., 2014) von einer Interferenz sprechen. Denn die Ablenkung der Aufmerksamkeit durch den Distraktor führt zu einem störenden Einfluss auf die Erinnerung des relevanten Ortes. Allerdings ist die erstgenannte Erklärung wahrscheinlicher. Denn wenn der Distraktor weiter entfernt vom relevanten Punkt ist, gibt es keinen signifikanten Effekt auf die Genauigkeit, die man jedoch durch die Ablenkung der Aufmerksamkeit erwarten würde.

Zusammengefasst zeigen die genannten Studien eine Interferenz bei der Verarbeitung zweier räumlicher Informationen. Im Gegensatz dazu interferieren visuelle oder keine zusätzlichen Informationen nicht oder nur kaum mit räumlichen Informationen.

3.5 Augenbewegung

Neben der räumlichen Interferenz ist die Augenbewegung ein weiterer wichtiger potentieller Einflussfaktor der Leistungsfähigkeit einer räumlichen Verzögerungsaufgabe. In vielen Studien wird ausschließlich mit fixierter Augenbewegung während der Präsentation des Hinweisreizes und der Verzögerungszeit gearbeitet (Funahashi et al., 1989; Klauer and Zhao, 2004; Macoveanu et al., 2007; Srimal and Curtis, 2008; Tresch et al., 1993). De Haan et al. (2008) hingegen arbeiten sowohl mit unterdrückter (covert) als auch mit freier (overt) Augenbewegung. In ihrer Studie untersuchen sie, ob fixierte und freie Augenbewegung ähnliche Hirnregionen beanspruchen. Sie verwenden dabei eine räumliche Aufgabe ohne Verzögerung. Das Versuchsdesign ist so gestaltet, dass die Möglichkeit einer Verschiebung der Aufmerksamkeit getestet werden kann. Die Ergebnisse zeigen eine große Überlappung der aktiven Hirnregionen bei beiden Bedingungen. Über den möglichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bezüglich der Aufgaben wird in der Studie nicht eingegangen.

Im Gegensatz dazu beschäftigen sich Godijn and Theeuwes (2012) mit der Frage, ob Sakkaden die Gedächtnisleistung verbessern. Sakkaden könnten als Mechanismus der Wiederholung (Rehearsal) dienen. Dieser Mechanismus wäre dann ein Analogon zum Wiederholungsprozess in der phonologischen Schleife. Um dies zu untersuchen, wird eine räumliche Verzögerungsaufgabe gestellt. Die Probanden sollen zunächst ein Kreuz fixieren. Dann folgt die Präsentation von sechs Ziffern in einer bestimmten Reihenfolge. In dieser Encodierungsphase bleibt das Kreuz weiterhin fixiert, sodass keine Sakkaden ausgeführt werden können. Im ersten Experiment bleibt die Augenbewegung während der Verzögerungszeit entweder uneingeschränkt - die Anzahl der Sakkaden ist somit beliebig - oder aber die Sakkaden sind beschränkt auf die ersten oder die letzten drei Ziffern. In Experiment 2 wird

im Unterschied zu Experiment 1 die eingeschränkte Augenbewegung auf einen frei wählbaren Punkt fixiert. Die unterdrückte Bedingung enthält damit keine Möglichkeit zur Ausführung von Sakkaden. Die freie Augenbewegung bleibt unverändert. Nach der Verzögerung sollen die Orte und die Reihenfolge der Ziffern durch Mausklicks wiedergegeben werden. Die Abweichung von dem Ort einer Ziffer zum getätigten Mausklick der Probanden wird in Grad berechnet und als Fehler der Mausantwort bezeichnet. Diese abhängige Variable kann als Maß für die Genauigkeit verwendet werden. Experiment 1 zeigt, dass bei Fixierung der ersten drei Ziffern die Antworten ebendieser Ziffern genauer ausfallen als mit freier Augenbewegung. Eine Fixation der letzten drei Ziffern führt zu einem höheren Fehler der Mausantwort in Bezug auf die ersten drei Ziffern und der Ziffern fünf und sechs. Die Fixation der ersten drei Ziffern bewirkt eine verbesserte Erinnerung dieser Orte, wohingegen die Fixation der letzten drei Ziffern zu einer Verschlechterung der Erinnerung von Teilen dieser Orte und der ersten drei Ziffern führt. Die Ausführung von Sakkaden kann demnach die Aufrechterhaltung der räumlichen Informationen sowohl fördern, als auch verschlechtern. In Experiment 2 zeigen die beiden Bedingungen der Augenbewegungen keinen Effekt auf die räumliche Erinnerung. Jedoch ist es möglich, dass die versteckte Aufmerksamkeit (covert attention) ebenfalls visuell-räumliche Informationen mit Hilfe eines Wiederholungsprozess aufrechterhalten kann. Es ist möglich, dass die tatsächliche Ausführung der Augenbewegung nicht für die Förderung des Arbeitsgedächtnisses verantwortlich ist, sondern das vielmehr die Programmierung der Augenbewegung entscheidend ist, welche auch bei unterdrückter Augenbewegung stattfindet. Der Wiederholungsprozess würde dann nicht nur aus den expliziten, sondern auch aus den impliziten Augenbewegungen bestehen (Godijn and Theeuwes, 2012).

Tremblay et al. (2006) untersuchen ebenfalls Sakkaden als möglichen Wiederholungsmechanismus räumlich-visueller Informationen. Sie zeigen dabei sieben Punkte in zeitlicher Abfolge, darauf folgt eine Verzögerungszeit von zehn Sekunden. Die Probanden können nun entweder ihre Augen frei bewegen oder sollen zwei Punkte fixieren. In der Antwortphase soll die Reihenfolge der Punkte durch das Zeigen mit einem Finger wiedergegeben werden, dabei sind die Punkte nach wie vor sichtbar. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Aufgabe erfolgt über die Erfolgsrate von wiedergegebenen Punktpaaren. Als Ergebnis führt eine freie Augenbewegung zu einer besseren Wiedergabe der Reihenfolge. Jedoch ist die Erfolgsrate der Reihenfolge bei beiden Bedingungen sehr hoch. Es lässt sich schließen, dass die Ausführung von Sakkaden eine effektive Wiederholungsstrategie von visuell-räumlichen Informationen ist.

Der Unterschied zwischen den Studien von Godijn and Theeuwes (2012) und Tremblay et al. (2006) liegt in der Punktpräsentation während der Verzögerungszeit und der Antwortphase. Das Versuchsdesign von Tremblay et al. erleichtert den Wiederholungsprozess bei freier Augenbewegung. Ebenso muss bei Tremblay et al. nur die Reihenfolge der Punkte angegeben werden. Daher haben die Probanden, in der Bedingung der freien Augenbewegung, die Möglichkeit die Information zu wiederholen, die sie auch später wiedergeben müssen. Denn sie können mit Hilfe von Sakkaden die Reihenfolge nachbilden. In der Studie von Godijn and Theeuwes ist die Aufgabe schwieriger, da die Probanden die Reihenfolge und den Ort der Ziffern wiedergeben sollen. Der Ort und die Reihenfolge können durch Sakkaden ebenfalls wiederholt werden, allerdings ist sowohl die Encodierung als auch die Wiedergabe der Antwort ohne externes Feedback ungenauer. Dies kann zu einem weniger effektiven Wiederholungsprozess führen. Die Auswirkung der Augenbewegung bei räumlichen Aufgaben ist noch nicht vollständig geklärt. Die Sakkaden könnten zu einer Verbesserung der Aufrechterhaltung räumlicher Informationen beitragen. Allerdings könnten hierbei auch unterdrückte Sakkaden eine entscheidende Rolle spielen.

3.6 Verzögerungszeit

Die Länge der Verzögerungszeit stellt einen weiteren wichtigen Aspekt in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Arbeitsgedächtnisses dar. Funahashi et al. (1989) beschäftigen sich primär mit der neuronalen Aktivität während der Verzögerungszeit. Sie gehen in Kürze auf die Auswirkung der Verzögerung auf die Leistungsfähigkeit der räumlichen Aufgabe ein. Es werden drei Verzögerungszeiten verwendet; 1,5 Sekunden, drei Sekunden und sechs Sekunden. Abbildung 4 zeigt die Auswirkung der Verzögerungszeit auf die Leistungsfähigkeit in einer visuell-räumlichen Aufgabe eines Affen. Nach visueller Betrachtung der Sakkadenendpunkte erkennt man eine höhere Streuung bei einer Verzögerungszeit von sechs Sekunden (Abb.4a) im Vergleich zu einer Verzögerungszeit von drei Sekunden (Abb.4b).

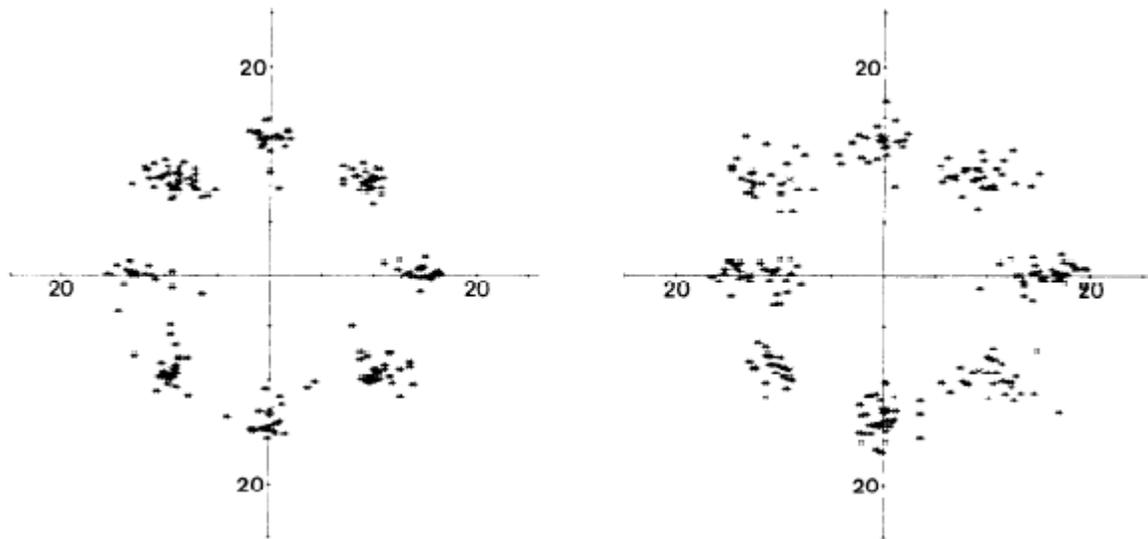


Abbildung 4: Endpunkte der Sakkaden eines Affens. Links: drei Sekunden Verzögerung, rechts: sechs Sekunden Verzögerung, aus Funahashi et al. (1989).

Um die Genauigkeit der Sakkadenendpunkte zu bestimmen, werden die Sakkaden in korrekte und nicht korrekte Sakkaden eingeteilt. Als korrekt werden diejenigen Sakkaden bezeichnet, die in einem Durchmesser von 6° vom Ort des gezeigten Hinweisreizes entfernt sind. Fast alle Sakkaden landen nahe der akkuraten Position unabhängig von der Verzögerungszeit. Zudem zeige sich eine längere tonische Erregung der Neurone bei längerer Verzögerungszeit. Die neuronale Aktivität wird demnach während der gesamten Verzögerung bis hin zur Antwortinitiation aufrechterhalten.

Fleming et al. (1997) verwenden ebenfalls eine räumliche Verzögerungsaufgabe. Sie vergleichen Schizophreniepatienten mit gesunden Probanden. Dazu werden 20 Punkte präsentiert, von welchen vier ausgefüllt sind. Anschließend gibt es entweder keine Verzögerungszeit oder eine Verzögerungszeit von sieben Sekunden. Danach erscheinen erneut die 20 Punkte, von denen wiederum vier ausgefüllt sind. Der Proband soll nun eine Taste drücken, wenn eine oder mehrere der ausgefüllten Punkte an einem anderen Ort erscheinen. Sind alle ausgefüllten Punkte am gleichen Ort, soll dies durch Drücken einer anderen Taste angegeben werden. Die Anzahl der richtigen Antworten ist bei einer Verzögerung von sieben Sekunden geringer als im Fall ohne Verzögerungszeit.

Ross et al. (2000) vergleichen Schizophrenieerkrankte, ADHS-Diagnostizierte und gesunde Probanden in einer räumlichen Verzögerungsaufgabe. Dazu wird ein Punkt in der Peripherie des Sichtfeldes gezeigt. Nach einer Verzögerung von einer beziehungsweise drei Sekunden soll eine Sakkade zu dem

erinnerten Ort des Punktes ausgeführt werden. Die Genauigkeit der Sakkadenendpunkte steht hierbei im Fokus. Im Vergleich aller drei Personengruppen zeigt sich eine Tendenz, die auf eine Verschlechterung der Genauigkeit bei einer Verzögerung von drei Sekunden hindeutet.

Srimal and Curtis (2008) testeten ihre Probanden in zwei räumlichen Verzögerungsaufgaben. Beide laufen zunächst gleich ab. Es wird ein Quadrat präsentiert, woraufhin eine Verzögerungszeit folgt, in welcher ein Punkt in der Mitte des Monitors fixiert werden soll. Die Antwortphase unterscheidet sich zwischen den beiden Aufgaben. Entweder soll eine Sakkade zu der erinnerten Stelle des Quadrates ausgeführt werden oder ein zweiter Hinweisreiz erscheint. Durch Knopfdruck soll angezeigt werden, ob dieser sich an derselben Stelle befindet wie zuvor. Insgesamt gibt es fünf Verzögerungszeiten: 7,5 Sekunden, neun Sekunden, 10,5 Sekunden, zwölf Sekunden, 13,5 Sekunden. Im ersten Szenario der Antwortphase wird die Abweichung der Landeposition der Sakkade zum Ort des Quadrates in Grad berechnet. Im zweiten Szenario wird die Prozentzahl der korrekten Durchläufe ermittelt. Die beiden Aufgaben zeigen keinen Unterschied in der Leistungsfähigkeit der Aufgaben in Bezug auf die unterschiedlichen Verzögerungszeiten. Die Evidenz im Hinblick auf die Auswirkung unterschiedlicher Verzögerungszeiten auf die Leistungsfähigkeit einer räumlichen Aufgabe ist somit nicht eindeutig.

3.7 Neuheiten und Hypothesen

Die vorliegende explorative Arbeit soll neue Richtungen und Erkenntnisse bei der Verwendung räumlicher Verzögerungsaufgaben liefern. Die räumliche Verzögerungsaufgabe von Funahashi et al. (1989) wird dazu leicht modifiziert und in einer Kombination aus vier Faktoren verwendet. Diese Kombination von Versuchsfaktoren wurde bislang noch nicht untersucht. Funahashi et al. verwenden Sakkaden als Antwort der Affen. In dieser Arbeit werden Mausclicks als äquivalent zu Sakkaden verwendet. Die Probanden sollen nach einer Verzögerungszeit auf den erinnerten Ort eines Hinweisreizes klicken. Ob die Ergebnisse der Verzögerungsaufgaben mit Sakkaden vergleichbar sind mit denen mit Mausclicks und dazugehörigen Mauspfaden, ist nicht geklärt. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt nicht, wie in anderen Studien (De Haan et al., 2008; Funahashi et al., 1989), auf den neuronalen Aktivitäten während der Ausführung der Aufgabe, sondern auf der Leistungsfähigkeit der Aufgabe. Diese wird durch den Fehler der Genauigkeit und den Fehler der Präzision bestimmt. Die Fehler der Genauigkeit werden, im Gegensatz zu vielen Studien (Hecker and Mapperson, 1997; Klauer and Zhao, 2004; Tresch et al., 1993) nicht binär - als korrekt oder falsch -, sondern numerisch codiert. Dies lässt eine präzisere Messung und Beurteilung der Leistungsfähigkeit zu. Neben dem Fehler der Genauigkeit wird die Streuung (auch Fehler der Präzision) gemessen.

Die Auswirkungen von Interferenz bei räumlichen Aufgaben wurde bereits gut untersucht. In dieser Arbeit wird eine räumliche Sekundäraufgabe, angelehnt an Meilinger et al. (2008), gestellt. Das Ziel ist es zu untersuchen, ob diese Zweitaufgabe ebenfalls einen Effekt auf die Leistungsfähigkeit der Hauptaufgabe hat. Die Augenbewegung ist entweder frei oder fixiert. Wie bereits gezeigt, ist es unklar, ob die Augenbewegung einen Effekt auf die Leistungsfähigkeit einer räumlichen Aufgabe hat. Die Auswirkung der Verzögerung auf die Leistungsfähigkeit räumlicher Aufgaben ist ebenfalls nicht ganz klar. Zusätzlich zu den bereits genannten Versuchsfaktoren wird der Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz in der räumlichen Verzögerungsaufgabe variiert und der potentiell auftretende Effekt untersucht, da dieser bislang noch nicht untersucht wurde. Somit soll die vorliegende Arbeit Erkenntnisse in Bezug auf die vier untersuchten Faktoren *Interferenz*, *Augenbewegung*, *Verzögerung* und *Abstand* und ihren Einfluss auf das räumliche Arbeitsgedächtnis liefern.

