

Fachbereich 17
Biologie

Tetris als Behandlungsmöglichkeit für posttraumatische
Belastungsstörungen: Eine fMRT-Pilotstudie zur
Darstellung neuronaler Aktivitäten bei gesunden
Proband:innen.

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

Ackerschott, Lucia Elodie

Marburg, 29.08.2025

Erstgutachterin = Prof. Dr. Annette Borchers

Zweitgutachter = Prof. Dr. Andreas Jansen

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract.....	1
2	Einführung.....	2
2.1	Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS)	2
2.1.1	Neurobiologische Veränderungen und Behandlungsmethoden von PTBS	3
2.1.2	Potential von Tetris speziell in der Psychotherapie	4
2.2	Zielsetzungen.....	5
2.3	Erwartete Kognitive Funktionen.....	5
2.3.1	Visuell-räumliches Arbeitsgedächtnis.....	6
2.3.2	Aufmerksamkeitsnetzwerk	7
2.3.3	Mentale Vorstellung	7
2.3.4	Planung von Bewegungsprozessen	8
2.4	Hypothesenareale	9
3	Methoden	10
3.1	Experimentelles Design.....	12
3.2	Aufbau der Studie	13
3.2.1	Proband:innen	13
3.2.2	Spielbedingungen	14
3.2.3	Ablauf der Messung.....	14
3.2.4	Fragebögendaten	16
3.2.5	Verhaltensdaten	16
3.2.6	MRT-Daten Akquisition.....	18
3.3	MRT-Daten Analyse	19
3.3.1	Vorverarbeitung	19
3.3.2	Statistische Modellierung	20
3.3.3	Statistische Inferenz	21
3.3.4	Parametrische Modulation und zusätzliche Regressoren.....	21
4	Ergebnisse	22
4.1	Fragebögen- und Verhaltensdaten	22
4.2	MRT-Ergebnisse.....	25
4.2.1	Einzelebene	25
4.2.2	Gruppenebene	26
4.3	Kovariaten Analyse	29
4.3.1	Parametrische Modulation	29
4.3.2	Beeinflussung des Aktivitätsmusters durch das Spielkönnen	31
5	Diskussion.....	32

5.1	Vergleich mit der Pilotstudie.....	32
5.2	Beeinflussung des Aktivitätsmusters durch das Spielkönnen	35
6	Zusammenfassung und Ausblick	35
	Abbildungsverzeichnis	37
	Tabellenverzeichnis	38
	Literaturverzeichnis	38
	Bildreferenzen	43
	Anhang	44
	Proband:innen Daten	44
	RStudio Skripte	49
	Eidesstattliche Erklärung	50

1 Abstract

Das Ziel dieser Studie ist es, das Tetrix Paradigma, welches in der Arbeitsgruppe Jansen der Philipps-Universität Marburg im Rahmen einer Bachelorarbeit im Jahre 2024 erstmals beschrieben wurde, durch eine vergrößerte und aussagekräftigere Stichprobe zu replizieren und zu validieren sowie Verfeinerungen am entstehenden Tetris Netzwerk vorzunehmen. Mithilfe von funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie (fMRT) Daten wurde untersucht, ob sich die in der Pilotstudie gefundenen Aktivierungsmuster auch in dieser Studie abbilden lassen, sodass ein konsistentes neuronales Tetris Netzwerk bei gesunden Proband:innen darstellbar ist. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte ein weitreichendes Aktivierungsmuster, das frontale, parietale, okzipitale Regionen und Regionen des Cerebellums einschließt. Insbesondere der präfrontale Kortex, das Kleinhirn, der prämotorische Kortex sowie visuelle Areale zeigen robuste Aktivierungen, während erwartete Aktivierungen des orbitofrontalen und des Cingulären Kortex ausblieben. Die Aktivierung des Hippocampus und des Precuneus zeigten Aktivierungscluster in der Betrachtung auf Einzelebene, welche jedoch durch individuelle räumliche Unterschiede nicht auf Gruppenebene abbildbar waren. Explorative Analysen zeigten, dass Spielerfahrungen Einfluss auf die Aktivierungsmuster des Precuneus haben könnte, auch wenn sich keine konsistente Aktivierung auf Gruppenebene abzeichnen ließ. Insgesamt liefern die Ergebnisse dieser Studie eine Replikation sowie eine Verfeinerung des Paradigmas und weisen auf potenziell mögliche erfahrungsabhängige Unterschiede hin, die in zukünftigen Studien beobachtet und weiter untersucht werden sollten. Außerdem empfiehlt sich dieses Paradigma auf Grund der Aktivierungsmuster für die klinischen Anwendungen hinsichtlich Posttraumatischer Belastungsstörungen, da Rekonsolidierungsprozesse durch das kognitiv komplexe Spiel unterbrochen und Erinnerungen überschrieben werden können.

2 Einführung

In der Einleitung wird zunächst ein Einstieg in das Krankheitsbild der posttraumatischen Belastungsstörungen gegeben (2.1). Der besondere Augenmerk liegt dabei auf den grundlegenden neurobiologischen Veränderungen, welche mit dem Krankheitsbild assoziiert sind (2.1.1), sowie der Anwendung des erläuterten Computerspiels Tetris in bisherigen Studien als psychotherapeutische Intervention (2.1.2). Auf dieser Grundlage werden anschließend die Zielsetzungen der Studie thematisiert (2.2). Weiterhin werden die erwarteten kognitiven Funktionen, die das Spiel hervorrufen könnte, genannt (2.3), worunter das Visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis (2.3.1), das Aufmerksamkeitsnetzwerk (2.3.2), die Mentale Vorstellung (2.3.3) und die Planung von Bewegungsprozessen (2.3.4) fallen. Abschließend erfolgt eine Auflistung der Hypothesenareale (2.4), hinsichtlich dieser Erwartungshaltungen.

2.1 Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS)

Die Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS) wird den psychischen Störungen zugeordnet. Im Zentrum dieser Erkrankung steht ein bereits erlebtes traumatisches Ereignis. Die Definitionen eines traumatischen Ereignisses variieren je nach Klassifikationssystem minimal. Laut der neusten Revision der International Classification of Diseases (ICD-11) (WHO 2018), auf welche sich in der folgenden Arbeit hauptsächlich, auf Grund von internationalem Standard und der vorrangigen Anwendung im deutschsprachigen Raum, bezogen wird, wird ein traumatisches Ereignis bzw. eine Reihe von mehreren Ereignissen als „extrem bedrohlich oder furchtbar“ beschrieben (World Health Organisation [WHO], 2018). Traumatische Erfahrungen werden in zwei Gruppen differenziert: Typ-I-Traumata bezeichnen ein unerwartetes einzeln auftretendes Ereignis, während Typ-II-Traumata mehrfache und sich wiederholend auftretende Ereignisse beschreibt. Durch diese offen gehaltene Definition qualifizieren sich unterschiedlichste Situationen als einschneidendes traumatisches Erlebnis, wodurch ein hohes Risiko vorliegt ein potenziell traumatisches Ereignis zu erleben. Im Zuge einer epidemiologischen Untersuchung in Deutschland erwähnten etwa 67% der befragten Personen eine Konfrontation mit einem potenziellen traumatischen Erlebnis. Dabei sind die meistgenannten Erlebnisse Unfälle und körperliche Gewalt (Maercker et al. 2018), allerdings entwickeln nur wenige Menschen danach PTBS. Symptomatisch wird die Krankheit in drei Hauptsymptomgruppen eingeteilt: Wiedererleben, Vermeidung und Übererregung. Die betroffenen Personen erleben ein traumatisches Ereignis durch lebhaftere Erinnerungen und Flashbacks im Alltag oder Albträume unkontrolliert wieder. Dieses Wiedererleben ist jedoch nicht nur visuell, sondern kann auch durch sensorische „Trigger“ wie Gerüche, Geräusche oder Berührungen hervorgerufen werden, wobei die Empfindungen so stark sein können, wie beim Erleben des traumatischen Ereignisses selbst. Durch die Vermeidung der Erinnerungen und Gedanken an das traumatische Erlebnis versuchen die Betroffenen den „Trigger“ aus dem Weg zu gehen. Dabei meiden sie beispielsweise Personen, Situationen und Aktivitäten, die an das Ereignis erinnern. Die Überreaktion oder auch anhaltende Wahrnehmung einer erhöhten gegenwärtigen Bedrohung beschreibt eine anhaltende Kampf- bzw. Fluchthaltung, die bei gesunden Menschen nur als eine temporäre physiologische Reaktion auf sehr großen Stress folgt. Der Körper der Betroffenen ist jederzeit darauf vorbereitet, dass sich eine Situation wie das erlebte Trauma wiederholt. Durch diesen Zustand ist die Schreckhaftigkeit der Menschen erhöht und es treten Begleiterscheinungen wie z.B. Schlafstörungen und Konzentrationsprobleme auf.

2.1.1 Neurobiologische Veränderungen und Behandlungsmethoden von PTBS

Auf eine Erkrankung an PTBS folgt eine Veränderung auf neurobiologischer Ebene an bestimmten Hirnarealen sowie eine Veränderung der kognitiven Prozesse. Basierend auf gewonnen Erkenntnissen aus der Neurobiologie geht man davon aus, dass eine PTBS einer übererregte Stressreaktion gleichsteht. Dabei spielen die Hirnareale anteriorer cingulärer Cortex (ACC), Hypothalamus, Hippocampus, Amygdala und Hypophyse in der Entstehung und der Aufrechterhaltung von PTBS eine wichtige Rolle. Besonders die Interaktion der Hirnareale erklärt die Symptomatiken, die bei PTBS auftreten (Maercker & Augsburger 2020). Laut nationalen und internationalen Leitfäden und Expertisen von Experten ist eine traumafokussierte Psychotherapie der richtige Behandlungsweg. In der traumafokussierten Psychotherapie dreht sich alles um die Bearbeitung und Aktualisierung des Traumagedächtnisses, welches auf der Dualen Repräsentationstheorie basiert. Die Duale Repräsentationstheorie stützt sich dabei auf replizierte Veränderungen, struktureller und funktioneller Natur, des Gehirns und beschreibt zwei Gedächtnissysteme. Das C-Gedächtnis/C-reps speichert kontext-verknüpfte Informationen ab, während das S-Gedächtnis/S-reps auf Sinneswahrnehmungen basierte Informationen abspeichert. Willentlicher Zugriff auf das Abgespeicherte ist nur beim C-Gedächtnis möglich, derweil werden Informationen aus dem S-Gedächtnis nur durch situationsbezogene Stimuli („Trigger“) aktiviert. Die duale Gedächtnistheorie benennt drei wichtige Hirnareale. Die hippocampalen Areale spielen dabei eine wichtige Rolle in der Sicherung von C-reps, die Amygdala in der Speicherung von S-reps und der Präfrontalcortex mit ACC kontrolliert die Aktivität der Amygdala. Vereinfacht dargestellt kommt es bei PTBS zu einem Angstkreislauf, gesteuert von einer Überaktivierung der Amygdala und somit einer Überbewertung potenzieller Gefahren, einer eingeschränkten präfrontalen Aktivität, wodurch die Amygdala nicht kontrolliert und reguliert werden kann und zu einer Reduzierung des Hippocampusvolumens durch den Einfluss von Stress. Evidenzbasierte Behandlungsmöglichkeiten von PTBS im Bereich der traumafokussierten kognitiven Verhaltenstherapie, wie Prolonged Exposure, Kognitive Therapie, Narrative Expositionstherapie und Kognitive Verarbeitungstherapie, sowie Eye Movement Desensitization and Reprocessing (EMDR) sind empirisch besonders gut untersucht und daher in ihrer Wirksamkeit nachgewiesen. Alle evidenzbasierten traumafokussierten Verfahren teilen gemeinsame Ansätze, und zwar Psychoedukation; Emotionsregulations/Coping Skills; Exposition in sensu; Kognitive Verarbeitung; Umstrukturierung und Zuschreiben von Bedeutungsänderung; Umgang mit spezifischen Trauma-Emotionen und Reorganisation der Gedächtnisstruktur. Durch diese Ansätze lernen die Betroffenen, dass die Symptome normal bei einem solchen Erlebnis sind und auch, wieso diese erstmal nicht verschwinden; einen besseren Umgang mit belastenden Emotionen, das Erlebte durch Konfrontationen neu zu bewerten und eine Veränderung und Aktualisierung der traumaspezifischen Gedächtnisstruktur (Maercker & Augsburger 2020).

Neben der evidenzbasierten traumafokussierten Therapie können noch zusätzliche Verfahren genutzt werden, um den Effekt zu verstärken. Eine beliebte Methodik dafür ist das Spiel Tetris, wodurch die Symptomatik verbessert wird und v.a. maladaptive intrusive Erinnerungen an die traumatischen Ereignisse reduziert werden können (Iyadurai et. al., 2018, James et. al., 2015, Lau-Zhu et. al., 2017). Es hat aber auch Auswirkungen auf neurobiologischer Ebene, beispielsweise durch die Erhöhung des hippocampalen Volumens (Butler et al., 2020). Die Hintergründe werden im nächsten Kapitel näher beschrieben.

2.1.2 Potential von Tetris speziell in der Psychotherapie

Im Jahre 2009 brachten Holmes et al. ein Paper heraus, dass der Wissenschaft und vor allem der Psychotherapie ganz neue Möglichkeiten eröffnete. Sie untersuchten erstmals, ob das Computerspiel Tetris geeignet wäre, um die Flashbacks von PTBS Patient:innen zu verringern. Dazu wurde eine Studie an gesunden Proband:innen durchgeführt, welche sich in 2 Kontrollgruppen mit gesunden Proband:innen unterteilte. Beide Gruppen wurden zunächst mit traumatischen Filmszenen konfrontiert. Anschließend sollte eine Kontrollgruppe Tetris spielen und die andere Kontrollgruppe sollte warten, ohne eine Beschäftigung zu haben. Es kam heraus, dass die Kontrollgruppe, die Tetris gespielt hat, im Vergleich zur anderen Kontrollgruppe, eine verringerte Anzahl an Flashbacks durch die im Experiment gesehene traumatische Filmszenen vorweist (Holmes et al., 2009).

Grund für die Studie ist die Annahme, dass das Wiederhervorrufen von Erinnerungen, durch die Gedächtnisrekonsolidierung, die Erinnerungen in einen labilen Kurzzeitspeicher versetzt, indem diese modifizierbar sind (Kessler et al., 2020; Holmes et al., 2010). Um Erlebtes in Form von Sinneswahrnehmungen abspeichern zu können müssen die eingehenden Informationen zuerst enkodiert werden, um danach durch die Konsolidierung vom Kurzzeitgedächtnis ins Langzeitgedächtnis überführt werden zu können. Um erlerntes bzw. erlebtes wieder abrufen zu können, werden die Erinnerungen vom Langzeitgedächtnis ins Arbeitsgedächtnis übergeben, um daraufhin die Informationen wieder geben zu können (Birbaumer & Schmidt, 2010). An dieser Stelle setzt die Studie an, denn man geht davon aus, dass rekonsolidierte Erinnerungen über eine gewisse Zeitspanne im Arbeitsgedächtnis bleiben und dort modifizierbar sind (Kessler et al., 2020; Holmes et al., 2010). Der Zeitraum, in dem diese Modifizierung möglich ist, soll sich auf circa 6 Stunden nach dem traumatischen Erlebnis oder der erneuten Konfrontation damit begrenzen (Holmes et al., 2009; Holmes et al. 2010; Kessler et al., 2020).

Das Spiel Tetris selbst wird offiziell als ein Zusammenspiel von Spaß und einer Stimulierung von Gehirnnarealen beschrieben. Die insgesamt 7 unterschiedlichen Tetriminos können durch Bewegungen nach links, rechts und nach unten sowie Rotationen verschoben werden, um sie in eine sinnvolle Ordnung zu bringen. Ziel des Spiels ist es, die Tetriminos dabei so geschickt zu platzieren, dass die horizontalen Spiellinien ohne Lücken gefüllt werden, wodurch diese Linien verschwinden und die obigen Reihen nach unten fallen. Mit einer sich erhöhenden Geschwindigkeit wird es immer schwieriger, die Reihen zu füllen, und das Spiel endet mit dem Erreichen der obersten Reihe, der sogenannten Skyline (Tetris, 2025). Das doch sehr einfach aufgebaute Spiel ist jedoch kognitiv sehr anspruchsvoll, da Strategie, räumliches Denken, hohe mentale Vorstellungskraft und Schnelligkeit vereint werden müssen. Diese benötigten kognitiven Funktionen werden vor allem durch das Arbeitsgedächtnis gesteuert, wodurch wahrscheinlich die hervorgerufenen Erinnerungen im Arbeitsgedächtnis zum Teil überschrieben werden (Kessler et al., 2020; Holmes et al., 2010). Genau diese Ansprüche sind der Grund, warum sich das Spiel sehr gut eignet, um ein Paradigma zu erschaffen, welches sich allgemein als standardisierte Basisstruktur in der neurowissenschaftlichen Forschung einsetzen lässt. Das in dieser Arbeit genutzte Paradigma „Tetrix“ teilt das Spiel dabei in seine einzelnen Komponenten auf (vgl. Kapitel 3.2.1), sodass die Unterschiede in der Verarbeitung einzelner Aufgaben in unterschiedlichen Gehirnnetzwerken voneinander abgetrennt und miteinander verglichen werden können.

Seit 2009 konnten die Ergebnisse durch weitere fortführende Studien verifiziert werden, und das kognitiv anspruchsvolle Spiel Tetris wird nun bereits verwendet, um die Therapien der Betroffenen

Patient:innen zu unterstützen (James et al., 2015; Holmes et al. 2010; Kessler et al., 2020; Iyadurai et al., 2018; Lau-Zhu et al., 2017; Brühl et al., 2019; Butler et al., 2020; Hagenaars et al., 2017).

2.2 Zielsetzungen

Die folgende Arbeit ist eine weiterführende Studie auf der Basis einer Pilotstudie, die von Julius Grote im Jahre 2024 im Rahmen seiner Abschlussarbeit in der Arbeitsgruppe, in der auch diese Arbeit erstellt wurde, durchgeführt wurde. In dieser Pilotstudie wurde das Tetrix Paradigma erarbeitet und darin erstmalig vorgestellt. Grund dieser erweiternden Studie ist es, die bereits festgestellten Aktivitätsmuster hinsichtlich einer umfassenderen Stichprobengröße zu replizieren, zu verifizieren und zu verfeinern und damit resultierend ein allgemeines Tetris Netzwerk darzustellen, welches ausschließlich die Aktivität isolierter kognitiver Verarbeitungsprozesse im Gehirn zeigt. Aus diesem Grund werden innerhalb des Paradigmas gezielt nebensächliche, aber unumgängliche Verarbeitungsprozesse detektiert und diese in Kontrollkonditionen einzeln gefordert, um im Laufe der Verarbeitung isoliert betrachtet werden zu können.

Bei dieser Arbeit handelt es sich um einen Subteil der größeren Studie mit dem Titel „Neuronale Mechanismen mentaler Rotation bei Menschen mit Traumafolgestörungen“, bei welcher nachfolgend der klinische Aspekt, durch eine zweite Gruppe von Proband:innen, mit einer Erkrankung an PTBS, gegeben wird. Die Ergebnisse dieser beiden Gruppen werden anschließend miteinander verglichen. Dabei liegt der Augenmerk auch auf der Gehirnaktivierung und der Feststellung, ob und inwiefern, welche Effekte das Paradigma auf die psychische Erkrankung bewirken kann und ob diese Methode zuzüglich der klinischen Therapie eine gute Behandlungsmöglichkeit sein könnte.

Ein weiterer Schwerpunkt der hier beschriebenen Arbeit wird es sein, festzustellen, ob die Erfahrungen bzw. die Spielleistung der gesunden Proband:innen die Aktivitätsmuster des Tetris Verarbeitungsnetzwerkes beeinflussen können, was die Darstellung des Netzwerkes und die klinische Anwendung ebenfalls prägen würde.

2.3 Erwartete Kognitive Funktionen

In den Anfängen dieser Studie wurde die Frage thematisiert, in welchen Gehirnarealen, auf Grund der Aufgabenstellung, Aktivierungen erwartet werden können.

Das daraus resultierende erwartete Aktivitätsmuster basiert auf Gehirnnetzwerken, dessen kognitive Funktionen an der Umsetzung des visuellen Inputs zu geplanten und strategischen Bewegungen der Tetriminos im Spielfeld beteiligt sein könnten.

Der gesamte mentale interaktive Verarbeitungsprozess von der visuellen Informationsaufnahme über die Speicherung dieser Informationen, die mentalen Rotations- und Bewegungsprozesse, der Planung der Bewegung bis hin zur Ausführung dieser, setzt die Beteiligung vieler verschiedener Netzwerke und Gehirnareale voraus (Grote, 2024).

Die folgenden Verarbeitungsnetzwerke bilden die kognitiven Ansprüche des Tetrix Paradigmas und die davon ausgehende Verarbeitung der Daten weitestgehend ab und sind aus diesem Grund unerlässlich für die Aufstellung der Hypothesenareale.