Es werden folgende Hypothesen aufgestellt: (1) Eine Zweitaufgabe hat eine negative Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der räumlichen Verzögerungsaufgabe. Der Genauigkeits- und die Präzisionsfehler steigen in der Folge. (2) Weiter wird vermutet, dass die Augenbewegung die Leistungsfähigkeit der räumlichen Aufgabe beeinflusst. (3) Eine Verzögerungszeit von sechs Sekunden

führt im Vergleich zu einer Verzögerungszeit von einer Sekunde zu einer niedrigeren Leistungsfähigkeit der räumlichen Aufgabe. (4) Ein größerer Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz führt zu einer Verringerung der Leistungsfähigkeit. (5) Sakkaden und Mauspfade zeigen Gemeinsamkeiten. Es wird ein mehrfaktorielles Design mit Messwiederholung verwendet, um die Hypothesen zu testen. Sie werden bei jeder Versuchsperson in jeder Kombination getestet, um auf die Effekte der einzelnen Faktoren schließen zu können. Die Mauspfade werden für jeden Durchlauf visualisiert und optisch mit Sakkaden auf Übereinstimmungen überprüft.

Dabei gibt es einige theoretische und praktische Implikationen. Es wird davon ausgegangen, dass die Probanden mit einer Computermaus und Tastatur umgehen können. Die potenziell unterschiedliche Beweglichkeit der Maus in verschiedene Himmelsrichtungen wird durch zufällige Anordnung der Punkte auf einem Kreis herausgemittelt. Da die Augenbewegungen der Versuchspersonen nicht überprüft werden, muss davon ausgegangen werden, dass den Anweisungen zur Augenbewegung Folge geleistet wird. Die beiden gestellten Aufgaben sind primär räumlich, auch wenn sie visuelle Komponenten besitzen.

4 Material und Methoden

4.1 Versuchspersonen

An dem Versuch nehmen 19 Personen teil, wobei die Daten von drei Teilnehmern nicht verwendet werden konnten. Bei einer dieser Versuchspersonen war die Präsentation der Punkte nicht korrekt dargestellt und die anderen beiden zeigten eine Prozentzahl korrekter Antworten der Zweit- beziehungsweise Interferenzaufgabe, welche unterhalb von 30 % und damit unter dem erwarteten Wert des Zufalls lagen. Abbildung 5 zeigt die Prozentzahl korrekter Antworten der Zweit- beziehungsweise Interferenzaufgabe. Diese lag im Durchschnitt bei 88 %.

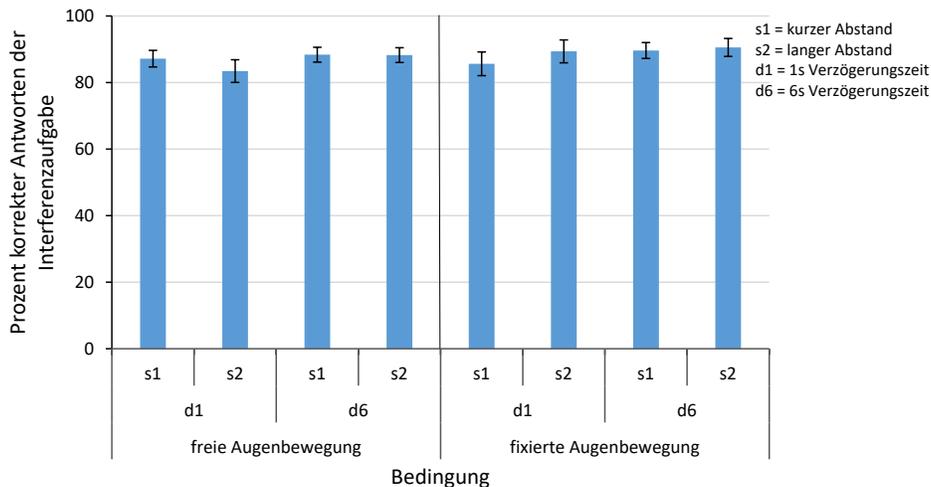


Abbildung 5: Mittelwert der richtigen Antworten in Prozent mit Standardfehlern der Interferenzaufgabe.

Von den 16 Versuchspersonen sind 15 Studenten der Universität Tübingen und eine arbeitet in Tübingen. Neun sind männlich, 7 weiblich und ihr lag Alter reichte von 21 bis 35 Jahren (Mittelwert: 24 Jahre). Die Teilnehmer waren entweder normalsichtig oder trugen eine entsprechende Sehhilfe. Die Teilnahme an den Versuchen erfolgte freiwillig und ohne Vergütung.

4.2 Stimulus

Die Versuche wurden mit Hilfe von MATLAB R2018a dargestellt. Für die Hauptaufgabe wurde ein schwarzer Bildschirm mit Fixationskreuz in der Mitte für eine Sekunde gezeigt (Abb. 6). Anschließend erschien für 0,5 s ein hellgrauer Punkt mit einem Durchmesser von $0,4^\circ$ Sehwinkel. Daran schloss sich die Verzögerungszeit mit entweder einer Sekunde oder sechs Sekunden an. In diesem Zeitabschnitt erfolgte gegebenenfalls die Bearbeitung der Interferenzaufgabe. Nach Verstreichen der Verzögerungszeit begann die Antwortphase, die durch das Verschwinden des Fixationskreuzes und das Erscheinen des Mauscurors erkennbar wurde.

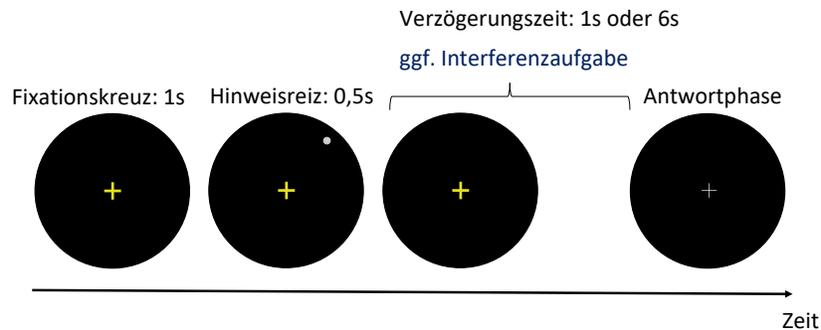


Abbildung 6: Ablauf des Versuchs. Zuerst alleinige Präsentation des Fixationskreuzes für eine Sekunde, daraufhin erscheint der Hinweisreiz für 0,5 Sekunden und die Verzögerungszeit - gegebenenfalls mit Interferenzaufgabe - schließt sich für eine Sekunde oder sechs Sekunden an. Darauffolgend verschwindet das Fixationskreuz und mit Erscheinen des Mauscurors beginnt die Antwortphase.

Die einzelnen Punkte (auch Hinweisreize genannt) werden in zwei Abständen (40 % und 70 % der senkrechten Wegstrecke von Fixationskreuz zum Bildschirmrand) auf einer Kreisbahn gezeigt, um einem Lerneffekt des Abstands entgegenzuwirken. Die Hinweisreize werden dabei zufällig auf einer der beiden Kreisbahnen (abhängig vom jeweils gewählten Abstand) gezeigt. Die Kardinalachsen $\pm 5^\circ$ werden ausgeschlossen, da diese verbalisiert werden können und dadurch einfacher zu merken sind (Srimal and Curtis, 2008). Der Mindestabstand zwischen den Punkten beträgt 14° . Sowohl die Länge der Verzögerungszeit (eine Sekunde und sechs Sekunden) als auch die Größe des Abstandes zum Bildschirmrand werden durch den Zufallsgenerator von MATLAB R2018a ausgewählt. Neben dieser Hauptaufgabe gab es eine Interferenzaufgabe, bei welcher die Richtung des Klangs eines Holzblockinstruments (Schlitztrommel) angegeben werden sollte. Die Richtung des Klangs ertönte mit Hilfe von Funktionen der Psychtoolbox 3 von links, von rechts oder von vorne und wurde nur während der Verzögerungszeit der Hauptaufgabe gestellt. Bei einer Verzögerung von einer Sekunde ertönte ein Klang, bei sechs Sekunden ertönten fünf Klänge. Die Klangrichtungen wurden dabei zufällig und uniform verteilt generiert.

4.3 Design

Das mehrfaktorielle Studiendesign mit Messwiederholung beinhaltet die vier unabhängigen Variablen Interferenz (mit Zweitaufgabe und ohne Zweitaufgabe), Augenbewegung (frei und fixiert), Verzögerungszeit (eine Sekunde und sechs Sekunden) und Abstand (kurz und lang) mit den jeweiligen zwei Ausprägungen. Der Fehler der Genauigkeit, der Fehler der Präzision 1 und 2 und die Reaktionszeit der Mausklicks stellen die abhängigen Variablen dar. Insgesamt gibt es vier Versuchsbedingungen,

wobei jede einen Versuchsdurchlauf darstellt; (1) Interferenz mit freier Augenbewegung, (2) Interferenz mit fixierter Augenbewegung, (3) keine Interferenz mit freier Augenbewegung und (4) keine Interferenz mit fixierter Augenbewegung. Die Verzögerungszeit und die Distanz werden mit ihren jeweiligen Ausprägungen in jedem Versuchsdurchlauf getestet. Zudem absolvierten alle Versuchspersonen die vier Blöcke. Damit hierbei keine Reihenfolgeeffekte entstehen, wird die Abfolge der einzelnen Blöcke nach dem *Balanced Latin Square* vorgenommen (Wan, 2015). Es sind vier Versuchspersonen nötig, um die vier ermittelten Reihenfolgen einmal zu durchlaufen und in dieser Arbeit wurden 16 Versuchspersonen getestet.

4.4 Prozedur

Der Versuch findet in einem abgedunkelten Raum statt. Jeder Proband wird einzeln getestet und es werden dieselben Weisungen gegeben. In allen Durchläufen soll der Abstand der Augen des Probanden zum Monitor von 50 Zentimetern eingehalten werden. Es wird dem Versuchsteilnehmer erklärt, dass das Experiment das räumliche Arbeitsgedächtnis zum Gegenstand hat und die Hauptaufgabe eine Gedächtnisaufgabe darstellt. Der Proband soll nach der Verzögerungszeit mit der Maus auf den erinnerten Ort des Hinweisreizes klicken. Dabei wird darauf verwiesen, dass die Genauigkeit wichtiger ist als die Schnelligkeit, dennoch soll der Proband zügig klicken. Die Beantwortung der Zweitaufgabe erfolgt über die Tastaturtasten *a,w* und *d*. Bei Klängen von links soll die Taste *a*, bei Klängen von rechts die Taste *d* und bei Klängen von vorne die Taste *w* gedrückt werden. Um ein Mitzählen der Töne zu verhindern, wird die Anzahl der ertönenden Klänge nicht genannt. Es wird lediglich erwähnt, dass entweder ein Klang oder mehrere Klänge präsentiert werden. Für die Antwort haben die Probanden eine Sekunde Zeit. Nach Ablauf dieser Zeit wird die Antwort der Zweitaufgabe, sofern keine Angabe erfolgt, als falsch gewertet. Bei freier Augenbewegung dürfen die Probanden hinschauen, wo sie möchten. Bei fixierter Augenbewegung soll das Fixationskreuz fixiert werden, solange es zu sehen ist. Der Hinweisreiz wird dadurch nur in der Peripherie wahrgenommen. Vor jedem Versuchsdurchlauf, welcher wiederum jeweils 80 Punktpräsentationen beinhaltet, wird darauf hingewiesen, ob die Augenbewegung frei oder fixiert sein soll und ob eine Zweitaufgabe zu bearbeiten ist. Nach zwei Versuchsdurchläufen gibt es eine zehnminütige Pause. Ein Versuchsdurchlauf dauerte durchschnittlich zehn Minuten und 34 Sekunden. Mit der Pause dauerte der Versuch insgesamt etwa eine Stunde.

4.5 Statistische Analysen

Mittels MATLAB R2018a wurden die Mausclicks und die Mauspfade aufgezeichnet. Jede der 16 Versuchspersonen durchlief die vier Versuchsdurchläufe mit jeweils 80 Punktpräsentationen. Insgesamt wurden somit 5120 Mauspfade aufgezeichnet und visualisiert. Die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Mauspfade erfolgte visuell-explorativ. Mauspfade mit ähnlicher Form und ähnlichem Verlauf wurden hierfür gemeinsam kategorisiert. Die gezeigten Hinweisreize wurden im Anschluss an das Experiment mit ihren dazugehörigen Mausclicks auf die 90 °-Position der Kreisbahn rotiert. Dadurch erhält man pro Versuchsdurchlauf und für jede Kombination aus Verzögerungszeit und Abstand jeweils 20 Mausclicks. Alle transformierten *y*-Werte der Mausclicks, die kleiner oder gleich 50 Pixel vom Fixationskreuz entfernt waren, wurden als Ausreißer gewertet und eliminiert. Ein Großteil der tatsächlichen *y*-Werte bewegten sich zwischen 200 und 700 Pixeln. Mit diesen Mausclicks wurden anschließend die Fehlerellipsen gebildet. Pro Versuchsperson resultierten so (4 Versuchsdurchläufe x 2 Verzögerungszeiten x 2 Abstände) 16 Fehlerellipsen. Die Fehlerellipsen wurden so konzipiert, dass sie 39,35 % der Mausclicks enthalten. Mittels MATLAB R2018a werden die abhängigen Variablen Reaktionszeit, Genauigkeitsfehler und Präzisionsfehler berechnet. Die Reaktionszeit der Hauptauf-

gabe ist die Zeit in Sekunden von Beginn der Präsentation des Mausursors bis zum Mausklick. Der Genauigkeitsfehler gibt an, wie weit ein Proband mit seiner erinnerten Position von der tatsächlichen Position des Hinweisreizes entfernt lag. Dieser berechnet sich aus der *Euklidischen Distanz* vom Mittelpunkt der Fehlerellipse zum Hinweisreiz. Die Berechnung der Längen über die Euklidische Distanz zweier Punkte $A(X_1, Y_1)$ und $B(X_2, Y_2)$ erfolgt über die Formel:

$$d(A, B) = \|A - B\| = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (1)$$

Der Präzisionsfehler gibt die Streuung der Mausklicks an. Je größer er ist, desto weiter sind die Mausklicks voneinander entfernt. Er wird über die Euklidische Distanz vom Startpunkt einer Fehlerellipsenachse bis zu ihrem Endpunkt berechnet. Der Präzisionsfehler 1 bezeichnet hier die Länge der langen Achse und der Präzisionsfehler 2 diejenige der kurzen Achse.

Zudem wird definiert, ob ein Mausklick ein *overshoot* oder ein *undershoot* ist. Ein Mausklick wird als *overshoot* definiert, sofern sein (rotierter) y-Wert über dem (rotierten) y-Wert des Hinweisreizes ist. Liegt der y-Wert des Mausklicks unterhalb des Hinweisreizes, liegt ein *undershoot* vor. Nach dieser Fallunterscheidung wird die Größe des over- beziehungsweise *undershoots* eines jeden Mausklicks (X, Y) nach der folgenden Formel berechnet, wobei d die Distanz von Fixationskreuz zu Hinweisreiz angibt:

$$\text{overshoot/undershoot} = \sqrt{X^2 + Y^2} - d \quad (2)$$

Die abhängigen Variablen werden mit Hilfe von SPSS einer mehrfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung unterzogen. Die Effektgröße η_p^2 , der p-Wert und der Standardfehler werden ebenfalls mit SPSS bestimmt.

5 Resultate

Es wurde ein mehrfaktorielles Versuchsdesign mit Messwiederholung mit den Faktoren Interferenz, Augenbewegung, Verzögerung und Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz getestet. Die abhängigen Variablen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der räumlichen Aufgabe sind primär der Genauigkeits- und der Präzisionsfehler. Ebenso wurde die Reaktionszeit der Versuchspersonen gemessen. Bei Vorliegen der Interferenzaufgabe wird vermutet, dass der Genauigkeits- sowie der Präzisionsfehler größer ist als ohne Interferenzaufgabe. Weiterhin wird angenommen, dass die Augenbewegung einen Effekt auf den Genauigkeits- und Präzisionsfehler hat. Abschließend wird vermutet, dass eine längere Verzögerungszeit und ein längerer Abstand zu einer Verschlechterung des Genauigkeits- und Präzisionsfehlers führt.

5.1 Effekte der verschiedenen Versuchsbedingungen

5.1.1 Überblick

Abbildung 7 liefert einen Überblick der gemessenen Effekte. Interferenz, Augenbewegung, Verzögerung und Abstand sind gegen den Genauigkeits-, die beiden Präzisionsfehler sowie die Reaktionszeit aufgetragen. Auf den Genauigkeitsfehler zeigt die Anwesenheit einer Zweitaufgabe keinen Effekt ($F(1,15) = 0,995$; $p = 0,334$; $\eta_p^2 = 0,062$). Die Präzisionsfehler 1 und 2 hingegen zeigen einen Effekt der Zweitaufgabe (1: $F(1,15) = 10,268$; $p = 0,006$; $\eta_p^2 = 0,406$; 2: $F(1,15) = 24,343$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,619$). Wird eine Zweitaufgabe gestellt, steigen die beiden Präzisionsfehler verglichen mit einem Durchlauf ohne Zweitaufgabe. Weiterhin zeigt die Reaktionszeit keinen Effekt in Bezug auf die Zweitaufgabe ($F(1,15) = 1,739$; $p = 0,207$; $\eta_p^2 = 0,104$). Die Augenbewegung hat einen signifikanten Effekt auf den Genauigkeitsfehler ($F(1,15) = 44,186$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,747$) und die Präzisionsfehler 1 und 2 (1: $F(1,15) = 33,618$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,691$; 2: $F(1,15) = 31,963$; $p = 0,000$; η_p^2

= 0,681). Sowohl der Genauigkeitsfehler als auch die beiden Präzisionsfehler 1 und 2 steigen bei fixierter Augenbewegung im Vergleich zu freier Augenbewegung. Damit ist die Leistungsfähigkeit bei freier Augenbewegung besser als bei fixierter Augenbewegung. Die Reaktionszeit hingegen zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen freier und fixierter Augenbewegung ($F(1,15) = 0,788$; $p = 0,389$; $\eta_p^2 = 0,050$). Die Verzögerungszeit hat einen signifikanten Effekt auf den Genauigkeitsfehler ($F(1,15) = 22,559$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,601$) und die beiden Präzisionsfehler (1: $F(1,15) = 33,618$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,691$; 2: $F(1,15) = 187,545$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,926$). Bei einer Verzögerung von sechs Sekunden sind die Genauigkeits- und die beiden Präzisionsfehler größer im Vergleich zu einer Verzögerung von einer Sekunde. Die Verzögerungszeit zeigt einen Effekt auf die Reaktionszeit ($F(1,15) = 6,847$; $p = 0,019$; $\eta_p^2 = 0,313$). Hierbei ist die Reaktionszeit bei einer Sekunde Verzögerung länger als bei sechs Sekunden Verzögerung. Der Abstand hat einen signifikanten Effekt auf die Genauigkeitsfehler ($F(1,15) = 38,752$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,721$), die beiden Präzisionsfehler (1: $F(1,15) = 56,190$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,789$; 2: $F(1,15) = 72,953$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,829$) und die Reaktionszeit ($F(1,15) = 45,229$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,751$). Ein längerer Abstand vergrößert dabei den Genauigkeits- und die beiden Präzisionsfehler. Genauso erhöht sich die Reaktionszeit mit längerem Abstand.