2.3.1 Visuell-räumliches Arbeitsgedächtnis

„Visuospatial Working Memory“ (VSWM), oder zu Deutsch das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis übernimmt einen wichtigen kognitiven Prozess: die aktive Beibehaltung von bestimmten Informationen über einen gewissen Zeitraum hinweg. Zu dieser Zeit können, die zuvor abgespeicherten, räumlichen Informationen visueller Objekte, aktiv genutzt werden, um nachfolgende Bewegungen zu koordinieren. Eine dem Netzwerk untergeordnete Struktur, der visuell-räumliche Skizzenblock, enthält diese Informationen (Van Asselen et al., 2006). Hinsichtlich dem Ziel der Studie, hat dieses Netzwerk einen sehr hohen Stellenwert, da der visuell-räumliche Skizzenblock die bisherigen Positionen der schon gesetzten Tetriminos, sowie auch die Informationen über die nachfolgenden Tetriminos, enthalten könnte. Dementsprechend ist es kaum verwunderlich, dass Lau-Zhu et al. (2017); Agren et al. (2023) und Holmes et al. (2009) das Arbeitsgedächtnis als zentralste kognitive Funktion beim Spielen von Tetris nennen.

Dem VSWM scheint ein breites Netzwerk von Gehirnarealen zu unterstehen. Es zeigen sich Aktivierungen des posterioren Parietallappens (PPC), des dorsolateralen präfrontalen Kortex (dPFC) und des medialen Temporallappens, genauer gesagt des Hippocampus bei Aufgabenstellungen, die den räumlichen Abschnitt des VSWM thematisieren (Van Asselen et al., 2006). Dabei wird der laterale PFC in zwei separate Bereiche unterteilt. Wie vorherige Studien gezeigt haben, übernehmen die Teilbereiche unterschiedliche Aufgaben. Während der ventrale Bereich des lateralen PFC zur aktiven Beibehaltung der Objektinformationen wichtig zu sein scheint, übernimmt der dorsale Bereich des lateralen PFC augenscheinlich einen Teil der räumlichen Verarbeitung (Van Asselen et al., 2006). Hinsichtlich Curtis & Sprague (2021) ist der wichtigste Teil des PPCs das lateral intraparietale Areal (LIP). Des Weiteren konnten Aktivitäten im medial frontalen Kortex (MFC) beobachtet werden, welche wahrscheinlich die exekutiven Funktionen bei der langanhaltenden Aktivierung unterstützen. Ein weiterer Bereich des frontalen Kortex, welcher ebenfalls eine Rolle im Arbeitsgedächtnis spielt, sind die sogenannten „Frontal Eye Fields“ (FEF), welche, ebenso wie LIP, normalerweise für die Änderungen der Aufmerksamkeit und der Augenbewegungen zuständig sind (vgl. Kapitel 2.3.2). Außerdem werden die Bereiche des cingulären Kortex genannt, sowie der frühe visuell sensorischen Kortex, wobei insbesondere die Areale V1-V3 von Bedeutung sind (Curtis & Sprague, 2021).

Zusammenfassend kann man also davon ausgehen, dass alle Bereiche des VSWM für unterschiedliche kognitive Funktionen verantwortlich sind. Der visuelle Kortex, vor allem die frühen visuellen Areale, scheinen dabei die Aufgabe der Stimulus-Selektion zu übernehmen. Dem gegenüber steht der präfrontale Kortex, der die Manipulation der Objektinformationen koordiniert und unterstützt (Curtis & Sprague, 2021).

Eine wichtige Eigenschaft, die jedoch mehrere Areale gemein haben, ist die persistierende, also länger anhaltende Aktivität (Curtis & Sprague, 2021). Dies lässt das Fazit zu, dass das Arbeitsgedächtnis nur eine bestimmte Menge an Informationen beinhalten kann und dies auch nur über einen begrenzten Zeitraum (Curtis & Sprague, 2021; Van Asselen et al., 2006; Kessler et al., 2020; Holmes et al., 2010).

Wie bereits beschrieben setzt das Experiment darauf, dass die Rekonsolidierungsprozesse der traumatischen Erfahrungen durch Tetris unterbrochen werden und daher die Erinnerung so modifiziert werden kann, dass die intrusiven Erinnerungen an das Trauma geringer werden. Die Unterbrechung der Rekonsolidierung wird dabei so erklärt, dass die beschränkten Kapazitäten des VSWM durch die kognitive Leistung, die Tetris erfordert, weitestgehend ausgelastet wird (Holmes et al., 2009; Kessler et al., 2020; James et al., 2015).

2.3.2 Aufmerksamkeitsnetzwerk

Eng mit dem VSWM verbunden arbeitet das Aufmerksamkeitsnetzwerk. Insgesamt drei unterschiedliche Subnetzwerke des Aufmerksamkeitsnetzwerks arbeiten als allgemeines Netzwerk zusammen, um neue sensorische Informationen oder bereits abgespeicherte Erinnerungen zu verarbeiten (Posner & Petersen, 1990).

Neben diesen Subnetzwerken wurden im Laufe der Jahre drei große Problematiken erkannt, zum einen das Problem der Kapazität, denn die Sinnessysteme können viel mehr sensorische Informationen aufnehmen als hinterher verarbeitet werden können. Ein Mechanismus muss demnach im Umkehrschluss dafür sorgen, dass im Vorfeld eine selektive Auswahl getroffen wird, wo die Aufmerksamkeit liegen soll. Auf Grund von Selektionskriterien werden die verschiedenen Signale spezifiziert, um anschließend ein neuronales Kriterium berechnen zu können, welches die Relevanz der eingehenden Signale vergleicht und kategorisiert. Ist die reziproke Entscheidung, welches Objekt oder welcher Ort fixiert wird, getroffen, muss die Aufmerksamkeit außerdem kontrollierbar sein. Wichtige Umweltreize müssen die sofortige Aufmerksamkeit bekommen können oder aber auch bewusste Entscheidungen müssen dazu führen können, das Aufmerksamkeitsziel zu wechseln (Ptak, 2012).

Die Lösung dieser Problematiken findet man in der Erstellung von Prioritätskarten, welche durch verschiedene Kodierungswege entstehen können. Wichtig ist hierbei besonders die Integration von „Bottom-up“ und „Top-down“ Angaben. Zur Einstufung der Informationen werden zum einen Informationen über wahrnehmungsbezogene Merkmale der Stimuli herangezogen, zum anderen werden jedoch auch die Erwartungen und Handlungsziele mit integriert, sodass eine Prioritätskarte erstellt werden kann, die konvergente Angaben verschiedener Hirnregionen mit einbeziehen kann. Besonders wichtig zur Erstellung von Prioritätskarten ist der dorsale frontoparietale Kortex bzw. das frontoparietale Aufmerksamkeitsnetzwerk, bestehend aus mehreren Bereichen im PPC, im prämotorischen Kortex (PMC) und im PFC. Speziell der intraparietale Sulcus (IPS) und die FEF enthalten Bereiche, deren Reaktionsmerkmale für die Prioritätskodierung prägnant sind. Dies manifestiert sich durch Studien, die Aktivierungen in diesen Arealen, auf Grund von Vorbereitungen der Proband:innen auf freiwillige Aufmerksamkeitswechsel, zeigten (Ptak, 2012).

Die Überschneidung der FEF-Aktivität im VSWM und dem Aufmerksamkeitsnetzwerks verdeutlicht die funktionale Überlappung der einzelnen Netzwerke.

2.3.3 Mentale Vorstellung

Die mentale Vorstellung ist funktionell ebenfalls eng mit dem VSWM und dem Aufmerksamkeitsnetzwerk verknüpft (Pearson, 2019; Pearson et al. 2015; Harrison & Tong, 2009). Definiert wird die Thematik durch die Darstellung eines eingegangenen sensorischen Reizes, ohne die direkte Präsenz dieses Reizes erneut vorauszusetzen. Dabei ist es gleichgültig um welche Art von sensorischen Reizen es sich handelt. Das Hauptaugenmerk dieser Studie liegt jedoch auf der Präsentation visueller Reize, in Form von Tetris Blöcken, die sich gemerkt und einer mentalen Rotation ausgesetzt werden müssen. Die nicht mehr im Blickfeld liegenden Steine, wie beispielsweise die Vorscheublöcke, müssen demnach aktiv im Arbeitsgedächtnis gehalten werden, wodurch die Kapazität des visuellen Arbeitsgedächtnisses für andere Verarbeitungen verringert wird (Pearson et al., 2015; Harrison & Tong, 2009).

Die mentale Vorstellung spielt eine Kernrolle für sehr viele unterschiedliche psychische Krankheitsbilder. Sei es Depressionen, Schizophrenie oder PTBS, in allen Krankheitsbildern werden mentale Vorstellungen manipuliert oder verzerrt. Ganz besonders hervorheben möchten wir hier die unfreiwillige Rekonsolidierung von traumatischen Erinnerungen in Form von mentalen Bildern, wie beispielsweise Flashbacks oder Alpträume. Diese können, wie bereits beschrieben, durch sogenannte „Trigger“ ausgelöst werden, die wiederum durch verschiedene sensorischen Informationen ausgelöst werden können. Dabei können nicht nur ähnliche Situationen die erneute mentale Präsenz des Traumas erzeugen, sondern es können alle sensorischen Reize (Pearson et al., 2015).

Anatomisch betrachtet, basiert der Mechanismus der mentalen Vorstellung auf mehreren weitreichenden Gehirnarealen. Es handelt sich vermutlich um einen Top-Down Mechanismus, der sich über Areale mehrere Gehirnlappen zieht (Pearson et al., 2015). Dabei übernehmen die frontalen Gehirnareale bei diesem Mechanismus eine kognitive Kontrollfunktion (Ganis et al., 2004). Neben den frontalen Arealen zeigten mehrere Studien außerdem Aktivierungen in den Bereichen des Parietal-, Temporal- und des Okzipitallappens (Pearson et al., 2015; Harrison & Tong, 2009; Ganis et al., 2004).

Im Laufe der Zeit konnten auch diese Bereiche weiter eingegrenzt werden, sodass Pearson (2019) ein Netzwerk darstellen konnte, welches aus dem dorsolateral präfrontalen Kortex, dem hinteren parietalen Kortex, dem Precuneus (PCN) und dem okzipitalen Kortex besteht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Pearson et al. schon 2015 eine „gradierte, systemweite Aktivierung im visuellen Kortex“ beschrieb und in diesem Kontext auch eine hierarchische Aufteilung der Bereiche thematisierte. Die Bereiche, welche hochgradige kognitive Funktionen, wie die Änderung von visuellen Szenen hinsichtlich ihres semantischen Inhalts, abdecken, befinden sich im ventralen Temporallappen, während sich die frühen visuellen Bereiche, die teilweise schon im Kontext zum VSWM erklärt wurden, mit visuellen Details auseinandersetzen und im Okzipitallappen verankert sind (Pearson et al., 2015).

2.3.4 Planung von Bewegungsprozessen

Bewegungsprozesse gestalten unseren Tagesablauf. Jede einzelne Hand-, oder auch nur Fingerbewegung muss vorher genau geplant werden, da wir sonst das Glas Wasser nicht so greifen können wie gewünscht oder die Bremse vom Fahrrad nicht schnell genug erreichen, um Schlimmeres zu verhindern. Über den ganzen Tag strengt sich unser Gehirn also an die richtigen Vorbereitungen für unsere gewünschten Handlungen zu treffen. Durch diese ständige Aktivierung des Netzwerkes, gestaltet es sich schwer das Planungsnetzwerk im Gesamten abzubilden. Außerdem stellt es, durch die Vielzahl der einzelnen Unteraufgaben, eins der breit gefächerten Netzwerke dar (Mattar & Lengyel, 2022.)

Um eine Bewegung erfolgreich und zielgerichtet ausführen zu können müssen eine Vielzahl an neuronalen Arealen arbeiten. Zunächst muss die Position im Raum durch den Hippocampus festgestellt und eingeordnet werden. Dann müssen, bezogen auf diese Studie, die einzelnen Tetriminos visuell aufgenommen werden, ebenso wie die somatosensorischen Informationen, da sich die Tetriminos, mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit im Spielfeld bewegen und daher die Umstände ebenfalls kontinuierlich geändert werden. Diese Informationen werden anschließend durch den Thalamus an den visuellen Kortex und den somatosensorischen Kortex weitergeleitet, um danach im posterior parietalen Kortex verarbeitet zu werden (Bolognini & Maravita, 2007; Svoboda & Li, 2018). Im Endeffekt müssen auch noch die motorsensorischen Areale des Kortex aktiviert werden, um die geplante Bewegung durch zeitlich genau abgestimmte Muskelkontraktionen ausführen zu können. Auf

neuronaler Ebene betrachtet, ist es demnach eine der problematischsten zu fassenden Abläufe, da die Bewegungsplanung so viele kleinschrittige Aktivierungen bedingt (Mattar & Lengyel, 2022).

Aus diesem Grund wird die Planung als grundlegender Baustein intelligenten Verhaltens gewertet. Auch in der Zeit des technischen Fortschrittes und der Entwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) sind Bewegungsplanungen besonders wichtig, da eine Anpassung an sich ändernde Umstände bei Menschen als auch KI vorausgesetzt werden soll. Definiert wird der Prozess dabei als „Auswahl einer Handlung oder einer Sequenz von Handlungen im Hinblick auf die Wünschbarkeit der Ergebnisse“ (Mattar & Lengyel, 2022).

Basierend auf Läsionsstudien und den kognitiven Funktionen, für welche die folgenden Gehirnareale stehen, wurde 2022 ein Planungskonzept von Mattar und Lengyel vorgestellt. In diesem beziehen sie sich auf die Areale des PFC, insbesondere auf den orbitofrontalen Kortex (OFC), das dorsomedialen Striatum, eine tieferliegenden Struktur, die zu den Basalganglien zählt, und den Hippocampus und seinen umliegenden temporalmedialen Arealen.

Besonders die Verbindung des PFC und des Hippocampus ist wichtig, da der Hippocampus ein Teil des episodischen Gedächtnisses ist und die Areale in Zusammenarbeit dafür sorgen, dass räumliche sensorische Informationen im VSWM aktiv gehalten werden können, um auf dieser Grundlage Bewegungsentscheidungen treffen zu können (Mattar & Lengyel, 2022; Eichenbaum, 2017). Dabei scheint die Aktivität des PFC mit der Schwierigkeit der Aufgabe korreliert zu sein (Mattar & Lengyel, 2022).

Lange Zeit war nicht klar, welche Funktion der Hippocampus genau übernimmt, in einer Studie des letzten Jahres konnte jedoch gezeigt werden, dass der Hippocampus in sogenannten „Rollouts“ viele verschiedene mögliche Bewegungs- bzw. Handlungsabläufe durch geht und mit dem PFC zusammen eine Entscheidung hinsichtlich des Handlungsziel trifft (Jensen et al., 2024).

Um die geplante Bewegung dann auszuführen, sind vor allem die prämotorischen Areale und das supplementäre motorische Areal gefragt. Neben diesen Aktivierungen sind jedoch zusätzlich der Okzipital- und der Parietallappen beteiligt (Agren et al., 2023; Schneider & Fink, 2007). Diese Areale sind vermutlich die Verknüpfung zwischen den sensorischen Informationen und der darauf basierenden späteren Bewegungsplanung (Schneider & Fink, 2007).

2.4 Hypothesenareale

Ziel dieser Studie ist die Darstellung des Tetris-Netzwerks und seiner Verarbeitungswege. Dafür werden vor allem in den, in den letzten Kapiteln vorgestellten, Netzwerken Aktivitäten erwartet. Mit fMRT werden Daten von Proband:innen gesammelt und mit einem Augenmerk auf die Zielfunktionen ausgewertet, um feststellen zu können, ob diese Gehirnareale, wie vermutet, eine signifikant höhere Aktivität zeigen als die festgelegten Kontrollbedingungen (vgl. Kapitel 3.2.2)

In der Aufstellung des „Tetrix“ Paradigmas wurden dieselben Areale verwendet. Dies beruht vor allem auf dem Grund der Replizierung der Ergebnisse, ohne weitere Anpassungen am Paradigma vorzunehmen. Deswegen sind auch hier die ausgewählten Hypothesenareale wie folgt (Grote, 2024).

1. Der Präfrontale Cortex (PFC) – gezielte Betrachtung des Gyrus frontalis inferior (IFG), des medial frontalen Kortex, des orbitofrontalen Kortex (OFG) und den FEF.

Diese Areale könnten im Grunde alle kognitiven Funktionen unterstützen. Besonders die Verbindung zwischen den präfrontalen Arealen und der Planung von Bewegungsabläufen, in Zusammenarbeit mit dem VSWM ist besonders hervorzuheben (Curtis & Sprague, 2021; Dores et al., 2017; Kamiński et al., 2017; Majdandzic et al., 2007; Mattar & Lengyel, 2022; Pearson, 2019; Petersen & Posner, 2012; Rahm et al., 2014).

2. Weiterhin werden hinsichtlich der Bewegungsplanung das Kleinhirn und der prämotorische Kortex als Zielareale festgelegt. Diese sind insbesondere für die Koordination der Bewegungen und die sensorische Weiterverarbeitung der Daten zuständig (Agren et al., 2023; Bennet & Reiner, 2022; Inagaki et al., 2022; Mattar & Lengyel, 2022; Rietschel et al., 2012; Wolpert et al., 1998; Wong et al., 2015).
3. Der Cinguläre Cortex ist im Allgemeinen mit dem Aufmerksamkeitsnetzwerk verknüpft, wodurch diese Struktur auch hier ein Zielareal bildet (Curtis & Sprague, 2021; Petersen & Posner, 2012; Rahm et al., 2014).
4. Auch der parietale Kortex vertritt viele Funktionen – besonders der intraparietale Sulcus ist hier von Interesse, da er mit der Verarbeitung und der Enkodierung einkommender sensorischer Informationen zu tun hat und vor allem der posteriore parietale Kortex die Verarbeitung der visuellen Inputs übernimmt (Curtis & Sprague, 2021; Iacoboni, 2006; Inagaki et al., 2022; Rahm et al., 2014; Rietschel et al., 2012; Wong et al., 2015).
5. Das letzte Hypothesenareal stellt der Hippocampus dar, der durch seine Verknüpfung mit dem räumlichen Arbeitsgedächtnis ebenfalls mehrere kognitive Funktionen erfüllen könnte (Curtis & Sprague, 2021; Daume et al., 2024; Hallenbeck et al., 2021; Pearson, 2019).

Um trotz der festgelegten Hypothesenareale keine eventuell anderen signifikanten Aktivitätsareale auszuschließen, werden funktionelle Aufnahmen des ganzen Gehirns gemacht. Denn es könnte durchaus möglich sein, dass weitere Areale zum Tetris Netzwerk gehören, diese jedoch durch die kleinere Stichprobengröße in der Pilotstudie keine signifikanten Aktivitäten zeigten.

Einen weiteren Vorteil haben die funktionellen Scans des gesamten Gehirns gegenüber der Fragestellung, ob und inwiefern die unterschiedlichen Spielerfahrungen einen Einfluss auf das Aktivitätsmuster haben. Möglich wäre eine Beeinflussung in der Stärke der Aktivierungen, da davon auszugehen ist, dass erfahrene Spieler die sensorische Konfrontation mit den Spielanforderungen bereits kennen. Dementsprechend geht man im Vergleich von erfahrenen mit unerfahrenen Spieler:innen bei gleichen Spielbedingungen von einem schwächeren oder einem anderen Aktivierungsmuster der erfahreneren Spieler:innen aus.

3 Methoden

In diesem Abschnitt wird zum einen eine allgemeine Einführung in die Methodik der fMRT angestrebt, in welcher die Themen physikalischer Grundlagen der fMRT, das BOLD-Signal, die Hämodynamische Antwort (3), sowie verschiedene experimentelle Designs (3.1) behandelt werden. Zum anderen wird das Experiment der Studie beschrieben (3.2), dabei werden Unterpunkte wie Proband:innen-Rekrutierung und -Auswahl (3.2.1), die eingebauten Spielbedingungen (3.2.2), der allgemeine Ablauf der Messung (3.2.3) sowie die aufgenommenen Daten, wie Fragebögendaten (3.2.4) und Verhaltensdaten (3.2.5) und die MRT-Daten-Akquisition (3.2.6) thematisiert. Außerdem wird der Vorgang der MRT-Daten-Analyse ausführlich erklärt (3.3), wobei die einzelnen Analyseschritte: die

Vorverarbeitung (3.3.1), die statistische Modellierung (3.3.2), die statistische Inferenz (3.3.3) und die parametrische Modulation mit zusätzlichen Regressoren (3.3.4), einzeln vorgestellt werden.

Um die Aktivierungen der erwarteten Gehirnareale überprüfen zu können, wird die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) angewendet. Die funktionelle Magnetresonanztomographie basiert auf dem MRT, welches wiederum auf der Grundlage des Kernspins basiert. Nach dieser Theorie gilt: Wasserstoffatome liegen ohne Magnetfeld in alle Richtungen ausgerichtet vor. Werden diese Atome nun aber einem Magnetfeld ausgesetzt, richten sie sich parallel oder seltener antiparallel zu diesem Magnetfeld aus. Die Magnetisierung im MRT wird durch einen Sender gesteuert, welcher temporär Radiowellen aussendet, die die Magnetisierung verändern. Sobald der Sender keine Radiowellen mehr ausstrahlt, kehrt die ursprüngliche Magnetisierung zurück und es werden Radiowellen zurückgestrahlt, die von einem eingebauten Empfänger aufgenommen werden. Unterschiedlich abgestrahlte Radiowellen lassen dann Rückschlüsse auf die Abgrenzung von unterschiedlichen Geweben zu und es entsteht ein Bild mit helleren und dunkleren Gewebestücken.