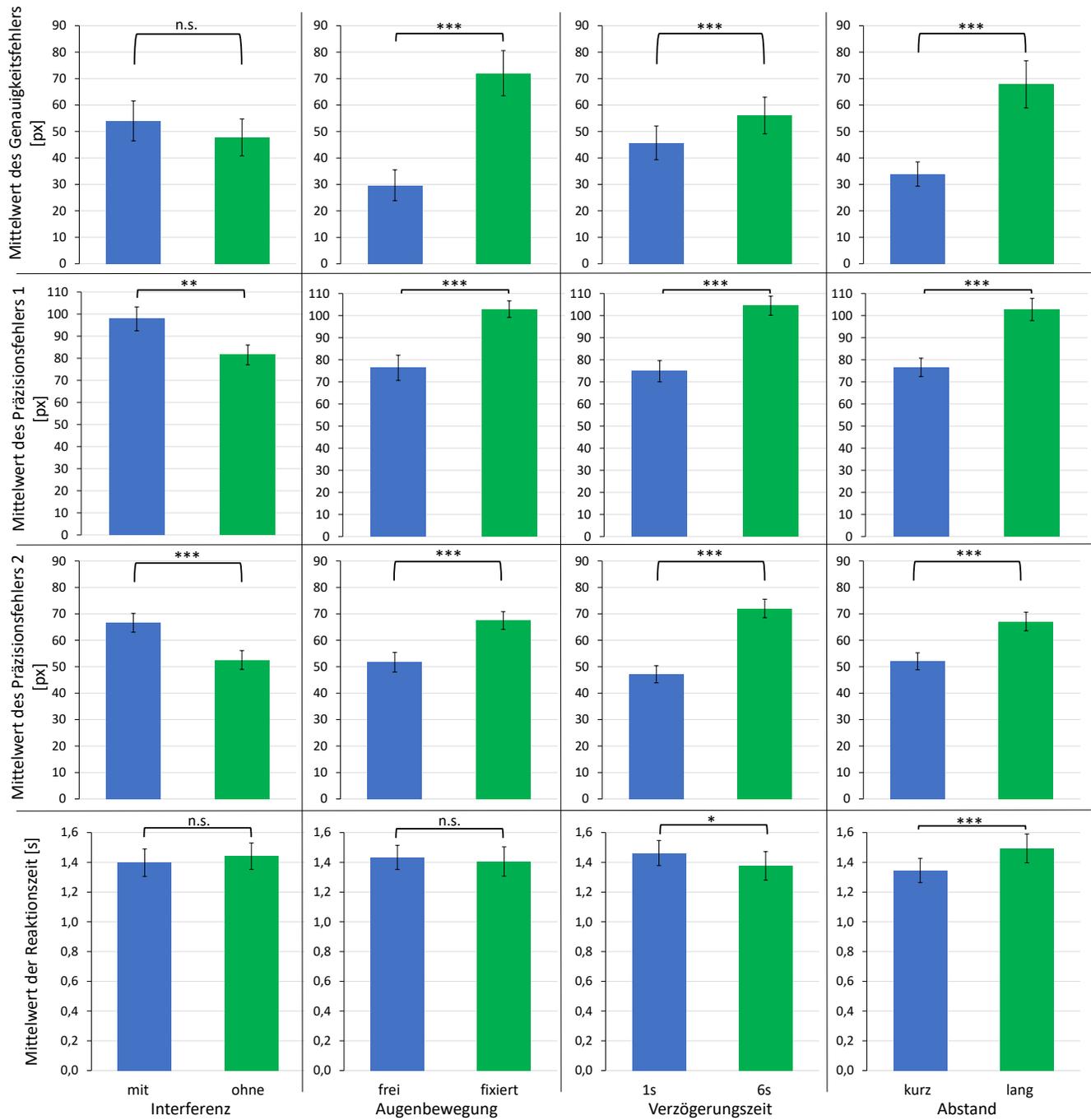


Abbildung 7: Subplot der Versuchsbedingungen Interferenz, Augenbewegung, Verzögerungszeit und Abstand aufgetragen gegen die Mittelwerte des Genauigkeitsfehlers, des Präzisionsfehlers 1 und 2 in Pixeln und Reaktionszeit in Sekunden mit Standardfehlern. Der Signifikanzwert wird folgendermaßen angegeben: n.s. = nicht signifikant, * = p-Wert < 0,05, ** = p < 0,01, *** = p < 0,001.

Tabelle 1: Ergebnisse der ANOVA der vier Variablen Genauigkeitsfehler, Präzisionsfehler 1, Präzisionsfehler 2 und Reaktionszeit. Alle Faktoren der Versuchsbedingungen Interferenz, Augenbewegung, Verzögerungszeit und Abstand und deren Interaktionen sind dargestellt mit ihrer jeweiligen F-Verteilung, dem Signifikanzwert und der Effektgröße des partiellen Eta-Quadrats. Alle fettgedruckten Einträge zeigen einen Signifikanzwert von unter 5 %.

Variable	Faktor	ANOVA	Signifikanzwert	Effektgröße (η_p^2)
Genauigkeitsfehler	Interferenz	F(1,15) = 0,995	0,334	0,062
	Augenbewegung	F(1,15) = 44,186	0,000	0,747
	Verzögerungszeit	F(1,15) = 22,559	0,000	0,601
	Abstand	F(1,15) = 38,752	0,000	0,721
	Interferenz * Augenbewegung	F(1,15) = 0,183	0,675	0,012
	Interferenz * Verzögerungszeit	F(1,15) = 0,334	0,572	0,022
	Interferenz * Abstand	F(1,15) = 4,800	0,045	0,242
	Augenbewegung * Verzögerungszeit	F(1,15) = 0,000	0,996	0,000
	Augenbewegung * Abstand	F(1,15) = 29,091	0,000	0,660
	Verzögerungszeit * Abstand	F(1,15) = 4,987	0,041	0,249
	Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit	F(1,15) = 0,116	0,738	0,008
	Interferenz * Augenbewegung * Abstand	F(1,15) = 2,645	0,125	0,150
	Interferenz * Verzögerungszeit * Abstand	F(1,15) = 0,063	0,806	0,004
	Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand	F(1,15) = 1,501	0,239	0,091
	Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand	F(1,15) = 0,003	0,960	0,000
	Präzisionsfehler 1	Interferenz	F(1,15) = 10,268	0,006
Augenbewegung		F(1,15) = 33,618	0,000	0,691
Verzögerungszeit		F(1,15) = 77,452	0,000	0,838
Abstand		F(1,15) = 56,190	0,000	0,789
Interferenz * Augenbewegung		F(1,15) = 9,101	0,009	0,378
Interferenz * Verzögerungszeit		F(1,15) = 1,207	0,289	0,074
Interferenz * Abstand		F(1,15) = 0,009	0,927	0,001
Augenbewegung * Verzögerungszeit		F(1,15) = 1,176	0,295	0,073
Augenbewegung * Abstand		F(1,15) = 10,140	0,006	0,403
Verzögerungszeit * Abstand		F(1,15) = 0,997	0,334	0,062
Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit		F(1,15) = 0,429	0,523	0,028
Interferenz * Augenbewegung * Abstand		F(1,15) = 0,425	0,524	0,028
Interferenz * Verzögerungszeit * Abstand		F(1,15) = 0,672	0,425	0,043
Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand		F(1,15) = 0,412	0,530	0,027
Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand		F(1,15) = 5,456	0,034	0,267

Präzisions- fehler 2	Interferenz	$F(1,15) = 24,343$	0,000	0,619
	Augenbewegung	$F(1,15) = 31,963$	0,000	0,681
	Verzögerungszeit	$F(1,15) = 187,545$	0,000	0,926
	Abstand	$F(1,15) = 72,953$	0,000	0,829
	Interferenz * Augenbewegung	$F(1,15) = 2,695$	0,121	0,152
	Interferenz * Verzögerungszeit	$F(1,15) = 2,230$	0,156	0,129
	Interferenz * Abstand	$F(1,15) = 3,561$	0,079	0,192
	Augenbewegung * Verzögerungszeit	$F(1,15) = 0,980$	0,338	0,061
	Augenbewegung * Abstand	$F(1,15) = 2,647$	0,125	0,150
	Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 0,040$	0,843	0,003
	Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit	$F(1,15) = 0,023$	0,881	0,002
	Interferenz * Augenbewegung * Abstand	$F(1,15) = 1,187$	0,293	0,073
	Interferenz * Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 1,066$	0,318	0,066
	Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 1,018$	0,329	0,064
	Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 0,432$	0,521	0,028
	Interferenz	$F(1,15) = 1,739$	0,207	0,104
	Augenbewegung	$F(1,15) = 0,788$	0,389	0,050
	Verzögerungszeit	$F(1,15) = 6,847$	0,019	0,313
	Abstand	$F(1,15) = 45,229$	0,000	0,751
	Interferenz * Augenbewegung	$F(1,15) = 0,002$	0,967	0,000
	Interferenz * Verzögerungszeit	$F(1,15) = 28,479$	0,000	0,655
	Interferenz * Abstand	$F(1,15) = 3,589$	0,078	0,193
	Augenbewegung * Verzögerungszeit	$F(1,15) = 4,034$	0,063	0,212
	Augenbewegung * Abstand	$F(1,15) = 0,002$	0,967	0,000
	Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 4,113$	0,061	0,215
	Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit	$F(1,15) = 0,799$	0,386	0,051
	Interferenz * Augenbewegung * Abstand	$F(1,15) = 0,158$	0,697	0,010
	Interferenz * Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 6,946$	0,019	0,316
	Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 4,577$	0,049	0,234
	Interferenz * Augenbewegung * Verzögerungszeit * Abstand	$F(1,15) = 0,586$	0,456	0,038
	Reaktionszeit			

Die oben geschilderten Ergebnisse sind in der Tabelle 5.1.1 zusammen mit den Interaktionstermen der Effektvariablen zu finden. Es ist ersichtlich, dass die vier Faktoren Interferenz, Augenbewegung, Verzögerung und Abstand fast durchweg einen signifikanten Effekt auf die Leistungsfähigkeit in der Hauptaufgabe haben. Die Ausnahme stellt der Genauigkeitsfehler dar, welcher nicht von der Zweitaufgabe beeinflusst wird. Im Bezug auf das partielle Eta-Quadrat zeigen sich große Effekte der vier Faktoren auf den Genauigkeits- und die beiden Präzisionsfehler. Im Hinblick auf die Interaktionsterme zeichnet sich kein eindeutiges Muster ab.

Die nachfolgenden vier Abbildungen sind nach der jeweiligen abhängigen Variable geordnet und weiterhin nach Interferenzbedingung getrennt. Abbildung 8 veranschaulicht die Effekte der Versuchsbedingungen auf den Genauigkeitsfehler. Die Anwesenheit einer Zweitaufgabe hat kaum einen Effekt auf die Genauigkeit (Vgl. Abb.8a und b). Die fixierte Augenbewegung führt, unabhängig von der Zweitaufgabe, zu einem erhöhten Genauigkeitsfehler. Dieser Effekt zeigt sich mit langem Abstand noch deutlicher. Die Auswirkungen auf den ersten Präzisionsfehler sind in Abbildung 9 dargestellt. Das Stellen der Interferenzaufgabe führt vor allem bei freier Augenbewegung zu erhöhten ersten Präzisionsfehlern. Die Präzision ist ebenfalls vermindert, wenn die Augenbewegung fixiert ist, dieses Ergebnis ist unabhängig von der Interferenz. Der zweite Präzisionsfehler ist in Abbildung 10 zu sehen. Wieder zeigen sich erhöhte Präzisionsfehler bei Stellen einer Zweitaufgabe (Vgl. Abb.10a und b). Auch hier ist ein negativer Effekt der fixierten Augenbewegung auf die Präzision erkennbar. Abbildung 11 lässt Schlüsse über die Auswirkungen auf die Reaktionszeit zu. Bei Anwesenheit einer Zweitaufgabe gibt es keinen Effekt auf die Reaktionszeit (Vgl. Abb.11a und b). Des weiteren hat auch die Augenbewegung keinen Effekt auf die Reaktionszeit. Abschließend lässt sich sagen, dass sich Effekte der verschiedenen Versuchsbedingungen bei allen drei Fehlern auffinden lassen und diese in dieselbe Richtung zeigen. Lediglich die Reaktionszeit ist unabhängig von der Interferenzaufgabe und der Augenbewegung.

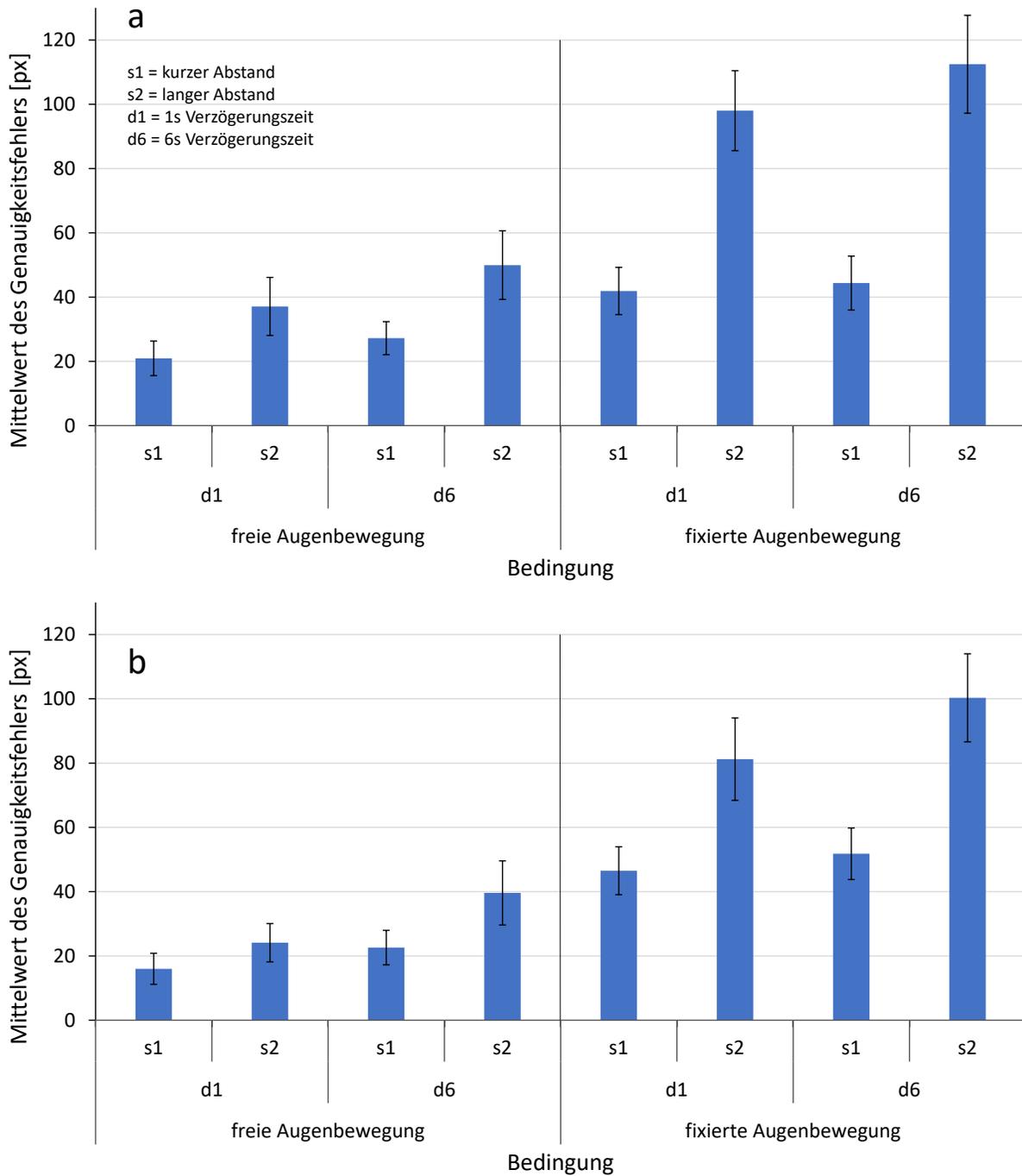


Abbildung 8: Mittelwert des Genauigkeitsfehlers in Pixeln mit Standardfehlern, aufgetragen gegen die Bedingungen Augenbewegung (frei und fixiert), Verzögerungszeit (eine Sekunde und sechs Sekunden) und Abstand (kurz und lang). a: mit Interferenzaufgabe, b: ohne Interferenzaufgabe.