Diese seit circa 1992 verwendete nicht-invasive Methodik erlaubt es, Gewebestrukturen voneinander abgrenzen zu können und durch den „Blood-oxygen-level-dependency“, kurz BOLD-Effekt, den zerebralen Blutfluss dafür zu nutzen aktive Gehirnareale darzustellen. Areale werden zum Beispiel durch die Verarbeitung von Stimuli aktiviert. Dem BOLD-Effekt liegt die Verbundenheit von Hämoglobin und Sauerstoff zu Grunde, ist der Sauerstoff über das Hämoglobin-Molekül mit den Erythrozyten verbunden, nennt man den Zustand Oxyhämoglobin. Der Anteil von oxyhämoglobinem Blut steigt nach neuronaler Aktivität in der jeweiligen Region an, sodass sich die magnetischen Eigenschaften, die das diamagnetische oxyhämoglobine Blut gegenüber dem paramagnetischen deoxyhämoglobinem Blut hat, als Verstärkung des Magnetresonanz (MR) – Signals äußern. Die aktiven Gehirnbereiche werden nach dieser Theorie, auf Grund der biologischen Grundlagen, mit mehr Blut und mehr Sauerstoff versorgt, sodass es zu einem temporären lokalen Anstieg des Blutsauerstoffs kommt, der dann anschließend sekundär als Signal ausgewertet werden kann (Poldrack et. al., 2011).

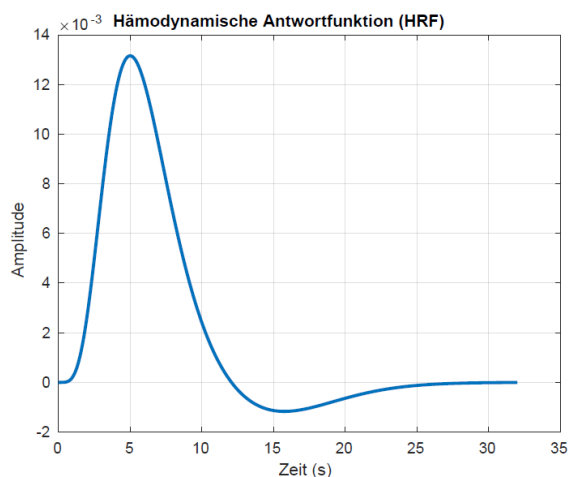


Abbildung 1: Darstellung der kanonischen hämodynamischen Antwort (HRF). Beispielhafte Modellierung der BOLD-Antwort nach neuronaler Aktivität. (Erstellt mit SPM12).

Der Verlauf des BOLD-Effekts über die Zeit des Experiments hinweg wird hämodynamische Antwort genannt (Kircher & Gauggel, 2008). Genauer gesagt, beschreibt die hämodynamische Antwort den Anstieg des Blutflusses, der auf neuronale Aktivität folgt. Dabei wird erstaunlicherweise mehr sauerstoffreiches Blut zu dem aktivierten Gehirnareal transportiert als nötig wäre um die genutzte Energie, die durch die Aktivierung verbraucht wurde, wieder zu ersetzen (Poldrack et. al., 2011).

(vgl. Abb.1). Um genauer zu wissen, welche Gehirnareale als Nebenareale aktiviert werden, z.B. durch das Drücken von Tasten, um gestellte Fragen zu beantworten oder Einschätzungen über gezeigte Bilder zu geben, können im Design Kontrollbedingungen eingebaut werden. Diese Kontrollbedingungen zielen auf einzelne Handlungen ab, die wichtig sind, um die Studien durchzuführen, aber die Ergebnisse nicht verfälschen sollen. Diese Kontrollaktivierungen können nach dem Abgleich mit der

Um Rückschlüsse auf die Aktivierung bestimmter Gehirnareale durch einzelne Aufgaben ziehen zu können, wird die hämodynamische Antwort im Kontext des experimentellen Designs analysiert

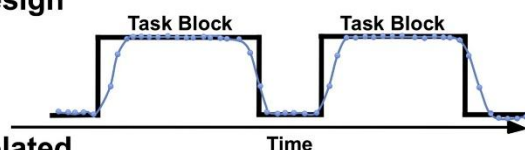
hämodynamischen Antwort aus der Aktivierungen der Hauptaufgabe abgezogen werden (Friston et al., 1999).

Neben dem fMRT werden außerdem Methoden wie Positronen-Emissions-Tomographie (PET), Magnetenzephalographie (MEG) oder Single-photon-emission-computertomography (SPECT) als Untersuchungsinstrumente in der Psychiatrie und Neurologie verwendet (Schneider & Fink, 2007). Wie jede dieser Methoden hat auch die funktionelle Magnetresonanztomographie Vor- und Nachteile. Das fMRT gilt allgemein als eine Methodik mit sehr guter räumlicher Auflösung, welche auch die tieferliegenden Hirnstrukturen abbilden kann. Somit ist das fMRT die am häufigsten verwendete Methodik in der Neurowissenschaft (Poldrack et. al., 2011). Die PET basiert auf radioaktiven Tracersubstanzen, welche sich als Marker an wichtige Moleküle wie beispielsweise Wasser und Glukose binden um dadurch Stoffwechselprozesse und Blutflüsse im Gehirn nachvollziehen und abbilden zu können. Bereits Posner et al. zeigte 1988, dass das deutlich frühere erfundene PET zum ersten Mal Lokalisierungen von mentalen Funktionen ermöglichte. Allerdings ist diese Methode immer mit radioaktiven Materialien verbunden und damit eine invasive Technik, die mit Sicherheitsrisiken verbunden ist. Anders als die PET kann die fMRT eine große Bandbreite an Personen abdecken, da die nicht-invasive Technik auch bei Kindern oder bereits bei Säuglingen verwendet werden kann. Außerdem hat die fMRT-Methodik mit der besseren räumlichen Auflösung auch technische Vorteile der PET gegenüber. Die MEG währenddessen misst neuromagnetische Felder, die durch Hirnströme ausgelöst, hervorgerufen werden. Dabei sticht diese Methodik ganz klar durch ihre besonders gute zeitliche Auflösung hervor, verglichen mit der fMRT, die eine relativ gute zeitliche Auflösung bietet, hat die MEG eine sehr schlechte räumliche Auflösung (Poldrack et al. 2011, Schneider & Fink, 2007). Aber auch die fMRT ist nicht perfekt, Bewegungsstörungen verunreinigen Daten und Gewebefläche in der Nähe von beispielsweise den Augen oder Gehörgängen, welche nicht abbildbar sind (Provins et. al., 2023).

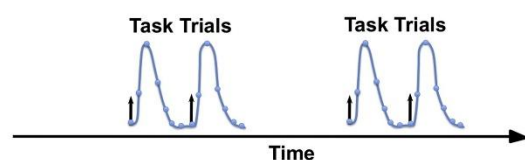
3.1 Experimentelles Design

Nicht nur in der Methodik der Datenbeschaffung gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, sondern auch im Aufbau des Experiments. Je nach der Zielsetzung des Experiments wird in der Versuchsplanung

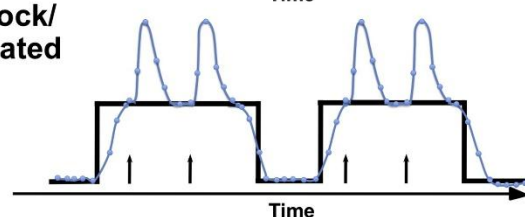
A) Block Design



B) Event-Related



C) Mixed Block/Event-Related



festgelegt, welches Design am besten geeignet ist (vgl. Abb. 2).

In den Anfängen des fMRTs wurden Designs, sowie analytische Ansätze von den Blutflussmessungen der PET-Methodik genutzt und umgewandelt. Dabei wurden bei der Analyse des PETs die Daten einer Person von verschiedenen Messungen bei der Ausführung derselben Aufgabe mit Hilfe eines einfachen t-Tests ausgewertet. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den Bildern von Ruhephasen verglichen. Inspiriert von diesem Vorgehen wurde schon früh das Block Design für die fMRT etabliert (Poldrack et al., 2011). Dieses

Abbildung 2: Überblick über die verschiedenen Experimentellen Designs (Petersen & Dubis, 2012)

zeichnet sich durch Blöcke von Stimuli aus, die zeitlich abwechselnd aufeinander folgen. Man unterscheidet bei diesen Blöcken in Aktivierungsphasen [A] und Kontrollphasen [K]. In der Aktivierungsphase zeigt man ein Bild oder eine Aufgabe, welche die zu untersuchende Funktionen gut darstellen kann. In der Kontrollphase wird beispielsweise auf ein Fixationskreuz geschaut. Durch diese Art des Designs lassen sich optimal Unterschiede zwischen Bedingungen darstellen (Poldrack et al. 2011). Jedoch stieß man mit dem Blockdesign schnell auf schwerwiegende Nachteile, wie die Adaption an die präsentierten Reize oder die Undurchführbarkeit von Analysen hinsichtlich einzelner Blocks, wodurch auch keine einzelnen, z.B. fehlerbehaftete, Blocks aus der Analyse herausgenommen werden konnten (Pollmann & Noesselt, 2023).

Da der Fokus dieser Studie jedoch vor allem auf der Präsentation des Spiels Tetris und den Kontrollbedingungen liegt, wird hier ein klassisches Blockdesign gewählt. Abwechselnd werden demnach Aktivierungs- und Kontrollphasen in festen Zeitblöcken präsentiert, sodass ein klarer Vergleich zwischen den Aktivierungen zu erkennen ist (vgl. Abb.2).

3.2 Aufbau der Studie

In dieser Arbeit handelt es sich um ein Teilprojekt der Hauptstudie „Neurale Mechanismen mentaler Rotation bei Menschen mit Traumafolgestörungen“ der Philipps Universität Marburg in Zusammenarbeit mit dem Klinikum für Psychosomatische Medizin und Psychotherapie in Fulda. Daher konzentriert sich diese Arbeit ausschließlich auf die Darstellung neuronaler Aktivitäten mit Hilfe des fMRTs bei der gesunden Kontrollgruppe.

3.2.1 Proband:innen

Angestrebt war eine Stichprobengröße von circa. 30-35 Personen. Idealerweise sollte sich das Alter der Proband:innen in einer Altersspanne von 19-44 Jahren bewegen und die biologischen Geschlechter sollten pro Gruppe nahezu ausgeglichen sein. Außerdem wurden gute Deutschkenntnisse vorausgesetzt. Ausschlusskriterien in dieser Studie umfassten psychiatrische oder neurologische Vorerkrankungen und die Einnahme entsprechender Medikamente; Metallteile oder elektrische Geräte im Körper, die nicht entfernt werden konnten (Implantate, Herzschrittmacher, Piercings, Zahnsperre etc.); eine Spirale; eine Schwangerschaft; kürzlich gestochenes Tattoo (mussten mind. 3 Monate oder älter sein); ein Retainer am Oberkiefer (ein Retainer am Unterkiefer war in Ordnung) oder eine Sehschwäche von mehr als +/- 6 Dioptrien.

Es wurden insgesamt in der Kontrollgruppe 31 Proband:innen gemessen. Diese wurden durch den mündlichen sowie schriftlichen Weg über die Studie und die Probandensuche informiert. Dies geschah zum einen über mündliche Erzählungen in Bekanntenkreisen, Soziale Netzwerk, ausgelegte Flyer und zum anderen über den E-Mail-Verteiler der Universität für Studienanfragen.

Nach einer Prüfung der vorgegebenen Kriterien wurden 31 geeignete Proband:innen ausgewählt und Messungen durchgeführt (vgl. Anhang Abb.1). Bei der anschließenden Qualitätskontrolle blieben 30 Proband:innen ($m=14$, $w=16$) für weitere Analysen bestehen, denn auf Grund eines Messfehlers des MRTs musste ein:e Proband:in exkludiert werden. Der Altersdurchschnitt der bestehenden Kontrollgruppe liegt bei 28,5 Jahren mit einer Standardabweichung von ca. 6,9 Jahren.

Die Qualitätskontrolle bestand aus der Sichtung der funktionellen MRT-Daten dreier unabhängiger PrüferInnen mit der Hilfe einer MRIQC Pipeline (Esteban et al., 2017). Dabei wurden die, durch die Pipeline erstellten, visuellen Berichte und Qualitätsmetriken (QMs) für jede:n Proband:in von jeweils 2 Prüfer:innen auf einer Skala (Excluded, poor, acceptable, excellent) bewertet und diese Bewertungen der Prüfer:innen abgeglichen. Da bei den Daten einer Proband:in der obere Teil des Gehirns abgeschnitten war, konnten die Daten nicht mit den Gesamtkopfscans der anderen verglichen werden, wodurch die Daten nicht ausreichend auswertbar waren und demnach im Laufe dieser Studie nicht berücksichtigt werden konnten.

3.2.2 Spielbedingungen

Um im Endeffekt nur die Aktivitäten des Tetrisspiels abbilden zu können, mussten Kontrollbedingungen eingerichtet werden, dessen Aktivitätsmuster nach der Messung rausgerechnet wurden. Dafür wurden eine Motor-Kontrollbedingung (nur die Tasten der Responsebox drücken), eine Visuelle-Kontrollbedingung (computergesteuertes Tetris-Spielen betrachten) und eine Baseline-

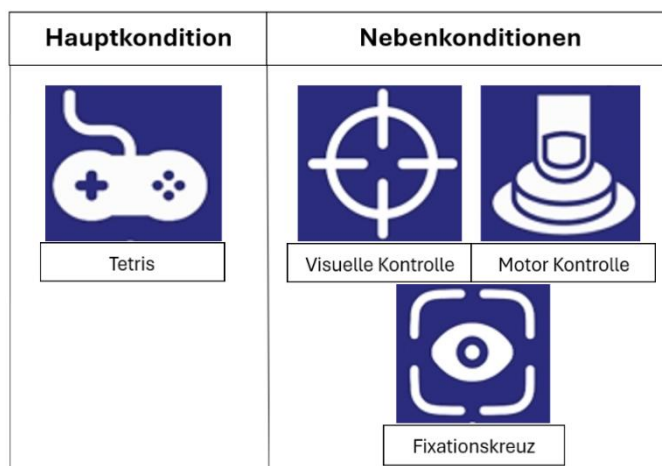


Abbildung 3: Darstellung der Zeichen einzelner Aufgaben in der fMRT Studie. (li. Hauptaufgabe Tetris spielen; re. die 3 Kontrollbedingungen Tetrispiel zuschauen, Tasten drücken und ein Kreuz fixieren.)

Kontrollbedingung (auf ein Fixierungskreuz schauen) eingebaut (vgl. Abb. 3). Wichtig ist zu beachten, dass diese Teilaufgaben des Spiels ebenfalls Gehirnareale aktivieren, die mit dem Tetrispielen assoziiert sind, aber eben nicht die Denkprozesse, die hinter der relevanten Verarbeitung des Spiels stehen. Um diese ungewollten Prozesse, wie mentale Imagination oder geplante Bewegungen, zu minimieren, wurde bei der visuellen Kontrolle darauf geachtet keine neuen Blöcke an der Seite zu zeigen und darauf, dass die Blöcke einfach durch das Spielfeld durchfallen und nicht aufeinandergestapelt werden.

Die Tetris Erfahrungen und das Können der Proband:innen wurde in den Pre-Trials (vgl. 3.2.3) getestet und durch die dort erreichten Punkte wurden die Proband:innen in, zu ihrem Spielstand passende, Level eingeteilt. Dahingehend wurde der Schwierigkeitsgrad des Spiels für jede:n Proband:innen individuell angepasst, damit alle Spieler:innen unter den gleichen Bedingungen gefordert wurden. Außerdem wurde dieses errechnete Level und die damit zusammenhängende Geschwindigkeit des Spiels konstant über das ganze Spiel beibehalten, um die Aktivitätswerte nicht durch erhöhten Stress und Zeitdruck zu verändern.

3.2.3 Ablauf der Messung

Die fMRT-Studie wurde in drei separate Phasen eingeteilt. Die erste Phase begann dabei mit dem Einholen der Verhaltensdaten in Form des Online-Fragebogens. Nach dem Ausfüllen des Fragebogens wurden die Proband:innen mit den Regeln und dem Spielablauf im MRT-Scanner instruiert und mit der

Responsebox in einer Testrunde, in der ihnen der Blick auf die zu nutzende Hand verwehrt wurde, bekannt gemacht. Diese Testrunde sollte bereits ein Gefühl dafür vermitteln, wie es ist die Tasten im MRT-Scanner zu drücken, ohne dabei die eigenen Finger sehen zu können. Danach erfolgte erst die Hauptphase im MRT-Scanner, welche jedoch ebenfalls erneut in zwei separate Phasen zu unterteilen war. Vor der Messung wurden die relevanten Prozesse gestartet und eine Überprüfung der Responsebox durchgeführt. Danach wurde der Ablauf von Tetrix und auch die Kontrollbedingungen mit Hilfe von Bildern und Instruktionen erklärt. Abschließend wurden drei Probeläufe, sogenannte Pre-Trials, ohne Datenverarbeitung gemacht, um die Proband:innen an die Situation zu gewöhnen und, um den Spielstandard der Proband:innen einschätzen zu können. Das Können wurde hinsichtlich der Pre-Trials ermittelt, um die Geschwindigkeit der folgenden Trials auf das Spiellevel der Proband:innen angleichen zu können (vgl. Kapitel 3.2.5).

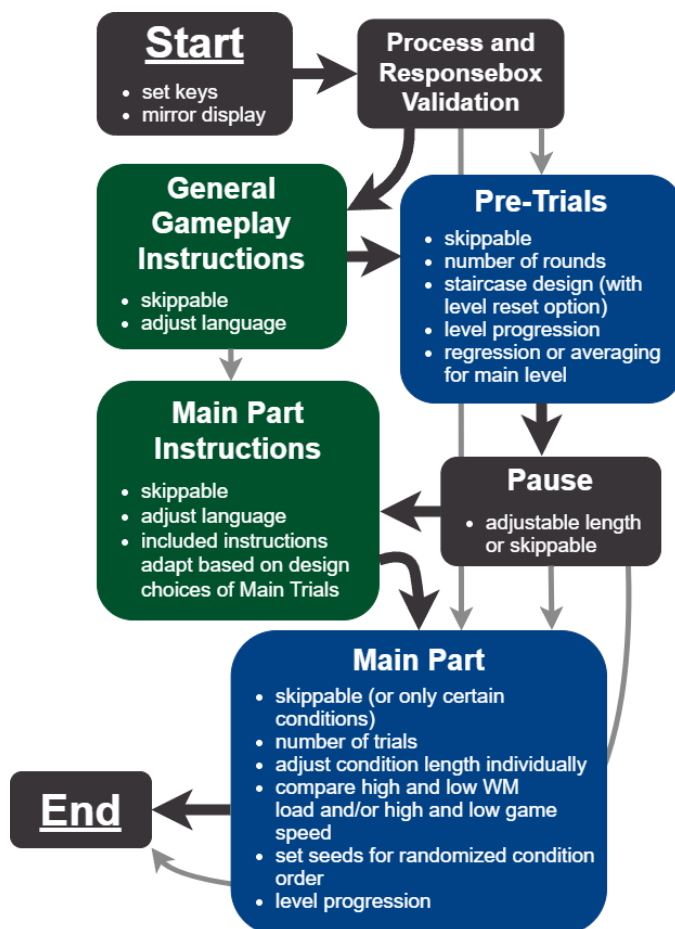


Abbildung 4: Übersicht über den Ablauf der Messung mit Hilfe des Paradigmas im MRT-Scanner. Graue Felder: Kernprogrammierungen (nicht herausnehmbar, Pause anpassbar), Grüne Felder: Instruktionen, Blaue Felder: Spielzeiten (nur bei Main Part eine MRT-Messung) Paradigma von Grote, J. (2024)

In unserem Experiment wurde eine spezielle Tetris Version genutzt, welche mit PsychoPy (PsychoPy, 2002) programmiert wurde. Dies machte die Nutzung des Paradigmas im MRT-Scanner möglich und erweiterte das Tetris Spiel auf vier unterschiedlichen Aufgaben. Die Komplexität der Aufgaben variierten dabei über die Aktivitätsbedingung, Tetris selbst zu spielen, und über drei Kontrollbedingungen (vgl. Kapitel 3.2.2) (Grote, 2024). Nachdem die verschiedenen Aufgaben und der Spielablauf erklärt wurden, begann dann der Start der Hauptteil Trials. Es wurden 21 Runden á 30 Sekunden per Block und zwei unterschiedliche Konditionen per Trial abgerufen. Jedes Trial begann immer zuerst mit 30 Sekunden, in denen die Proband:innen selbst Tetris spielen und danach folgte randomisiert eine Aufgabe, die eine der drei übrigen Kontrollbedingungen abdeckte. Die Proband:innen wurden beim Tetris spielen extra aufgefordert sich auf die nächsten Blöcke, welche an der Seite eingeblendet wurden, zu konzentrieren und sich zu fragen, wo der gerade aktuelle Stein sowie auch die Vorschausteine am besten zu platzieren wären. Während dem Hauptteil

der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie wurden neben dem anatomischen und den funktionellen Scans auch die erreichten Spielständen, die Rundenanzahl und die Rundenzeiten erfasst.