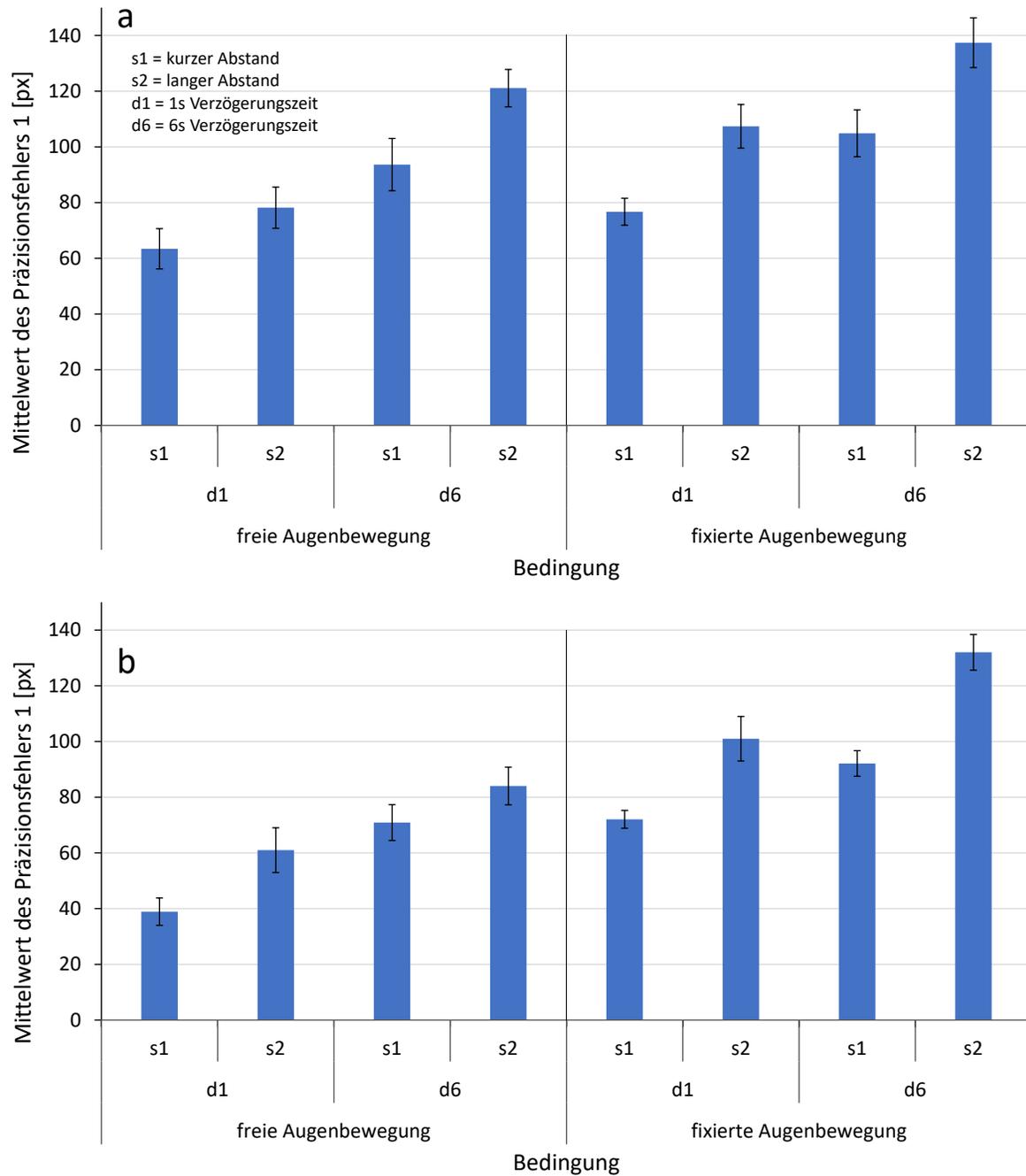


Abbildung 9: Mittelwert des Präzisionsfehlers 1 in Pixeln mit Standardfehlern, aufgetragen gegen die Bedingungen Augenbewegung (frei und fixiert), Verzögerungszeit (eine Sekunde und sechs Sekunden) und Abstand (kurz und lang). a: mit Interferenzaufgabe, b: ohne Interferenzaufgabe.

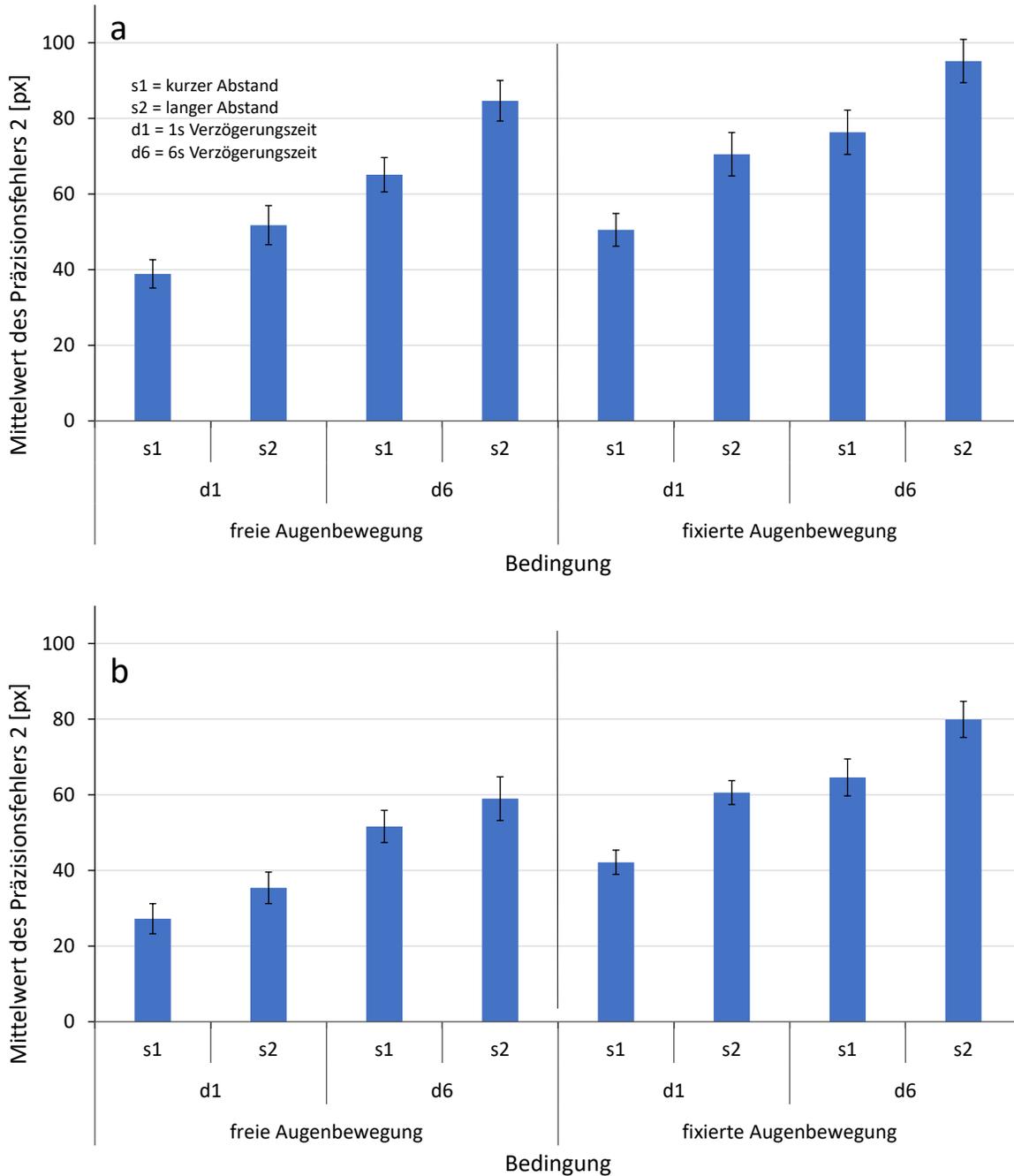


Abbildung 10: Mittelwert des Präzisionsfehlers 2 in Pixeln mit Standardfehlern, aufgetragen gegen die Bedingungen Augenbewegung (frei und fixiert), Verzögerungszeit (eine Sekunde und sechs Sekunden) und Abstand (kurz und lang). a: mit Interferenzaufgabe, b: ohne Interferenzaufgabe.

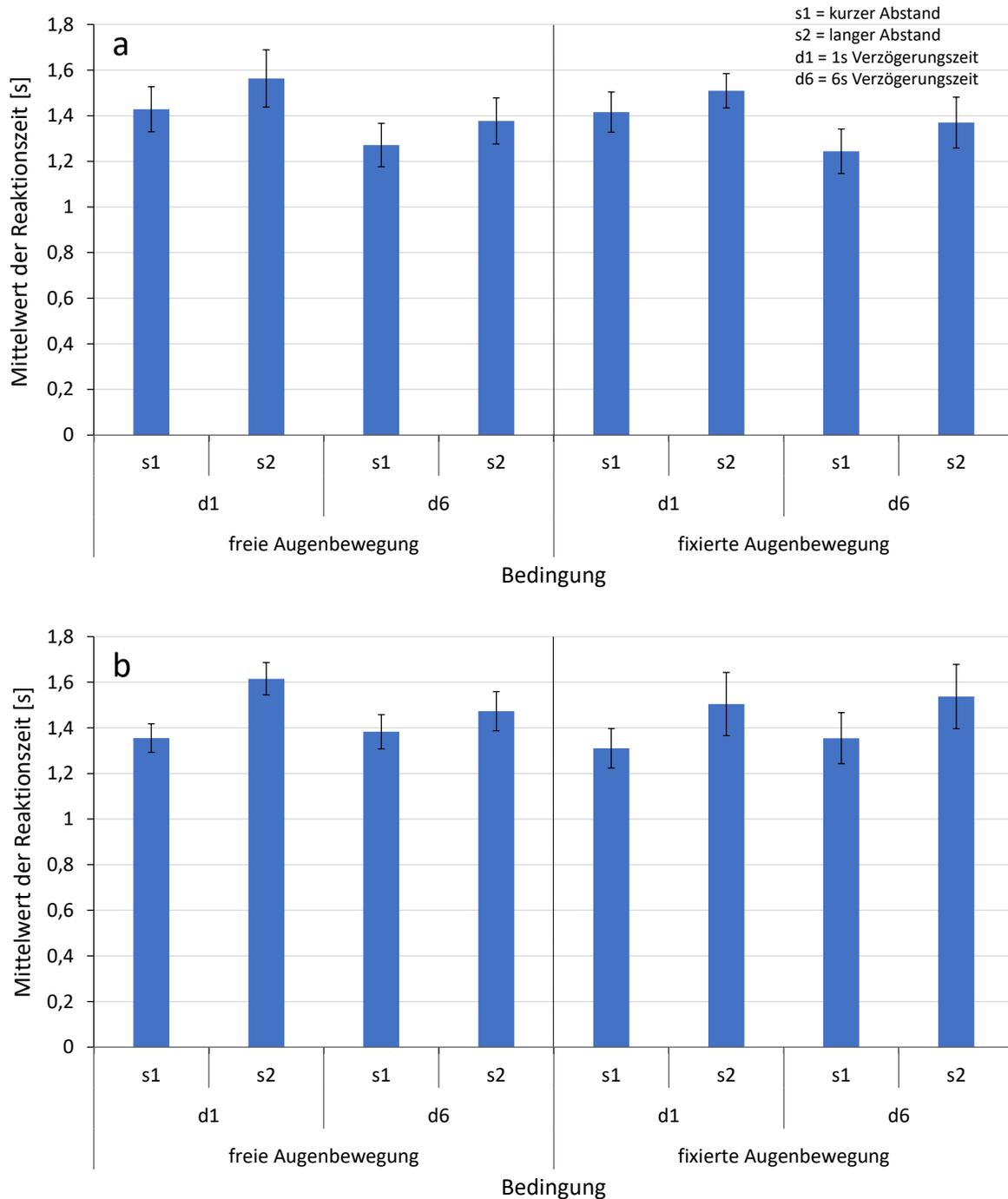


Abbildung 11: Mittelwert der Reaktionszeit, vom Beginn des Erscheinens des Mauscursors bis zum Mausklick, in Sekunden mit Standardfehlern, aufgetragen gegen die Bedingungen Augenbewegung (frei und fixiert), Verzögerungszeit (eine Sekunde und sechs Sekunden) und Abstand (kurz und lang). a: mit Interferenzaufgabe, b: ohne Interferenzaufgabe.

5.1.2 Interaktionen

Im Nachfolgenden werden die Interaktionen zwischen jeweils zwei Versuchsfaktoren dargestellt.

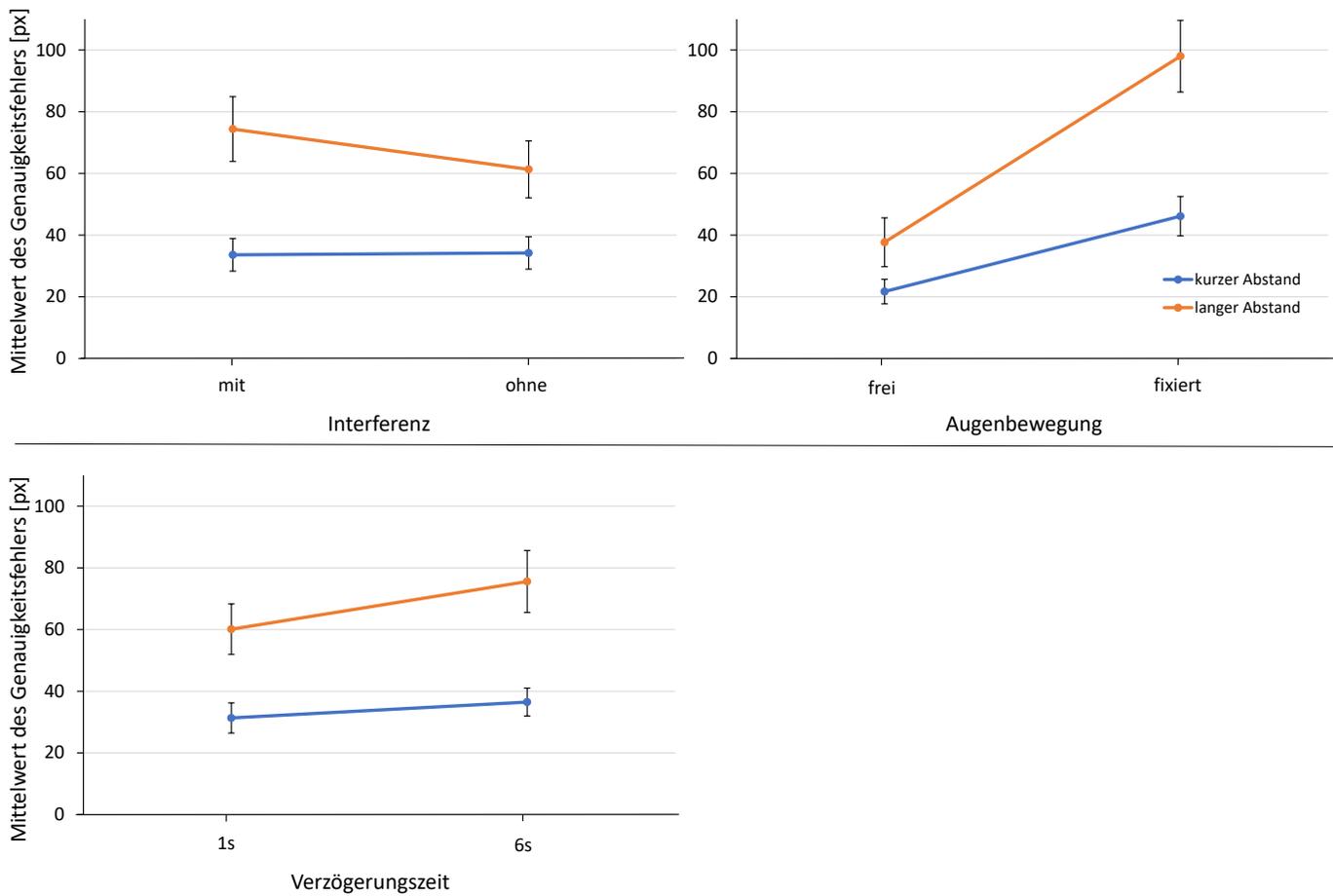


Abbildung 12: Signifikante Interaktionen ($p < 5\%$) mit dem Faktor Abstand aufgetragen gegen die Mittelwerte des Genauigkeitsfehlers in Pixeln mit Standardfehlern. a: Interaktion zwischen Interferenz und Abstand, b: Interaktion zwischen Augenbewegung und Abstand, c: Interaktion zwischen Verzögerungszeit und Abstand.

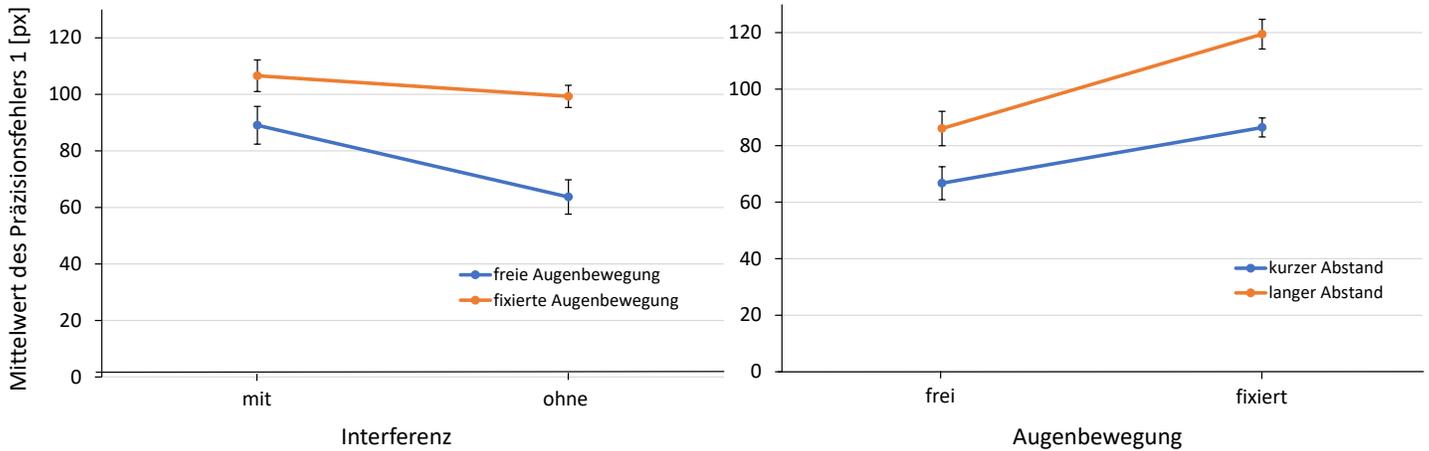


Abbildung 13: Signifikante Interaktionen ($p < 5\%$) jeweils zweier Faktoren der Versuchsbedingungen aufgetragen gegen die Mittelwerte des Präzisionsfehlers 1 in Pixeln mit Standardfehlern. a: Interaktion zwischen Interferenz und Augenbewegung, b: Interaktion zwischen Augenbewegung und Abstand.

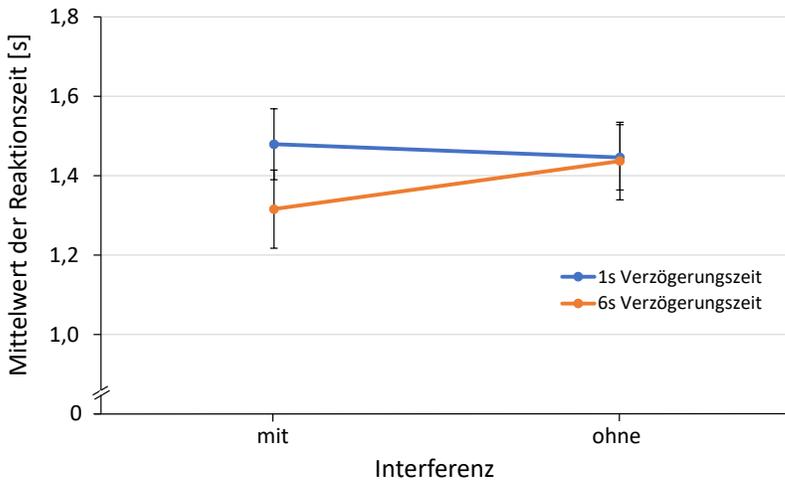


Abbildung 14: Signifikante Interaktion ($p < 5\%$) zwischen Interferenz und Verzögerungszeit aufgetragen gegen die Mittelwerte der Reaktionszeit in Sekunden mit Standardfehlern.

Im Unterschied zum kurzen Abstand zeigt sich beim langen Abstand ein Effekt der Interferenz auf den Genauigkeitsfehler, welcher sich negativ niederschlägt (Abb.12a). Abbildung 12b zeigt die Interaktion von Augenbewegung und Abstand. Hieraus wird ersichtlich, dass die fixierte Augenbewegung im Vergleich zur freien Augenbewegung zu einem höheren Genauigkeitsfehler führt. Dieser Effekt wird mit langem Abstand verstärkt. Zuletzt zeigt Abbildung 12c, dass eine längere Verzögerungszeit einen höheren Genauigkeitsfehler zur Folge hat. Ein langer Abstand verstärkt diesen Effekt.

Abbildung 13 beleuchtet nun verschiedene Einflüsse auf den Präzisionsfehler 1. Ohne Zweitaufgabe ist der erste Präzisionsfehler geringer als mit Vorhandensein selbiger (Abb.13a). Eine freie

Augenbewegung verstärkt diesen Effekt im Vergleich zur fixierten Augenbewegung. Abbildung 13b zeigt, dass eine freie Augenbewegung zu einem niedrigeren ersten Präzisionsfehler führt. Mit langem Abstand wird dieser Effekt ebenfalls leicht verstärkt.

In Abbildung 14 ist die Reaktionszeit in Abhängigkeit der Interferenz aufgetragen. In Zusammenhang mit einer kurzen Verzögerungszeit sinkt die Reaktionszeit nur geringfügig unabhängig von der Anwesenheit einer Zweitaufgabe. Bei langer Verzögerungszeit zeigt sich hingegen ein Einfluss der Interferenzaufgabe; bei ihrer Anwesenheit sinkt die Reaktionszeit.

5.2 Rohdaten der Mausklicks

Die Rohdaten der Mausklicks einer Versuchsperson innerhalb eines Versuchsdurchlaufs sind exemplarisch in Abbildung 15 dargestellt. Es ist zu sehen, dass keine Hinweisreize auf den Kardinalachsen präsentiert wurden. Zudem ist eine gleichmäßige, aber zufällige Anordnung der Hinweisreize auf den beiden Kreisen zu sehen.

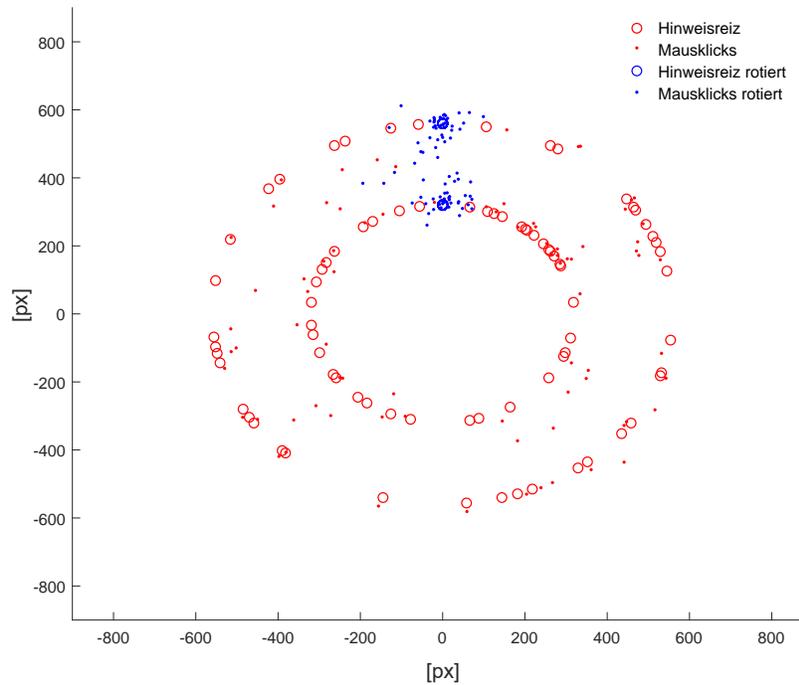


Abbildung 15: Rohdaten aller Mausklicks (kleine Punkte) mit jeweils zugehörigen Hinweisreizen (große Kreise) in rot und die rotierten Mausklicks mit Hinweisreizen in blau der Versuchsperson 12. Versuchsbedingung: mit Interferenz und freier Augenbewegung.

Für jede Kombination aus Verzögerungszeit und Abstand gibt es 20 Mausklicks, die zur Berechnung der Fehlerellipsen verwendet werden. Die Fehlerellipsen einer Versuchsperson unter allen vier Versuchsbedingungen sind in Abbildung 16 zu sehen. Exemplarisch lassen sich an Versuchsperson 12 die Effekte der Faktoren auf die Genauigkeit und die Präzision des Probanden analysieren. Die beiden oberen Teile der Abbildung (Abb. 16a und b) bilden die Ergebnisse mit Interferenz ab, während die unteren Teilabbildungen (Abb. 16c und d) die Ergebnisse ohne Interferenz darstellen. Darüber hinaus sind auf den linken Teilabbildungen (Abb. 16a und c) die Ergebnisse mit freier Augenbewegung und auf der rechten Seite (Abb. 16b und d) die Ergebnisse mit fixierter Augenbewegung abgetragen. Innerhalb der vier Abbildungen wird nach Verzögerungszeit und Abstand unterteilt. Hierbei ist es

wichtig zu betonen, dass die Ergebnisse eines einzelnen Probanden durchaus von den Ergebnissen über alle Versuchspersonen hinweg (siehe Kapitel 5.1) abweichen können. Ebenso ist darauf hinzuweisen, dass die graphische Analyse einer gewissen Ungenauigkeit unterliegt. Vergleicht man die grünen (kurze Verzögerungszeit mit langem Abstand) und hellblauen (lange Verzögerungszeit mit langem Abstand) Fehlerellipsen der oberen und unteren Graphiken, lassen sich kaum Unterschiede im Abstand der Mausklicks zum Mittelpunkt der Fehlerellipse erkennen. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Anwesenheit einer Interferenzaufgabe die Genauigkeit bei langem Abstand nicht wesentlich beeinträchtigt. Ohne Zweitaufgabe und mit freier Augenbewegung ist die Versuchsperson 12 sehr genau und die Mausklicks sind weniger gestreut als bei den anderen drei Versuchsbedingungen. Generell zeigen jeweils alle vier Fehlerellipsen der unteren Graphiken eine geringere Streuung als die oberen. Mit Zweitaufgabe ist demnach die Streuung erhöht. Dieses Ergebnis von Versuchsperson 12 ist mit der eingangs formulierten Hypothese, nach welcher die Streuung durch die Interferenz erhöht wird, vereinbar. Betrachtet man die Auswirkung der Augenbewegung, wird deutlich, dass mit fixierter Augenbewegung beinahe alle Bedingungen ein ungenaueres Ergebnis zeigen. Zudem ist die Streuung bei fixierter Augenbewegung und Interferenz höher als mit freier Augenbewegung und Interferenz (Vergleich Abb.16a und b). Genauso zeigen sich weiter gestreute Mausklicks bei fixierter Augenbewegung ohne Interferenz im Vergleich zu freier Augenbewegung und ebenfalls ohne Interferenz (Vergleich Abb.16c und d). In der ersten Versuchsbedingung (Abb.16a) führen die längere Verzögerungszeit zu einer ungenaueren Antwort. Die dritte Versuchsbedingung (Abb.16c) zeigt eine wesentlich höhere Genauigkeit und Präzision als die anderen Versuchsbedingungen. Insgesamt ist bei allen vier Versuchsbedingungen und bei beiden Abständen die Streuung mit langer Verzögerung erhöht. Jedoch sind die generellen Effekte der Abstände bei dieser ausgewählten Versuchsperson weniger gut zu sehen. Darüber hinaus führt Interferenz bei dieser Versuchsperson zu erhöhter Streuung, jedoch nicht zu einer erhöhten Ungenauigkeit. Die freie Augenbewegung führt - im Vergleich zu fixierter Augenbewegung - meist zu einer besseren Leistungsfähigkeit bei der Lösung der räumlichen Aufgabe; es steigt die Genauigkeit und die Streuung sinkt. Weiterhin führt eine längere Verzögerung bei der Versuchsperson in den meisten Fällen zu einer ungenaueren Antwort.

Im Gegensatz zum oben beschriebenen Probanden steht beispielhaft Versuchsperson 10 (Abb.17). Im Vergleich zu Versuchsperson 12 zeigt diese generell weiter gestreute Daten und die Mausklicks sind fast gänzlich unterhalb des Hinweisreizes angesiedelt. Mit Interferenzaufgabe ist die Genauigkeit in allen Bedingungen schlechter als ohne Interferenz. Des weiteren ist die Genauigkeit - gerade in Bezug auf den langen Abstand - schlechter als bei Versuchsperson 12. Dieser skizzierte Vergleich gibt einen Eindruck über das Spektrum, in welchem sich die Resultate der Versuchspersonen allgemein wiederfinden.

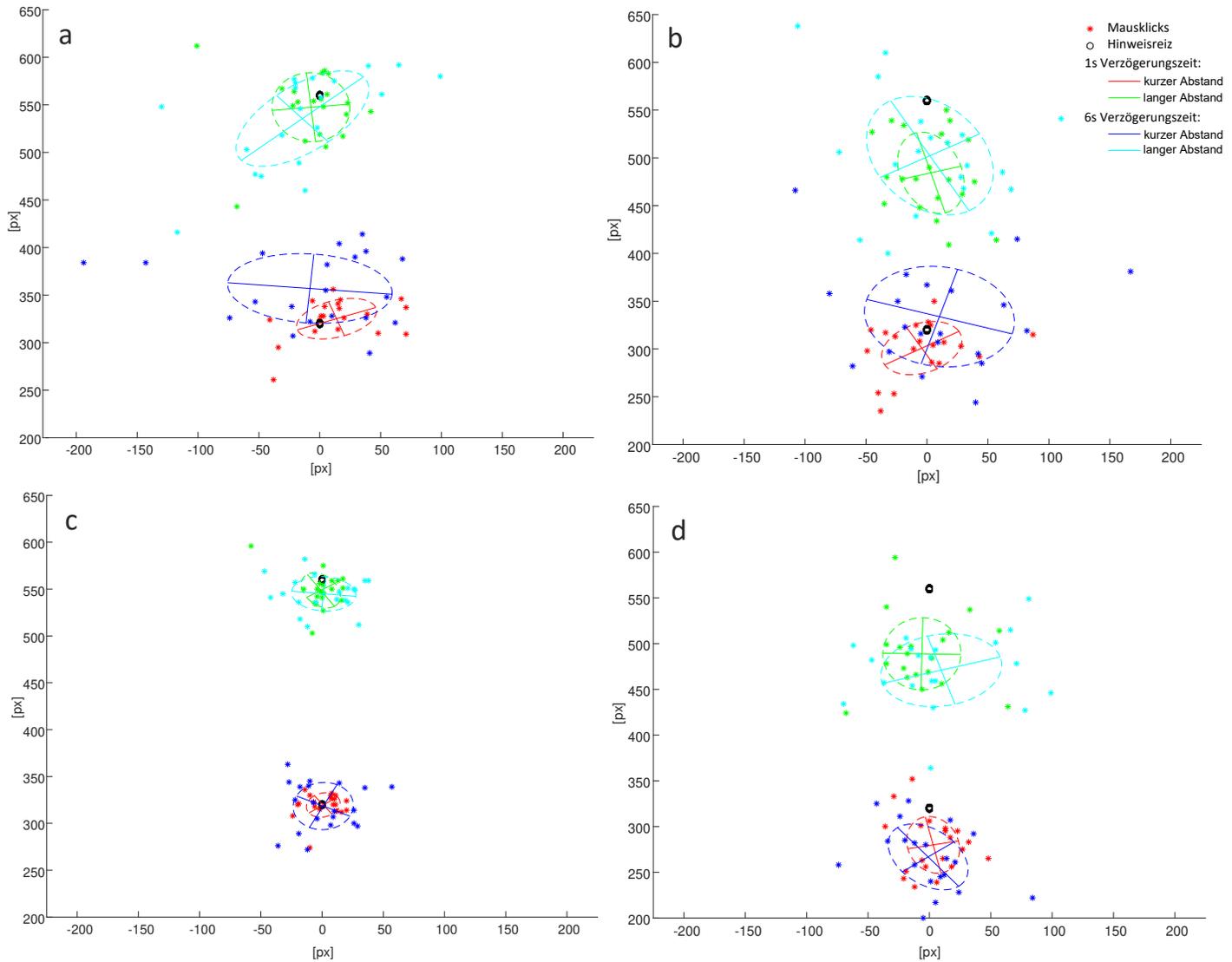


Abbildung 16: Rohdaten der rotierten Mausclicks (kleine Punkte) mit dazugehörigen Hinweisreizen (große Kreise) von Versuchsperson 12. a: mit Interferenz und freier Augenbewegung, b: mit Interferenz und fixierter Augenbewegung, c: ohne Interferenz und freier Augenbewegung, d: ohne Interferenz und fixierte Augenbewegung. Grün: eine Sekunde Verzögerungszeit und langer Abstand, hellblau: sechs Sekunden Verzögerungszeit und langer Abstand, rot: eine Sekunde Verzögerungszeit und kurzer Abstand, dunkelblau: sechs Sekunden Verzögerungszeit und kurzer Abstand.