Zeitlich wurde pro Proband:in mit einer Stunde Scannerzeit gerechnet. Bei der Messung wurde Aktivität im gesamten Gehirn aufgenommen, sodass alle aktivierten Areale erfasst und im Folgenden mit der BOLD-Antwort abgeglichen werden konnten.

Zum Schluss sollten die Proband:innen in der dritten und letzten Phase der Studie ebenfalls wieder einen Online-Fragebogen ausfüllen (vgl. Kapitel 3.2.4). Diese behavioralen Daten, ebenso wie auch die von vor den Messungen, halfen später beim Abgleich mit den experimentellen Daten.

3.2.4 Fragebögendaten

Vor und nach der MRT-Messung, wurden die Proband:innen gebeten, Online-Fragebögen auszufüllen. Vor der Messung wurden die Proband:innen zu ihrem biologischen Geschlecht, ihrem Alter und ihren Erfahrungen mit Computerspielen, insbesondere mit dem Spiel Tetris, sowie ihrer Selbsteinschätzung zu ihrer Leistungsfähigkeit am Tag der Messung in Bezug auf Schlafqualität, Stimmung und Wohlbefinden befragt. Die Selbsteinschätzungsfragen sollten dabei auf einer Skala von 1-10 bewertet werden, wobei 1 keine Erfahrungen/ keine Leistungsfähigkeit und 10 tägliches Spielen/ hohe Leistungsfähigkeit darstellte.

Nach der Messung wurden die Proband:innen erneut gebeten, einen Online-Fragebogen auszufüllen, um die allgemeinen Spielschwierigkeiten, sowie speziell die Schwierigkeit, ohne Sicht auf die eigene Hand die Responsebox zu steuern, zu beurteilen. Auch hier wurde den Proband:innen wieder eine Skala von 1-10 als Antwortmöglichkeit geboten. Außerdem sollten die Proband:innen einen Einblick darüber geben, wie gut die Konzentration im Scanner war und wie gut sie sich auf das Experiment einlassen konnten. Des Weiteren wurde explizit nach dem Ausmaß gefragt, mit welchem sie die Vorschaublöcke auf der rechten Seite mit in ihre Spielstrategie eingebaut haben, da die Spieler:innen vorher angewiesen wurden explizit auf dieses Detail zu achten.

3.2.5 Verhaltensdaten

Wie bereits beschrieben wurde die Messung in 2 separate Segmente geteilt, zum einen die Pre-Trials und zum anderen den Hauptteil (vgl. Kapitel 3.2.3). In den Pre-Trials im MRT-Scanner wurde noch nicht gemessen, sondern zunächst der Ablauf geübt und Proberunden gespielt, sodass die Proband:innen in ihrem Können eingestuft und auf verschiedene Level aufgeteilt werden konnten. Aus diesen Einstufungen resultierten die Spielbedingungen wie die Geschwindigkeit der fallenden Tetriminos und die Punktevergabe im Hauptteil.

3.2.5.1 Level

Die Levelteilungen wurden durch die Pre-Trials Ergebnisse errechnet. Das Prinzip dahinter ist simpel. Die Proband:innen spielten 3 Runden jeweils so lange, bis sie verloren. Dies galt als Zeichen, dass das Level zu schwierig für die Person war. In den Runden starteten die Proband:innen bei Level 1 und spielten bis zu dem Level, indem die Tetriminos den oberen Rand des Spielfeldes berührten und damit das Spiel verloren war. Nachdem alle drei Trials gespielt waren, wurden die Endlevel der einzelnen jeweiligen Durchgänge nach der unten stehenden Formel miteinander verrechnet.

$$Level = \left(\frac{Endlevel\ Runde\ 1 + Endlevel\ Runde\ 2 + Endlevel\ Runde\ 3}{3} \right) * 0,75$$

3.2.5.2 Geschwindigkeit

Die Tetrix Level der Proband:innen legten fest, mit welcher Geschwindigkeit sich die Tetriminos im Spielfeld bewegten. Dafür wurde sich an der offiziellen Tetris Version orientiert und mit der unten stehenden Formel die Geschwindigkeit berechnet (Hard Drop Tetris Wiki, 2024). Das Ergebnis dieser Geschwindigkeitsberechnung gab in der Einheit Sekunden an, wie schnell sich die Tetriminos zwischen zwei Zeilen bewegten. Diese Geschwindigkeit blieb durchgehend über die gesamten Spiel-Trials konstant.

$$Geschwindigkeit = (0.8 - ((level - 1) * 0.007))^{(level-1)}$$

3.2.5.3 Punkte

Die in den einzelnen Pre-Trials erspielten Punkte wurden miteinander verrechnet. Punkte, die im ersten Trial erspielt wurden, wurden in die folgenden Runden mit einberechnet, sodass am Ende eine Gesamtsumme entstand. Dabei wurden für die Berechnung der Punkte, genau wie auch im Hauptteil, die untenstehenden Formeln verwendet. Hierbei musste beachtet werden, dass die Level nicht wie im Hauptteil konstant blieben, sondern die erzielten Punkte immer mit dem derzeitigen Level verrechnet werden mussten.

Während den Spiel Trials (Pre-Trials und Hauptteil) konnten und sollten die Proband:innen durch clevere Züge so viele Punkte wie möglich sammeln. Es gab Punkte für jede gefüllte Reihe des Spielfeldes und sogar Extrapunkte, wenn der Spielstein seine Endposition mit erhöhter Geschwindigkeit erreichte (basierend auf PLAYSTUDIOS INC, 2024). Dies konnte dadurch erreicht werden, dass der Stein händisch von den Proband:innen nach unten bewegt, also die Geschwindigkeit erhöht wurde. Die Punkte wurden außerdem mit der Schwierigkeit verrechnet, indem sie mit den Leveln multipliziert wurden. Die Spielstände wurden im Laufe der Spieltrials konstant gezeigt und über diese hinweg mit den vorherig erzielten Punkten bereits verrechnet, sodass am Ende des Hauptteils der Endpunktestand bereits feststand.

$$eine\ Reihe = 100\ Punkte * Level$$

$$zwei\ Reihen = 300\ Punkte * Level$$

$$drei\ Reihen = 500\ Punkte * Level$$

$$vier\ Reihen = 800\ Punkte * Level$$

$$Extrapunkt = 1\ Punkt * Level$$

3.2.5.4 Abhängigkeit der Variablen

Der Hauptgrund, warum die Proband:innen im Vorhinein in Level eingeteilt wurden, bestand darin, die Spieler:innen während der Messung die Aufgabe mit gleicher Schwierigkeit durchführen zu lassen, obwohl es Unterschiede in den Erfahrungen mit Computerspielen im Allgemeinen und Tetris im

Besonderen gab. Durch die angepasste Geschwindigkeit wurde es schwieriger für die erfahrenen Spieler:innen und es sollte dem Schwierigkeitsgrad nahekomen, mit dem Spieler:innen konfrontiert wurden, die das Spiel noch nicht kannten. Allerdings boten neben den Leveln, die später als Vergleichsmaß auf der Gruppenebene dienten, auch die totalen Endpunktstände ein sinnvolles Maß für das Spielkönnen der Proband:innen. Da die einzelnen Endpunktstände jedoch maßgeblich von den Leveln und auch der Spielgeschwindigkeit abhingen und durch diese Variablen beeinflusst wurden, waren diese nicht ohne Weiteres auf Gruppenebenen vergleichbar.

Um die totalen Endpunktstände vergleichen zu können und somit zu bereinigen, wurde ein lineares Regressionsmodell in RStudios programmiert, welches überprüfte, in welchem Ausmaß die Prädiktoren Level und Spielgeschwindigkeit die Endpunktstände beeinflussten (vgl. Anhang Abb. 16).

Bei diesem Vorgehen stellte sich heraus, dass nur die Level einen signifikanten Einfluss ($p = 5.79e-06$) auf die Punktestände hatten. Die Spielgeschwindigkeit hatte hingegen keinen Einfluss ($p = 0.6391$), trotz vorheriger Vermutung, dass eine erhöhte Chance auf einen höheren Punktestand gegeben war, weil mehr Tetriminos im Spielfeld vorhanden waren, um Punkte damit zu erzielen. Da zudem eine Multikollinearität zwischen Level und Geschwindigkeit festgestellt werden konnte (Variance Inflation Factor(VIF) = 29.76), wurde beschlossen, die Spielgeschwindigkeit für die nachfolgenden Berechnungen nicht weiter zu berücksichtigen.

Trotz dessen musste eine Vergleichbarkeit der individuellen Leistungsunterschiede unabhängig vom Level gegeben sein. Genau jene wurde durch die Residuen des Regressionsmodell erreicht. Diese Residuen gaben die Differenz des Endpunktstands und dem durch das Regressionsmodells, auf Basis des Levels, vorhergesagten Punktestand an. Ein positives Residuum resultierte demnach aus einer besseren Spielleistung der Proband:innen, als es hinsichtlich des Levels zu erwarten gewesen wäre. Ein negatives Residuum hingegen deutete darauf hin, dass ein:e Spieler:in schlechter abgeschnitten hatte.

Zwar wäre es theoretisch auch möglich gewesen, den Gesamtpunktestand durch das zugeteilte Level zu dividieren, um einen vergleichbaren Punktestand zu erhalten. Diese Methode wurde jedoch verworfen, weil das Level als ordinaler Prädiktor zu betrachten war. Demnach war es in der Definition kein metrisches Maß, wodurch eine Division statistisch als nicht sinnvoll erachtet wurde, da dies nur zulässig ist, wenn die Variablen metrisch sind.

Außerdem wurden die Differenzen der über den Spielverlauf erreichten Spielstände als parametrischer Modulator definiert (siehe Kapitel 3.3.4).

3.2.6 MRT-Daten Akquisition

Die Teilnehmer wurden in einem 3-Tesla-MRT-Scanner (General Electric Signa Premier) mit einer 48-Kanal Kopf-Matrix-Empfangsspule an der Klinik für Psychiatrie der Universität Marburg gescannt. Schaumstoffkissen und Ohrstöpsel wurden verwendet, um die Kopfbewegung zu begrenzen bzw. den Scannerlärm zu reduzieren. Eine T2*-gewichtete Single-Shot-Gradient-Echo-Echoplanar-Bildgebungssequenz (EPI) wurde ausgeführt, um die funktionellen Bilder zu erhalten (40 Schichten, 3 mm Dicke mit einem 0.3 mm Schichtabstand, Wiederholungszeit (TR) = 1200 ms, Echozeit (TE) = 30 ms, Multibandfaktor = 2, Matrixgröße = 64×64 Voxel, Voxelgröße = $3 \times 3 \text{ mm}^2$, Sichtfeld (FoV) = $192 \times 192 \text{ mm}^2$, Flipwinkel (FA) = 60°). Die Aufnahmezeit betrug insgesamt 25 Minuten. Die Schichten wurden parallel zur interkommissuralen Ebene (AC-PC) in absteigender Reihenfolge aufgenommen.