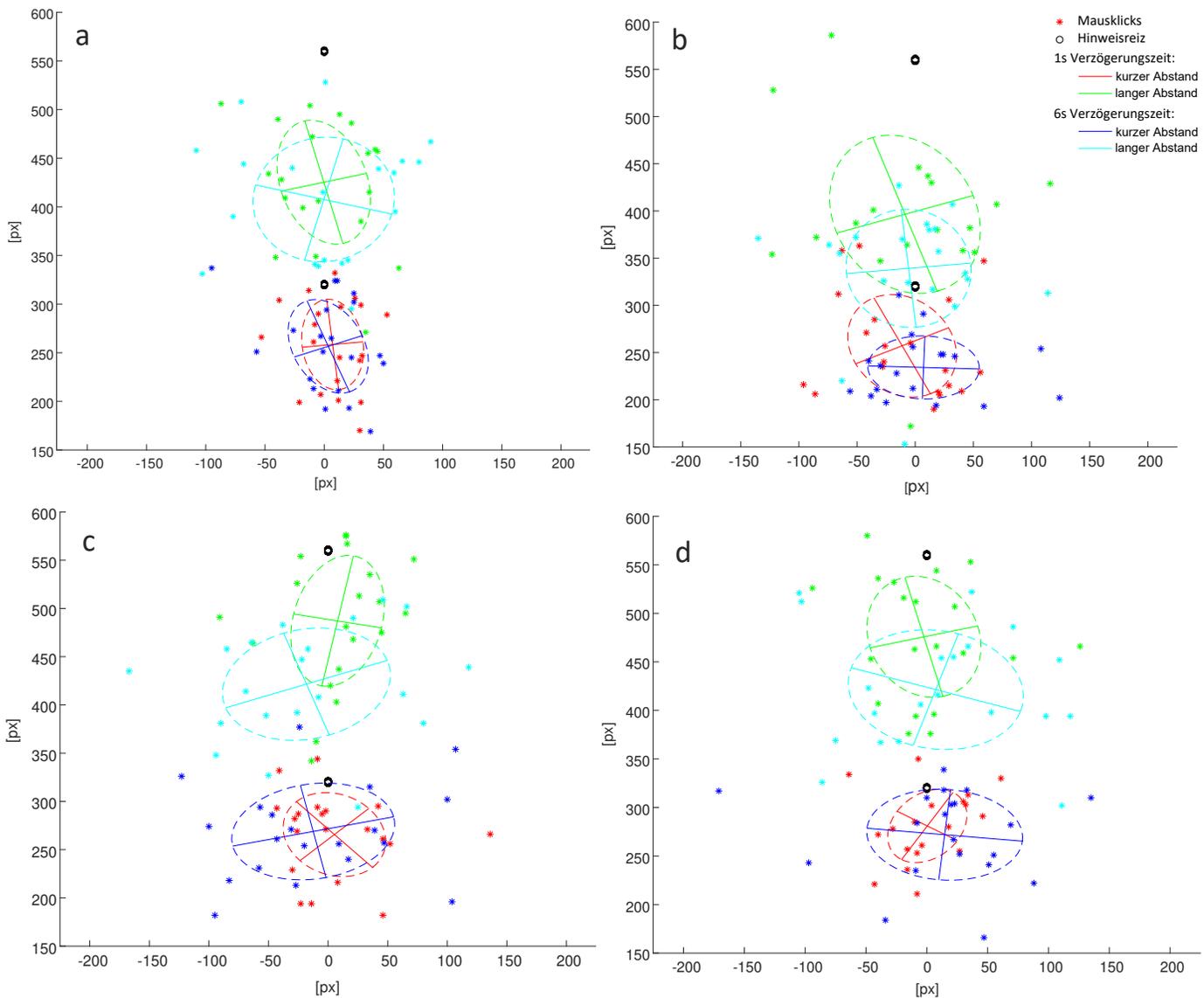


Abbildung 17: Rohdaten der rotierten Mausclicks (kleine Punkte) mit dazugehörigen Hinweisreizen (große Kreise) von Versuchsperson 10. a: mit Interferenz und freier Augenbewegung, b: mit Interferenz und fixierter Augenbewegung, c: ohne Interferenz und freier Augenbewegung, d: ohne Interferenz und fixierte Augenbewegung. Grün: eine Sekunde Verzögerungszeit und langer Abstand, hellblau: sechs Sekunden Verzögerungszeit und langer Abstand, rot: eine Sekunde Verzögerungszeit und kurzer Abstand, dunkelblau: sechs Sekunden Verzögerungszeit und kurzer Abstand.

5.3 overshoots und undershoots

Neben der Genauigkeit und der Präzision kann es sinnvoll sein zu ergründen, ob eine vertikale Verschiebung vorliegt. Ein *overshoot* beschreibt die Lage der Mausclicks, welche über den Hinweisreiz hinaus liegen, während bei einem *undershoot* die Lage der Hinweisreize unterschritten wird. Abbildung 18 gibt einen Überblick dieser Lageparameter mit Bezug auf die unterschiedlichen Versuchsbedingungen.

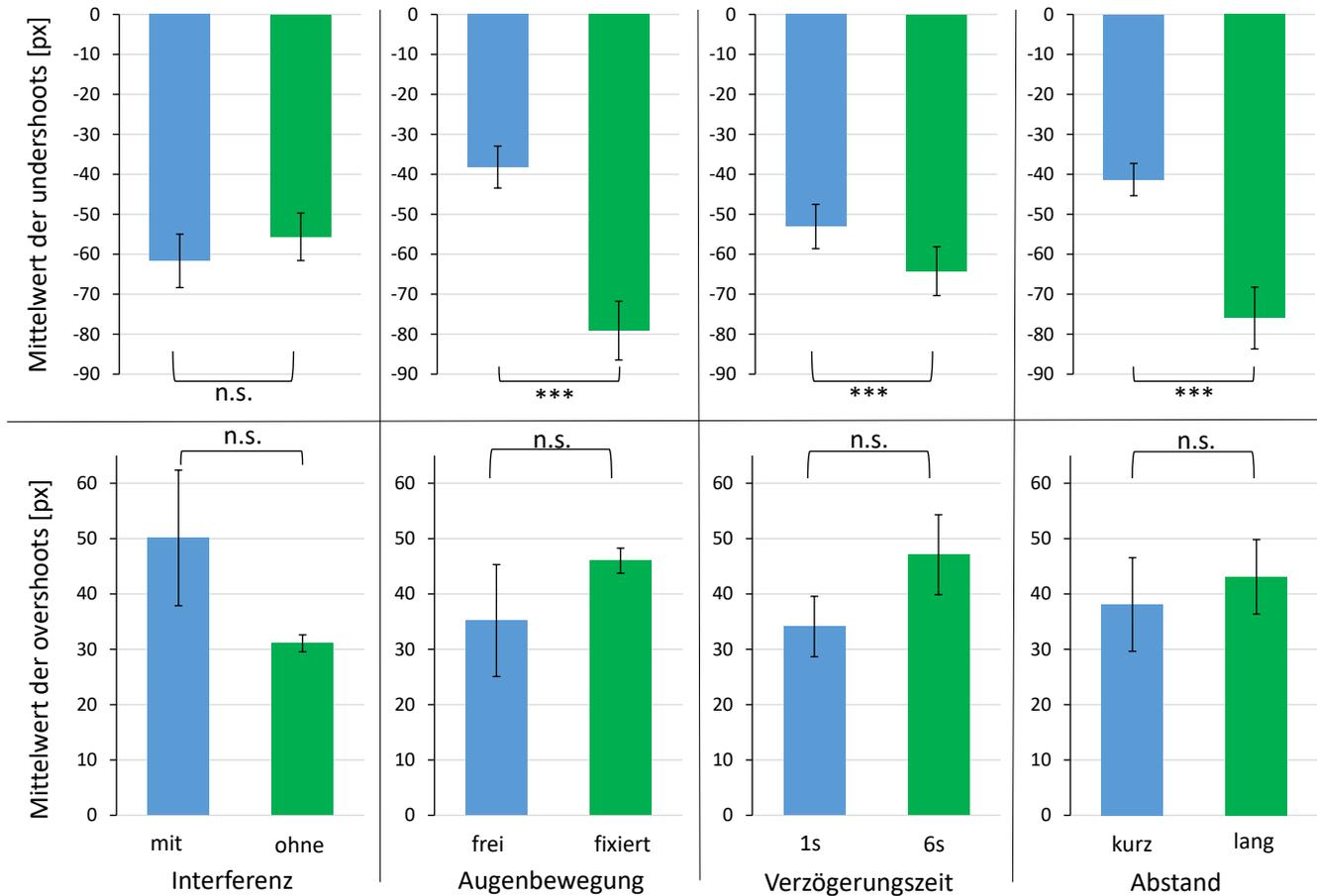


Abbildung 18: Subplot der Versuchsbedingungen Interferenz, Augenbewegung, Verzögerungszeit und Abstand aufgetragen gegen die Mittelwerte der *overshoots* und *undershoots* in Pixeln mit Standardfehlern. Der Signifikanzwert wird folgendermaßen angegeben: n.s. = nicht signifikant, *** = $p < 0,001$.

Insgesamt gab es über alle Bedingungen hinweg im Durchschnitt 4,6 *overshoots*, 15,1 *undershoots* und 0,2 exakte Mausclicks. Mausclicks mit dem selben y-Wert wie der Hinweisreiz kamen daher vergleichsweise recht selten vor. Ebenso traten *undershoots* mehr als drei mal so oft auf wie *overshoots*. In Abbildung 18 ist der Mittelwert der over- und *undershoots* in Abhängigkeit der Versuchsbedingungen dargestellt. Die Interferenz hat keinen signifikanten Effekt sowohl auf die *undershoots* ($F(1,15) = 1,308$; $p = 0,271$; $\eta_p^2 = 0,080$) als auch auf die *overshoots* ($F(1,15) = 2,302$; $p = 0,268$; $\eta_p^2 = 0,535$). Die Augenbewegung hingegen hat einen signifikanten Effekt auf die *undershoots* ($F(1,15) = 55,118$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,786$). So führt die fixierte Augenbewegung zu wesentlich größeren *undershoots* als die freie Augenbewegung. Im Gegensatz dazu hat die Augenbewegung keinen signifikanten Effekt auf die *overshoots* ($F(1,15) = 1,723$; $p = 0,320$; $\eta_p^2 = 0,463$). Im Hinblick auf die Verzögerung lässt sich ein signifikanter Effekt auf die *undershoots* beobachten ($F(1,15) = 30,842$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,673$), jedoch nicht auf die *overshoots* ($F(1,15) = 10,196$; $p = 0,086$; $\eta_p^2 = 0,836$). Zusätzlich werden die *undershoots* mit längerer Verzögerungszeit größer. Mit Bezug auf den Abstand zeigt sich ein signifikanter Effekt auf die *undershoots* ($F(1,15) = 61,743$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,805$). Ein größerer Abstand führt auch zu größeren *undershoots*. Jedoch hat der Abstand keinen Effekt auf die *overshoots* ($F(1,15) = 0,291$; $p = 0,643$; $\eta_p^2 = 0,127$). Darüber hinaus gibt es bei den *undershoots* signifikante Interaktionen

zwischen Interferenz und Abstand ($F(1,15) = 13,007$; $p = 0,003$; $\eta_p^2 = 0,464$), Augenbewegung und Abstand ($F(1,15) = 38,251$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,718$) und Verzögerungszeit und Abstand ($F(1,15) = 30,762$; $p = 0,000$; $\eta_p^2 = 0,672$). So gibt es bei kurzem Abstand keinen Effekt der Interferenz auf das Ausmaß der *undershoots*. Mit langem Abstand sind die *undershoots* mit Interferenz größer als ohne Interferenz. Der Zusammenhang, dass die *undershoots* mit freier Augenbewegung kleiner sind als mit fixierter, wird mit einem langem Abstand verstärkt. Der positive Zusammenhang von längerer Verzögerungszeit auf das Ausmaß der *undershoots* wird ebenfalls durch einen langen Abstand verstärkt. Hingegen lassen sich keine signifikanten Interaktionen bezüglich der *overshoots* finden.

5.4 Mauspfade

Die 5120 visuell beobachteten Mauspfade wurden in die sieben Kategorien *gerade*, *gerade mit Fähnchen*, *gerade mit Sichel*, *kurvig*, *s-förmig* mit *Knick in der Mitte* und *diffus* eingeteilt (Abb.19). Weiterhin zeigen beinahe alle Mauspfade einen ähnlichen zeitlichen Verlauf. Zu Beginn stagniert der Mauscursor kurz, im Anschluss wird er beschleunigt, um kurz darauf wieder zu entschleunigen. Daraufhin wird entweder sofort auf den gewählten Endpunkt geklickt oder es wird eine fähnchen- oder sichelartige Bewegung ausgeführt. Bezüglich der Häufigkeit lässt sich feststellen, dass die *geraden* und die *kurvigen* Mauspfade am häufigsten auftreten. Die *s-förmigen* Mauspfade und solche mit einem *Knick in der Mitte* sind hingegen seltener zu beobachten. Die *diffusen* Mauspfade sind mit einer absoluten Anzahl von nur 13 Mauspfaden vernachlässigbar.

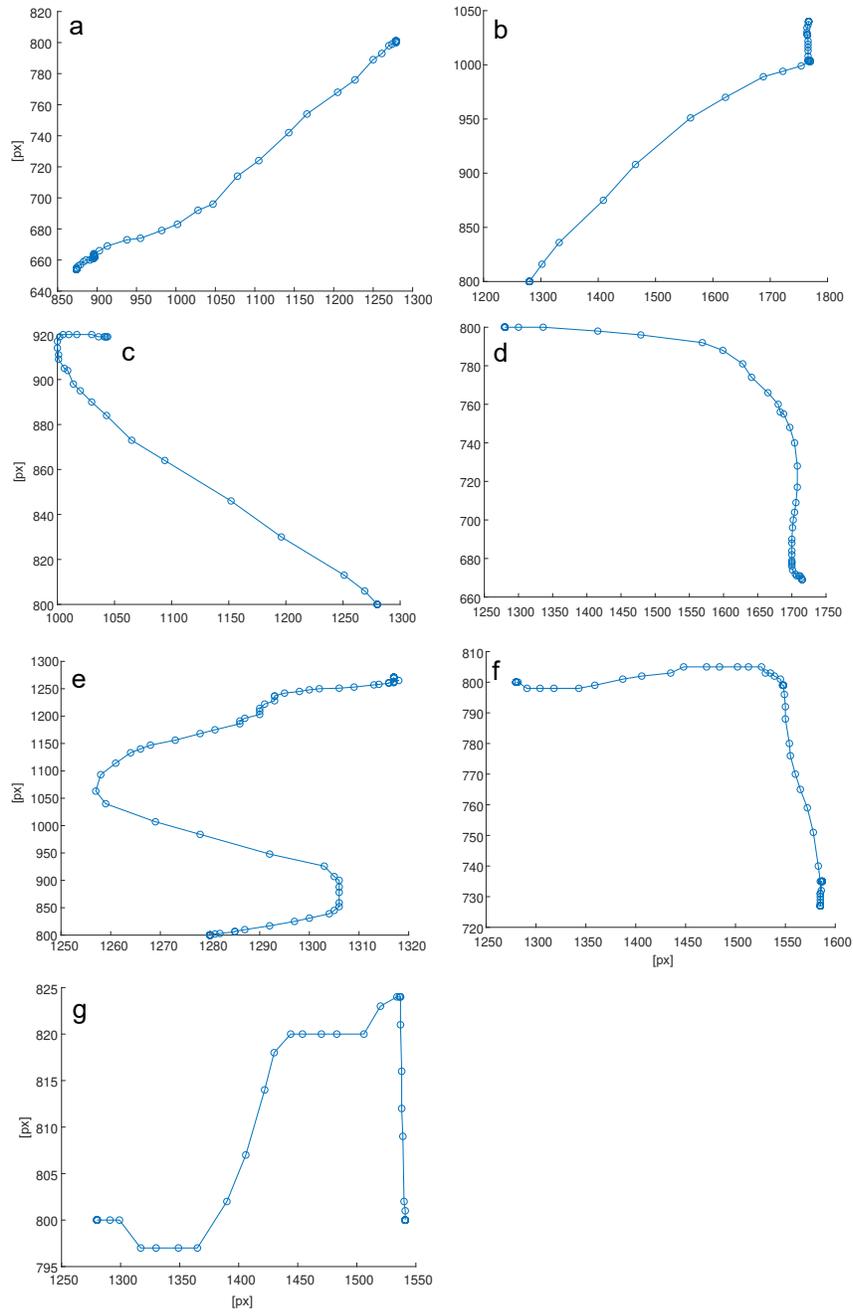


Abbildung 19: Beispiele kategorisierter Mauspfade, aufgetragen als Pixel gegen Pixel. a: *gerade*, b: *gerade mit Fähnchen*, c: *gerade mit Sichel*, d: *kurvig*, e: *s-förmig*, f: *Knick in der Mitte*, g: *diffus*.

6 Diskussion

Im Nachfolgenden werden die gesammelten Ergebnisse zusammengetragen und auf ihre Verträglichkeit mit den eingangs formulierten Hypothesen hin untersucht.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Bezug auf die Interferenz lässt sich festhalten, dass sie keinen Effekt auf den Genauigkeitsfehler hat. Jedoch werden die beiden Präzisionsfehler beeinflusst. So gibt es einen großen Effekt auf beide Präzisionsfehler, die dazu führen, dass die Streuung mit gestellter Zweitaufgabe größer ist. Die Probanden haben demnach den Ort des Hinweisreizes im Mittel ähnlich genau getroffen, jedoch waren die Mausclicks mit einer Zweitaufgabe weiter gestreut. Mit Blick auf die Augenbewegung zeigt sich ein großer Effekt auf alle drei verwendeten Fehlermaße. Im Gegensatz zu fixierter Augenbewegung sind die Mausclicks mit freier Augenbewegung genauer und weniger gestreut. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Verzögerungszeit, welche ebenso große Effekte auf alle drei Fehlermaße hat. Mit steigender Verzögerung wird die Antwort der Probanden ungenauer und weiter gestreut. Des Weiteren zeigt auch der Abstand große Effekte auf alle drei Fehlermaße. Ein großer Abstand führt zu einer ungenaueren und weiter gestreuten Antwort der Probanden. Betrachtet man nun die Reaktionszeit lässt sich kein signifikanter Effekt sowohl der Interferenz als auch der Augenbewegung ausmachen. Dahingegen führt eine kürzere Verzögerung und ein längerer Abstand zu einer längeren Reaktionszeit.

Bei Betrachtung von Interaktionstermen zweier Faktoren sind signifikante Effekte zu beobachten. So hat der Abstand einen Effekt auf den Zusammenhang zwischen Genauigkeitsfehler und den drei Faktoren Interferenz, Augenbewegung und Verzögerung. Des Weiteren gibt es einen Effekt der Augenbewegung auf den Zusammenhang vom ersten Präzisionsfehler und der Interferenz. Der Abstand wiederum zeigt einen Effekt auf den Zusammenhang des ersten Präzisionsfehlers und der Augenbewegung. Schlussendlich zeigt die Verzögerung einen Effekt auf den Zusammenhang von Reaktionszeit und Interferenz.

6.2 Beurteilung der Hypothesen

Wie bereits in Kapitel 3.7 beschrieben, lauten die Hypothesen wie folgt: (1) Eine Zweitaufgabe hat eine negative Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der räumlichen Verzögerungsaufgabe. (2) Es wird vermutet, dass die Augenbewegung die Leistungsfähigkeit der räumlichen Aufgabe beeinflusst. (3) Eine Verzögerungszeit von sechs Sekunden führt, verglichen mit einer von einer Sekunde, zu einer niedrigeren Leistungsfähigkeit der räumlichen Verzögerungsaufgabe. (4) Ein größerer Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz führt ebenfalls zu einer Erniedrigung der Leistungsfähigkeit. (5) Sakkaden und Mauspfade zeigen Gemeinsamkeiten.

In Bezug auf Hypothese (1) lässt sich feststellen, dass diese teilweise bestätigt werden kann. So beeinflusst die Interferenz teilweise die Leistungsfähigkeit, indem sie die Streuung erhöht. Die Genauigkeit wird jedoch nicht beeinflusst. Hypothese (2) kann ebenfalls verifiziert werden. Die Augenbewegung hat einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Bei freier Augenbewegung ist die Leistungsfähigkeit wesentlich besser als bei fixierter Augenbewegung. Weiterhin lässt sich auch Hypothese (3) bestätigen. So führt eine längere Verzögerung zu einer geringeren Leistungsfähigkeit in der räumlichen Hauptaufgabe. Gleiches lässt sich für Hypothese (4) aussagen. Ein längerer Abstand führt zu einer schlechteren Leistungsfähigkeit. Zuletzt lässt sich zu Hypothese (5) sagen, dass Sakkaden und Mauspfade nach optischer Analyse Gemeinsamkeiten zeigen.

6.3 Details der vier Versuchsbedingungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der vier Versuchsbedingungen genauer analysiert und in den Kontext der aktuellen Forschung eingebettet.

6.3.1 Interferenz

Die Mausklicks sind mit Interferenz weniger präzise, zeigen aber keine Veränderung der Genauigkeit. Die Berechnung des Genauigkeitsfehlers nimmt dabei eine wichtige Rolle ein. Die Berechnung erfolgte über den Abstand des Fehlerellipsenmittelpunktes zum Ort des Hinweisreizes. Dadurch können sich Mausklicks, die in entgegengesetzten Richtungen gleich weit gestreut liegen, gegenseitig aufheben. Obwohl beide Klicks einzeln betrachtet eine hohe Ungenauigkeit aufweisen, kann der Genauigkeitsfehler mit dieser Berechnung immer noch sehr gering sein (Siehe dazu auch die dunkelblauen Fehlerellipsen von Abb.16b und d). Ein weiterer Ansatz zur Berechnung der Genauigkeit wäre demnach die Messung des Abstands von jedem Mausklick zum Hinweisreiz. Diese Berechnung der Genauigkeit wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

Nachfolgend wird die beeinträchtigte Präzision durch die Zweitaufgabe in den Blick genommen. Diese kann mehrere Ursachen haben. So hatten viele Versuchspersonen bei Bearbeitung der Versuche eine gewisse Erwartungshaltung an den Versuchsdurchlauf. Folgende Aussage in Bezug auf die Interferenzaufgabe trat vermehrt auf: »Jetzt wird es schwerer«. Genauso zeigten sich die Versuchspersonen bei Versuchsdurchläufen ohne Zweitaufgabe erleichtert: »Dann ist es jetzt ja entspannter«. Sowohl die negativen als auch die positiven Erwartungen können einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben. Eine weitere Ursache könnte eine Verschiebung der Aufmerksamkeit hin zur Aufrechterhaltung einer räumlichen Informationen sein. Denn die Zweitaufgabe wurde während der Verzögerung gestellt, in welcher die räumlichen Informationen der Hauptaufgabe aufrecht erhalten werden müssen. Bereits 1994 haben Smyth and Scholey festgestellt, dass aktive räumliche Aufmerksamkeit bei der Aufrechterhaltung räumlicher Informationen benötigt wird. Weiter stellten sie eine Interferenz der räumlichen Hauptaufgabe mit jeder zusätzlichen Aufgabe, die ebenfalls räumliche Aufmerksamkeit benötigt, fest. Ebenso hat Smyth (1996) diese Erkenntnisse weiter untermauert. Die räumliche Verzögerungsaufgabe wurde dabei in drei separaten Versuchsbedingungen gestellt. Entweder gab es während der Verzögerung keine Zweitaufgabe oder es wurden Töne präsentiert, die dem Probanden entweder nur präsentiert wurden oder darüber hinaus klassifiziert werden sollten (links oder rechts). Die Bedingung ohne Zweitaufgabe lieferte die höchste Anzahl an korrekten Durchläufen. Bei Präsentation der Töne war die Leistungsfähigkeit in der Aufgabe verschlechtert. Des Weiteren führte die geforderte Klassifikation der Töne zu einer abermaligen Verschlechterung der Leistungsfähigkeit. Eine Verschiebung der begrenzten räumlichen Aufmerksamkeit zu anderen räumlichen Stimuli verschlechtert demnach die Leistungsfähigkeit.

Neben der Erwartungshaltung und der begrenzten räumlichen Aufmerksamkeit kann die Interferenz auch bei der Verarbeitung der räumlichen Informationen auftreten. Denn zwei - oder mehr - räumliche Aufgaben benutzen für die Verarbeitung vermutlich ähnliche oder die gleichen neuronalen Wege. So zeigen Studien (Vgl. Hecker and Mapperson, 1997; Kessels et al., 1999; Klauer and Zhao, 2004; Tresch et al., 1993), dass sich die Leistungsfähigkeit einer Hauptaufgabe bei einer räumlichen Nebenaufgabe stärker verschlechtert als bei einer visuellen Nebenaufgabe. Die Verarbeitung zweier räumlicher Informationen interferiert stärker als die simultane Verarbeitung räumlicher und visueller Informationen. Letztendlich lassen sich die Ursachen der begrenzten Aufmerksamkeit und die Verarbeitung durch gleiche neuronale Wege nicht voneinander trennen. Denn die Aufmerksamkeit ist eng mit dem Arbeitsgedächtnis verbunden. So zeigen das räumliche Arbeitsgedächtnis und die räumliche selektive Aufmerksamkeit große neuronale Überlappung (Awh et al., 2006). Weiter beschreiben Awh et al. (2006) die Aufmerksamkeit als »gatekeeper«, welche entscheidet, welche Informationen den limitierten Arbeitsbereich des Arbeitsgedächtnisses besetzen dürfen. Die Selektion der Informationen erfolgt dabei zielgerichtet. Nur diejenigen Informationen, die relevant für das Ziel sind, werden in das System des Arbeitsgedächtnisses aufgenommen. Die Probanden hatten bei der Bearbeitung beider Aufgaben jeweils das Ziel, so genau und korrekt wie möglich zu antworten. Die Bearbeitung

der Zweitaufgabe führte vermutlich zu einer Belastung der limitierten Kapazität des räumlichen Arbeitsgedächtnisses. Diese Belastung reichte aus, um die erinnerten Informationen über den Ort des Hinweisreizes in Teilen negativ zu beeinflussen.

Die Zweitaufgabe des vorliegenden Experiments ist der räumlichen Nebenaufgabe von Meilinger et al. (2008) nachempfunden. Die Intensität der Zweitaufgabe lag beim vorliegenden Experiment mit einem Klang pro Sekunde (bei einer Verzögerung von einer Sekunde) oder einem Klang pro 1,2 Sekunden (bei einer Verzögerung von sechs Sekunden) unterhalb der Intensität von einem Klang alle 0,8 Sekunden (Vgl. Meilinger et al., 2008).

6.3.2 Augenbewegung

Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei freier Augenbewegung - im Vergleich zu fixierter Augenbewegung - ist eng an die Strategie des Probanden geknüpft. Bei freier Augenbewegung schauten alle Probanden zunächst auf das Fixationskreuz, also auf die Mitte des Bildschirms. Bei Erscheinen des Hinweisreizes wurde eine Sakkade zum Ort des Reizes ausgeführt und während der gesamten Verzögerungszeit fixiert. Bei Beginn der Antwortphase klickten die Probanden nun auf die fixierte Stelle. Hinweise auf eine solche Strategie ist in der Literatur bisher nicht zu finden. Studien, die sich mit der Präsentation jeweils eines einzelnen Punktes beschäftigen, nutzen ausschließlich fixierte Augenbewegung (Funahashi et al., 1989; Klauer and Zhao, 2004; Macoveanu et al., 2007; Tresch et al., 1993). Wiederum Studien, die sowohl fixierte als auch freie Augenbewegung erlauben, nutzen keine Aufgaben mit nur einer Punktpräsentation pro Durchlauf (Godijn and Theeuwes, 2012; Tremblay et al., 2006).

Einen positiven Effekt der freien Augenbewegung auf die Leistungsfähigkeit finden auch Tremblay et al. (2006) (Vgl. Kapitel 3.5). Hingegen finden Godijn and Theeuwes (2012) keinen Effekt der Augenbewegung. Godijn and Theeuwes und Tremblay et al. vermuten eine Verbesserung der Erinnerung bei freier Augenbewegung, da die Sakkaden als Mechanismus der Wiederholung (Rehearsal) dienen könnten. Ob Sakkaden tatsächlich als ein solcher Mechanismus dienen können, ist noch nicht geklärt. Diese Arbeit lässt hierüber keine Schlüsse zu, da die Probanden bei der freien Augenbewegung nur eine Sakkade tätigten und diese für einen effektiven Wiederholungsprozess vermutlich nicht ausreicht. Um die Grundlage des Wiederholungsprozesses testen zu können, muss die Strategie der Probanden unterdrückt werden, da die Effekte der Strategie und der Sakkaden sonst nicht voneinander trennbar sind.

Zusätzlich spielt der Zeitpunkt, zu dem die Probanden die Anweisungen für die Augenbewegung erhalten, eine Rolle. Godijn and Theeuwes (2012) belegen, dass wenn die Probanden schon während der Präsentation der Hinweisreize wussten, welche Augenbewegungsanweisung sie befolgen sollen, sie die Strategie der Augenbewegung während der Encodierung ändern. Ebenso kann sich die Augenbewegung während der Encodierung auf den Speicherabruf auswirken (Saint-Aubin et al., 2007). In der vorliegenden Arbeit verläuft die Encodierung ebenfalls unter dem Einfluss verschiedener Augenbedingungen. Schon vor Versuchsbeginn haben die Probanden Kenntnis über die geforderte Augenbewegung. Welchen Unterschied eine spätere Anweisung der Augenbewegung hat, wird in dieser Arbeit nicht untersucht und könnte in einem weiteren Versuch untersucht werden.

6.3.3 Verzögerungszeit

Es zeigt sich ein Verlust der räumlichen Informationen des Arbeitsgedächtnisses bei einer längeren Verzögerung. Eine verschlechterte Leistungsfähigkeit einer räumlichen Aufgabe mit längerer Verzögerung zeigen auch Fleming et al. (1997). Hingegen finden Ross et al. (2000) nur eine Tendenz hin zu einer schlechteren Leistungsfähigkeit mit längerer Verzögerung und Srimal and Curtis (2008) schlus-

sendlich finden keinen Beleg für einen solchen Effekt. Der Effekt der Verzögerung in der vorliegenden Arbeit weist in die Richtung der Ergebnisse von Fleming et al..

Allgemein kann das Arbeitsgedächtnis Informationen für mehrere Sekunden speichern (Engel et al., 2018, S.899). Möglicherweise zerfällt die Erinnerung an den genauen Ort des Hinweisreizes jedoch schon früher. Zudem wäre es möglich, dass kein effektiver Wiederholungsprozess stattfinden konnte, um die Information länger aufrechtzuerhalten. Der negative Effekt des fehlenden Wiederholungsprozesses würde die Bedingung der längeren Verzögerung stärker betreffen. Denn bei einer Verzögerung von einer Sekunde ist es unklar, ob die räumliche Information überhaupt in das Arbeitsgedächtnis aufgenommen wird oder ob diese sich nur im Ultrakurzzeitgedächtnis befindet. Bei einer Verzögerung von sechs Sekunden erfordert die Aufrechterhaltung der Informationen die Aufnahme in das Arbeitsgedächtnis, da die Information im Ultrakurzzeitgedächtnis bereits zerfallen. Die Information muss für eine akkurate Wiedergabe selbiger wiederholt werden. Ist diese Wiederholung beeinträchtigt, zerfällt die Information innerhalb weniger Sekunden. Wie bereits beschrieben, könnten Sakkaden einen solchen effektiven Wiederholungsprozess darstellen. Im vorliegenden Experiment können während der fixierten Augenbewegung keine Sakkaden stattfinden und während der freien Augenbewegung wird jeweils nur eine Sakkade ausgeführt. Somit ist es fraglich, ob ein effektiver Wiederholungsprozess vorliegt, der die akkurate Informationswiedergabe begünstigt.

Zusätzlich hat die Verzögerung einen Effekt auf die Reaktionszeit. So erhöht sich bei geringerer Verzögerung die Reaktionszeit. Im Gegensatz dazu finden Funahashi et al. (1989) auf Grund unterschiedlicher Verzögerungszeiten keine erhöhte Reaktionszeit, von Initiation der Antwort bis Sakkadenendpunkt. Möglicherweise hat die zufällige Wahl der Verzögerungszeit einen Einfluss auf die gezeigte Reaktionszeit. Die Probanden wissen nicht, wie lange die Verzögerung eines Durchlaufs ist. Ihnen wird nur mitgeteilt, dass es eine kurze und eine lange Verzögerungszeit gibt. Es wäre denkbar, dass die Probanden die Zeitspanne der kurzen Verzögerung überschätzen und dadurch nicht damit rechnen bereits eine Antwort zu initiieren zu müssen. Des weiteren hat ein Proband angegeben, er habe bei einer längeren Verzögerungszeit unter größerem Druck gestanden, schnell zu antworten, um den erinnerten Ort nicht zu vergessen. Weitere Probanden wurden zu diesem Aspekt nicht befragt.

6.3.4 Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz

Ein größerer Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz führt allgemein zu einer schlechteren Leistungsfähigkeit in der räumlichen Verzögerungsaufgabe. Der Effekt des Abstandes in einer solchen Aufgabe ist in der Literatur nicht zu finden. Der verwendete Versuchsaufbau bietet nur das Fixationskreuz als einen räumlichen externen Hinweis. Ansonsten ist der Raum abgedunkelt, wodurch auch die Umrisse des Monitors nicht sichtbar sind. Zum einen bedeutet ein größerer Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz also eine größere Entfernung zum einzigen Anhaltspunkt. Zum anderen bedeutet der erhöhte Abstand längere Wegzeiten, diese erklären somit die erhöhte Reaktionszeit bei längerem Abstand. Eine längere Zeit zwischen Start der Bewegung und Mausclick könnte bedeuten, dass die Probanden sich den Ort des Hinweisreizes länger merken mussten. Es ist aber unwahrscheinlich, dass dies zu einem Informationsverlust führt, da es sich im Mittel nur um 0,149 Sekunden Unterschied handelt. Zudem könnten den Mausclicks Sakkaden vorausgegangen sein, die der Proband zum erinnerten Ort ausführt, um in der Folge den Mauscursor zu der Stelle zu bewegen. Da die Augenbewegungen nicht aufgenommen und die Probanden nicht befragt wurden lässt sich diese Vermutung nicht überprüfen.

Zusätzlich kann in der vorliegenden Arbeit nicht zwischen den Effekten der Erinnerung und der Wahrnehmung unterschieden werden. Bis jetzt wurde davon ausgegangen, dass ein negativer Effekt auf die Leistungsfähigkeit einzig und allein auf eine zerfallende Erinnerung zurückzuführen ist. Aller-

dings ist es möglich, dass dieser Effekt auch auf unterschiedliche Wahrnehmung der Hinweisreize bei verschiedenen Abständen zurückzuführen ist. In der Regel werden, um Objekte zu fixieren, die Augen so bewegt, dass das Objekt auf den Teil der Netzhaut mit der höchsten Dichte an Zapfen trifft, der Fovea. Dies ermöglicht ein scharfes Sehen. Ist während der Punktpräsentation die Augenbewegung fixiert, können die Punkte nur noch in der Peripherie wahrgenommen werden und die Auflösung der Punkte sinkt (Anderson, 2007, S.51). Die Erinnerung an den Punkt ist dadurch bereits während der Encodierung ungenauer als bei direkter Fixation des Punktes. Ein längerer Abstand kann zu einer weiteren Verschlechterung der Punkterinnerung auf grund einer Wahrnehmung mit geringerer Auflösung führen. Die Augenbewegung zeigt beim Genauigkeits- und ersten Präzisionsfehler eine Interaktion mit dem Abstand. Die fixierte Augenbewegung führt dabei zu größeren Fehlern. Dieser Zusammenhang wird beim Genauigkeits- und ersten Präzisionsfehler mit einem längeren Abstand verstärkt, was mit dem obigen Zusammenhang in Einklang steht.

6.4 *overshoots* und *undershoots*

Mausklicks, welche die exakte y-Position des Hinweisreizes getroffen haben sind sehr selten. *undershoots* sind dabei im Vergleich zu *overshoots* überrepräsentiert. Die Bestimmung der Anzahl und des Ausmaßes der *overshoots* und *undershoots* sind Berechnungen, die vor Experimentbeginn nicht als solche eingeplant waren und werden daher nicht in den Hypothesen berücksichtigt. Nichtsdestotrotz liefern diese Berechnungen relevante Informationen. Vor allem die *undershoots* spielen eine wichtige Rolle in der räumlichen Verzögerungsaufgabe, da sie im starken Einfluss der Versuchsbedingungen Augenbewegung, Verzögerungszeit und Abstand stehen. So zeigten auch Chieffi et al. (1999) in einer räumlichen Verzögerungsaufgabe einen prozentualen Anteil an *undershoots* von 82,3 %. Die gestellte Aufgabe bei Chieffi et al. (1999) besteht aus einer Präsentation eines Stimulus, bei dem die Probanden nach einer Verzögerung von 3 beziehungsweise 30 Sekunden den erinnerten Ort benennen sollen. Die Autoren finden ebenfalls einen Effekt der Verzögerung auf die *undershoots*. Das Ausmaß der *undershoots* nimmt dabei mit zunehmender Verzögerung zu.

Soechting and Flanders (1989) testeten ihre Probanden ebenfalls in einer räumlichen Verzögerungsaufgabe. Die Probanden sollen entweder mit dem Finger auf den erinnerten Ort zeigen oder mit einem Pointer, beides führt jeweils zu *undershoots*. Wenn die Probanden den Arm aktiv oder passiv zum Zielort hin bewegen, nehmen die Fehler der *undershoots* ab. Soechting and Flanders (1989) schlussfolgern, dass die *undershoots* durch die Transformation der visuell-räumlichen Repräsentationen zur Hand- beziehungsweise Armbewegung zustandekommen. Auch im vorliegenden Experiment müssen visuell-räumliche Informationen in Handbewegungen umgewandelt werden, was auch hier zu den *undershoots* geführt haben könnte.

Des Weiteren zeigt die Anwesenheit einer Zweitaufgabe bei langem Abstand eine Vergrößerung des Ausmaßes der *undershoots*. Die Zusammenhänge vom Ausmaß der *undershoots* jeweils mit der Augenbewegung beziehungsweise der Verzögerung werden durch einen längeren Abstand verstärkt. Der Abstand hat damit einen großen Effekt auf die Zusammenhänge der restlichen Faktoren und das Ausmaß der *undershoots*. Der Autorin ist keine Literatur über den Einfluss von Interferenz, Augenbewegung und Abstand von Fixationskreuz zu Hinweisreiz auf die Größe der *undershoots* einer räumlichen Aufgabe bekannt.

6.5 *Mauspfade* und *Sakkaden*

Die Mauspfade aller Versuchsbedingungen und Versuchspersonen wurden visualisiert und explorativ auf Gemeinsamkeiten und Mustern hin untersucht. Die Einteilung der Mauspfade erfolgte ohne zuvor festgelegte Eigenschaften und Parameter. Ebenso wurden die Versuchspersonen nicht zu ihrem

Verhalten bezüglich des Zustandekommens der Mauspfade befragt. Es ist unklar, ob die Versuchspersonen bei den *s-förmigen* Pfaden eine Strategie verfolgten oder schlicht die Position des Hinweisreizes vergessen hatten. Bei den Pfaden mit *Knick in der Mitte* könnte man spekulieren, dass die Probanden sich den Monitor als Koordinatensystem vorgestellt hatten, um sich die Orte besser zu merken. Versuchsperson 19 gab an, diese Strategie genutzt zu haben, allerdings zeigt sich dies nicht in den zugehörigen Mauspfaden. *diffuse* Mauspfade, die scheinbar keiner Logik folgen, gibt es ebenfalls sehr selten. Diese Pfade weisen auf ein Vergessen oder Verblissen des erinnerten Ortes hin, jedoch lässt sich dies nicht mit Sicherheit aussagen.

Es stellt sich die Frage, ob die vorliegende Arbeit mit der von Funahashi et al. (1989) vergleichbar ist. Zwar nutzt die vorliegende Arbeit eine ähnliche räumliche Verzögerungsaufgabe wie Funahashi et al. (1989) mit dem Unterschied, dass die Antwort durch Sakkaden anstatt durch Mausclicks gegeben wird. Jedoch beschäftigen sich Funahashi et al. kaum mit Effekten auf die Leistungsfähigkeit bezüglich der räumlichen Verzögerungsaufgabe. Daher ist ein Vergleich dieser beiden Arbeiten nicht möglich. Dennoch lassen die Mauspfade erste Indizien für eine mögliche Vergleichbarkeit zu, denn sie zeigen in Teilen durchaus Ähnlichkeiten zu Mauspfaden. Eine Sakkade ist eine schnelle und akkurate Augenbewegung und hat eine Latenzzeit von circa 180-200 ms, da die Sakkade zuerst neuronal prozessiert werden muss (Leigh and Zee, 2015, S.12). Daraufhin folgt eine schnelle Beschleunigung auf Höchstgeschwindigkeit mit einer anschließenden schnellen Entschleunigung. Darauf folgend stagniert die Bewegung (Liversedge et al., 2011, S.86) oder es zeigen sich korrigierende Sakkaden (Liversedge et al., 2011, S.89). Im Vergleich dazu sind die *geraden* Mauspfade ebenfalls schnell und akkurat. Auch dem Mauspfad geht eine Latenzzeit voraus. Daraufhin wird die Maus beschleunigt und schnell wieder entschleunigt. Am Ende ist der Pfad dann noch einmal kurz stabil. Analog zur Sakkade können sich auch hier korrigierende Mausbewegungen anschließen, die die Form von Fähnchen oder Sicheln annehmen können. Die *kurvigen* Mauspfade bestätigen diese Übereinstimmung allerdings nur teilweise, da sie nicht - im Gegensatz zu einer Sakkade - den schnellstmöglichen Weg zum Ziel nehmen. Dennoch zeigen sie die typische Beschleunigung und Stabilität zu Anfang und Ende. Die *s-förmigen*, die *diffusen* und solche Mauspfade mit *Knick in der Mitte* sind ebenfalls in der Form nicht sakkadenähnlich. Die Beschleunigung und die Stabilität an Anfang und Ende ist dennoch auch hier wiederzufinden. Mit der Visualisierung der Mauspfade wird gezeigt, dass nur etwas weniger als die Hälfte der Mauspfade sehr stark einer Sakkade ähneln. Die andere Hälfte zeigt aber dennoch den zeitlichen Verlauf einer Sakkade. Um zu bestimmen, ob die Mauspfade ein Äquivalent zu den Sakkaden aus Funahashi et al. (1989) bilden, müssten die Pfade nach Latenzzeit, Beschleunigung und Dauer untersucht werden. Zudem muss die Einteilung nach exakten, zuvor festgelegten Kriterien durchgeführt werden, um eine Voreingenommenheit und Verzerrung zu verhindern. In dieser Arbeit wird nur grob visuell geschätzt, wie viele der Mauspfade gerade sind und damit am ehesten einer Sakkade ähneln. Um also den Effekt eines Mausclicks und einer Sakkade zu vergleichen, müssten diese beiden Versuchsbedingungen in einer weiteren Studie getestet werden.

Die Ähnlichkeit von Sakkaden und der Antwort durch Drücken eines Knopfes zeigen Srimal and Curtis (2008). Es werden zwei räumliche Verzögerungsaufgaben verglichen, wobei zur Lösung der Aufgabe einmal eine Sakkade und einmal ein Knopfdruck ausgeführt wird. Die Messungen der Leistungsfähigkeit in den beiden räumlichen Aufgaben zeigten keine signifikanten Unterschiede. Die Autoren schließen aus der Korrelation zwischen der Leistungsfähigkeit der beiden Aufgaben auf ein Zugreifen gleicher kognitiver Ressourcen und auf die Nutzung gleicher neuronaler Mechanismen. Zudem fanden Srimal and Curtis (2008) zwischen den beiden Aufgaben keinen Unterschied der neuronalen Aktivität während der Verzögerung in Gehirnstrukturen wie dem Intraparietalen Sulcus oder dem Sulcus centralis, die für die Bearbeitung der Aufgaben relevant sind. Auch nicht in Bereichen, in denen man sakkaden-zugehörige Neurone vermutet. Die Autoren vermuten eine mögliche Ursache darin, dass bei beiden Aufgaben eine Sakkade geplant wurde, diese aber beim erinnerungsgeführten

Drücken des Knopfes nach der Verzögerung wieder verworfen wurde. Diese Studie beschäftigt sich - im Gegensatz zu der vorliegenden Arbeit - nicht mit Mauspfaden und Mausklicks. Es ist demnach durchaus möglich, dass ein Vergleich von einer Aufgabe mit Sakkaden und einer Aufgabe mit Mausklicks unterschiedliche Ergebnisse liefert. Abschließend lässt sich sagen, dass Mauspfade und Sakkaden Gemeinsamkeiten besitzen. Über einen möglichen Vergleich der Ergebnisse von Aufgaben mit Sakkaden und Aufgaben mit Mausklicks lässt dies allerdings keinen direkten Schluss zu.

6.6 Schlussfolgerung

Zusammenfassend wird ein Effekt der Interferenz auf die beiden Präzisionsfehler gefunden. Mit einer Zweitaufgabe waren die Mausklicks weiter gestreut als ohne Zweitaufgabe. Dennoch waren die Mausklicks durch die Interferenz nicht weniger genau. Dafür konnte keine abschließende Erklärung gefunden werden. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die verwendete Berechnung des Genauigkeitsfehlers für dieses Ergebnis eine entscheidende Rolle spielt. Die Augenbewegung, die Verzögerung und der Abstand zeigen große Effekte auf den Genauigkeitsfehler, die beiden Präzisionsfehler und auf das Ausmaß der *undershoots*. Die freie Augenbewegung führt zu einer besseren Leistungsfähigkeit in der Aufgabe. Auch das Ausmaß der *undershoots* sinkt mit freier Augenbewegung. Dies liegt vermutlich an der Strategie der Probanden, bei welcher der Hinweisreiz nach Präsentation sofort fixiert und die Fixation bis zur Antwort aufrecht erhalten wurde. Eine kürzere Verzögerung führt ebenfalls zu einer besseren Leistungsfähigkeit. Dies wiederum liegt vermutlich am Verlust der genauen räumlichen Information des Zielortes mit der Zeit. Ein kurzer Abstand hat einen positiven Effekt auf die Leistungsfähigkeit. Dies könnte an der schlechteren Wahrnehmung der weiter entfernten Punkte liegen. Dadurch würden diese unschärfer und mit einer weniger genauen räumlichen Information abgespeichert werden.

Die aufgezeichneten Mauspfade zeigen Gemeinsamkeiten mit Sakkaden. Der Vergleich der Ergebnisse von Studien mit handmotorischen und blickmotorischen räumlichen Verzögerungsaufgaben ist dennoch nicht zu empfehlen. Vielmehr geben die gefundenen Gemeinsamkeiten einen Anreiz dazu, die beiden Aufgaben zu vergleichen. Schlussendlich wäre es interessant zu sehen, ob der Einfluss der Interferenz, der Augenbewegung, der Verzögerung und des Abstandes auch bei blickmotorischen räumlichen Aufgaben zu finden sind.

Literatur

- Anderson, J. (2007). Kognitive psychologie. 6. aufl. spektrum.
- Atkinson, R. C. and Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In *Psychology of learning and motivation*, volume 2, pages 89–195. Elsevier.
- Averbach, E. and Coriell, A. S. (1961). Short-term memory in vision. *The Bell System Technical Journal*, 40(1):309–328.
- Awh, E., Jonides, J., and Reuter-Lorenz, P. A. (1998). Rehearsal in spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3):780.
- Awh, E., Vogel, E. K., and Oh, S.-H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, 139(1):201–208.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in cognitive sciences*, 4(11):417–423.

- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, 4(10):829.
- Baddeley, A., Hitch, G., and Bower, G. (1974). Recent advances in learning and motivation. *Working memory*, 8:647–667.
- Chieffi, S., Allport, D., and Woodin, M. (1999). Hand-centred coding of target location in visuospatial working memory. *Neuropsychologia*, 37(4):495–502.
- Constantinidis, C., Funahashi, S., Lee, D., Murray, J. D., Qi, X.-L., Wang, M., and Arnsten, A. F. (2018). Persistent spiking activity underlies working memory. *Journal of Neuroscience*, 38(32):7020–7028.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, 20:506.
- Cowan, N. (2008). What are the differences between long-term, short-term, and working memory? *Progress in brain research*, 169:323–338.
- De Haan, B., Morgan, P. S., and Rorden, C. (2008). Covert orienting of attention and overt eye movements activate identical brain regions. *Brain research*, 1204:102–111.
- Engel, A., Bear, M., Connors, B., and Paradiso, M. (2018). *Neurowissenschaften - Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. Springer Spektrum.
- Eriksson, J., Vogel, E. K., Lansner, A., Bergström, F., and Nyberg, L. (2015). Neurocognitive architecture of working memory. *Neuron*, 88(1):33–46.
- Fleming, K., Goldberg, T. E., Binks, S., Randolph, C., Gold, J. M., and Weinberger, D. R. (1997). Visuospatial working memory in patients with schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 41(1):43–49.
- Funahashi, S. (2015). Functions of delay-period activity in the prefrontal cortex and mnemonic scotomas revisited. *Frontiers in systems neuroscience*, 9:2.
- Funahashi, S. and Andreau, J. M. (2013). Prefrontal cortex and neural mechanisms of executive function. *Journal of Physiology-Paris*, 107(6):471–482.
- Funahashi, S., Bruce, C. J., and Goldman-Rakic, P. S. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey’s dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of neurophysiology*, 61(2):331–349.
- Godijn, R. and Theeuwes, J. (2012). Overt is no better than covert when rehearsing visuo-spatial information in working memory. *Memory & Cognition*, 40(1):52–61.
- Hecker, R. and Mapperson, B. (1997). Dissociation of visual and spatial processing in working memory. *Neuropsychologia*, 35(5):599–603.
- Jones, D. M., Macken, W. J., and Murray, A. C. (1993). Disruption of visual short-term memory by changing-state auditory stimuli: The role of segmentation. *Memory & Cognition*, 21(3):318–328.
- Karnath, H.-O. and Thier, P. (2012). *Kognitive Neurowissenschaften*. Springer.
- Kessels, R. P., Postma, A., and de Haan, E. H. (1999). P and m channel-specific interference in the what and where pathway. *Neuroreport*, 10(18):3765–3767.

- Klauer, K. C. and Zhao, Z. (2004). Double dissociations in visual and spatial short-term memory. *Journal of experimental psychology: General*, 133(3):355.
- Leigh, R. J. and Zee, D. S. (2015). *The neurology of eye movements*. OUP USA.
- Liversedge, S., Gilchrist, I., and Everling, S. (2011). *The Oxford handbook of eye movements*. Oxford University Press.
- Luck, S. J. and Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657):279.
- Macoveanu, J., Klingberg, T., and Tegnér, J. (2007). Neuronal firing rates account for distractor effects on mnemonic accuracy in a visuo-spatial working memory task. *Biological cybernetics*, 96(4):407–419.
- Meilinger, T., Knauff, M., and Bühlhoff, H. H. (2008). Working memory in wayfinding—a dual task experiment in a virtual city. *Cognitive Science*, 32(4):755–770.
- Nee, D. E., Brown, J. W., Askren, M. K., Berman, M. G., Demiralp, E., Krawitz, A., and Jonides, J. (2012). A meta-analysis of executive components of working memory. *Cerebral cortex*, 23(2):264–282.
- Papadimitriou, C., Ferdoash, A., and Snyder, L. H. (2014). Ghosts in the machine: memory interference from the previous trial. *Journal of neurophysiology*, 113(2):567–577.
- Ross, R. G., Harris, J. G., Olincy, A., and Radant, A. (2000). Eye movement task measures inhibition and spatial working memory in adults with schizophrenia, adhd, and a normal comparison group. *Psychiatry Research*, 95(1):35–42.
- Saint-Aubin, J., Tremblay, S., and Jalbert, A. (2007). Eye movements and serial memory for visual-spatial information: Does time spent fixating contribute to recall? *Experimental Psychology*, 54(4):264–272.
- Smyth, M. M. (1996). Interference with rehearsal in spatial working memory in the absence of eye movements. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 49(4):940–949.
- Smyth, M. M. and Scholey, K. A. (1994). Interference in immediate spatial memory. *Memory & Cognition*, 22(1):1–13.
- Soechting, J. F. and Flanders, M. (1989). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of neurophysiology*, 62(2):582–594.
- Srimal, R. and Curtis, C. E. (2008). Persistent neural activity during the maintenance of spatial position in working memory. *Neuroimage*, 39(1):455–468.
- Tremblay, S., Saint-Aubin, J., and Jalbert, A. (2006). Rehearsal in serial memory for visual-spatial information: Evidence from eye movements. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(3):452–457.
- Tresch, M. C., Sinnamon, H. M., and Seamon, J. G. (1993). Double dissociation of spatial and object visual memory: Evidence from selective interference in intact human subjects. *Neuropsychologia*, 31(3):211–219.
- Underwood, B. J. (1957). Interference and forgetting. *Psychological review*, 64(1):49.

Wan, Y. (2015). Week 5 lecture 1: Order effects, counterbalancing and latinsquares. https://cise.ufl.edu/class/cis6930sp15res/week5_lecture1_scribe2.pdf, Zuletzt abgerufen am 3. September 2019.

Wirtz, M. A., Strohmer, J., and Huber (2014). *Lexikon der Psychologie*. Verlag Hans Huber.

Zimmer, H. D. (2008). Visual and spatial working memory: from boxes to networks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 32(8):1373–1395.