Zusätzlich wurde ein anatomischer Scan mit einer T1-gewichteten schnellen Gradientenechosequenz in der Sagittalebene (176 Schichten, 1 mm Dicke, TR = 2368,84 ms, TE = 1,97 ms, Matrixgröße = 256 × 256 Voxel, Voxelgröße = 1 × 1 × 1 mm³, FoV = 256 × 256 mm², FA = 9°) durchgeführt. Dies erforderte eine zusätzliche Aufnahmezeit von 4 Minuten.

3.3 MRT-Daten Analyse

3.3.1 Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitungsschritte wurden mit fMRIPREP durchgeführt. Dies ist eine Vorverarbeitungspipeline, die mit einer Kombination aus verschiedenen Softwarepaketen wie FSL, ANTs, FreeSurfer und AFNI die grundlegenden Vorverarbeitungsschritte ausführt, welche für die Verwendung weiterer Analysen unumgänglich sind (fMRI-Prep, 2016).

Mit Hilfe der fMRIPrep Pipeline wurden eine Bewegungskorrektur, eine Slice-Timing Korrektur, eine Koregistrierung, eine Verzerrungskorrektur („Susceptibility Distortion Correction“ SDC) und eine Normalisierung durchgeführt. Die Reihenfolge der einzelnen Vorverarbeitungsschritte war dabei besonders wichtig, da die Ergebnisse der anfänglichen Schritte im Laufe der Vorverarbeitung gebraucht wurden. Es ist üblich, je nach Studien Design, entweder mit einer Bewegungskorrektur oder einer Slice-time Korrektur zu beginnen. Da bei dieser Studie aber viele Bewegungen durch das Spiel erwartet wurden, wurde mit einer Bewegungskorrektur durch das Softwarepaket FSL begonnen. Bei einer sogenannten Bewegungskorrektur werden die einzelnen funktionellen Bilder über ein Standardbild gelegt, um Bewegungen der im Scanner liegenden Proband:innen zu korrigieren. Die Fixierung der Proband:innen bei fMRT-Messungen des Gehirns schränkt die Bewegungsfreiheit zwar schon stark ein, aber auch wenn die Proband:innen ganz ruhig liegen, bewegen sie sich unterbewusst durch Atmung und Herzschlag. Da sich zwar die Lage, aber nie die Form des Gehirns, verändern kann, bewegt die Software die einzelnen Bilder so lange entlang der 6 Bewegungsparameter (3 Translationsparameter, 3 Rotationsparameter) bis die Farbgleichheiten der einzelnen Bilder optimiert werden. Dies ist das Zeichen dafür, dass die Farbunterschiede zwischen den einzelnen Bildern minimiert werden und dass die Scans so gut wie möglich übereinandergelegt wurden (Schneider & Fink, 2007).

Danach erfolgte die Slice-timing Korrektur durch AFNI. Im Laufe des Slice-timing werden die zeitlichen Unterschiede in der Aufnahme einzelner Schnittbilder des Gehirns, sogenannte Slices, korrigiert. Innerhalb eines Messzyklus werden einzelne Schichten des Gehirns nacheinander aufgenommen (absteigende, aufsteigende oder überlappende Reihenfolge). Dadurch werden zeitlich leicht versetzte Messungen aufgenommen, die im Nachhinein auf einen Zeitpunkt verschoben werden müssen, als wären sie zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen worden. Im Falle dieser Pipeline wurde die Interpolation der Intensitätswerte auf die Mitte der „time to repeat“ Zeit, kurz TR, durchgeführt. Dieser Zeitpunkt stellte dann ein Referenzbild aller Gehirnschichten eines Aktivierungszustand dar (Ashburner et. al., 2021; Schneider & Fink, 2007).

An den Schnittstellen von Luft zu Gehirngewebe, wie in der Nähe der Augen, der Nase und den Gehörgängen kommt es des öfteren zu Verzerrungen des Gewebes oder Signalausfällen an diesen Stellen. Damit diese Artefakte ebenso korrigiert werden konnten, wurde an dieser Stelle die „Susceptibility Distortion Correction“ in die Pipeline eingebaut (Provins et al., 2023).

Die bewegungs-, zeit- und verzerrungskorrigierten Scans wurden nun im nächsten Schritt, der Koregistrierung, durch die Software FreeSurfer innerhalb einer Proband:in registriert. Dafür werden alle funktionellen Scans eines/r Probanden/in über ein fixiertes Bild gelegt. Dabei stellt das im Laufe der Messung aufgenommene anatomische/T1-Bild das Referenzbild dar, weil es im Gegensatz zu den funktionellen Aufnahmen über eine hohe räumliche Auflösung verfügt. Ebenso wie in der Bewegungskorrektur wurden die funktionellen Bilder nach den sechs möglichen Bewegungsparametern verzerrt. Diese Transformation hat das Ziel, dass bei allen funktionellen Aktivierungen die korrekten anatomischen Ursprünge dargestellt werden können (Ashburner et. al., 2021; Schneider & Fink, 2007).

Damit die Aufnahmen der Proband:innen auch auf Gruppenebene vergleichbar waren, musste noch ein letzter Schritt erfolgen - die Normalisierung, in dieser Pipeline durch ANTs. Die Gehirne einzelner Proband:innen sind alle unterschiedlich, sei es in der Größe, Länge oder Breite. Dementsprechend liegen aber auch die anatomischen Gehirnareale bei unterschiedlichen Gehirnen an unterschiedlichen Stellen. Um dieses Problem umgehen zu können, werden alle Gehirne in ein Koordinatensystem gebracht. Nach der Registrierung innerhalb der Proband:innen erfolgte innerhalb dieses Schrittes die räumliche Anpassung der individuellen Scans auf einen Standardraum. Dafür wird standardmäßig das Montreal Neurological Institute Template, kurz MNI-Template, verwendet (Ashburner et. al., 2021; Schneider & Fink, 2007).

Zusätzlich gab es bei dieser Version der Verarbeitungspipeline eine eingebaute ICA-AROMA, welche zusätzlich zur herkömmlichen Bewegungskorrektur arbeitete und bei dieser Studie, auf Grund von hohem Bewegungsaufkommen beim Spielen, unerlässlich war. Leider ist diese zusätzliche Funktion bei den neueren Versionen der Pipeline nicht mehr inkludiert, daher wurde die etwas ältere Pipeline verwendet, da es trotz vieler Aktualisierungen keine Nachteile darstellte.

Abschließend lässt sich festhalten, dass diese Vorverarbeitungsschritte, zum einen die Übereinstimmung zwischen den Gehirnstrukturen verschiedener Teilnehmer verbessern und zum anderen Signalartefakte, sogenanntes Rauschen, reduzieren sollten.

3.3.2 Statistische Modellierung

Die vorverarbeiteten Daten konnten nun statistisch analysiert werden. Diese Analyse erfolgte zunächst für jede:n einzelne:n Proband:in („First-Level Ebene“) mithilfe der SPM12 Software. Die Auswertung wurde mit einem Allgemeinen Linearen Modell (ALM) durchgeführt. Auf der First-Level Ebene wurden die Aktivitäten bei einzelnen Aufgaben von Proband:innen separat analysiert. In dieser „Single Subject“ Analyse wurde die hämodynamische Antwort modelliert, indem diese zeitlich mit den jeweils gestellten Aufgaben der Trials verknüpft wurde. Zusätzlich wurden sechs Bewegungsparameter, die aus der Bewegungen der Proband:innen hervorgehen, als Störfaktoren mit in die ALM eingebaut. Ein Hochpassfilter entfernte zudem Signale mit Perioden länger als 128 Sekunden. Der Hochpass-Filter war vor allem für die Entfernung von langsamen Bewegungsdriften notwendig. Das Ergebnis des ALMs waren geschätzte Einflüsse der einzelnen Bedingungen (Tetris spielen, Visuelle Kontrolle, Motor Kontrolle und Fixierungskreuz) auf das Signal, gemessen für jedes Voxel. Diese Ergebnisse wurden anschließend zuzüglich mit den drei Aufgabenkontrasten in Form einer Konjunktionsanalyse zusammengefügt, sodass Tetris spielen als Kontrast über allen anderen drei Kontrollbedingungen stand.

Zweck der Konjunktionsanalyse war es dabei, die Gehirnnareale darzustellen, die ausnahmslos über alle Aufgaben hinweg aktiviert waren. Um dies gewährleisten zu können, wurden statistische Karten für jede Bedingung erstellt und auf gemeinsame Effekte analysiert. Diese Analyseform ist besonders hilfreich bei Untersuchungen von gemeinsamen neuronalen Aktivitäten zwischen verschiedenen Aufgaben. Mithilfe der Konjunktion-Analyse sollten die Nebenaktivitäten, welche das Tetris-Aktivierungsmuster ergänzen, herausgerechnet werden. Indem die Kontraste Tetris > Baseline, Tetris > Motor und Tetris > Visuell in dieser Analyse verwendet wurden, suchte die Software die überlappenden Aktivitäten des Tetris spielen und der jeweiligen Kontrollbedingung heraus und verrechnete diese. Das Ergebnis, welches durch diese Kontrastkonjunktion generiert wurde, zeigte demnach nur die Aktivität, die durch die Wahrnehmung und Verarbeitung der Spielprozesse hervorgerufen wurden.

Der wohl wichtigste Vorteil der Konjunktionsanalyse ist, dass sie durch die „UND“ Verrechnung der Aktivitäten weniger Ausreißer zulässt, da einzelne zufällige Aktivierungen zwar möglich sind, aber durch diese Art der Analyse nicht dargestellt werden (Poldrack et al., 2011).

3.3.3 Statistische Inferenz

Um die Aktivitäten auch auf Signifikanz innerhalb der Gruppe testen zu können, wurde nach der statistischen Modellierung, welche sich ausschließlich auf die Einzelanalysen bezog, eine sog. Second-level Analyse über die ganze Stichprobengröße hinweg gemacht. Dies geschah ebenfalls wieder mit der SPM 12 Software. Dazu wurden die einzelnen Bedingungen, durch die vorher generierten Kontrastbilder aus der First-Level Analyse, als eigene „Gruppe“, also je Proband drei Kontrastgruppen eingebaut. Da auch hier mehrere Kontraste miteinander verrechnet werden sollten, wurde auch auf der Gruppenebene der Analyse eine Konjunktionsanalyse gemacht. Anders als in der Pilotstudie dieser weiterführenden Arbeit war jedoch die Stichprobengröße höher und daher wurde anstatt einem unkorrigierten Schwellenwert ein „familywise error“, kurz FWE, von 0.05 verwendet. Der FWE legt den statistischen Schwellenwert fest, den die Aktivierungen überschreiten müssen, um als signifikant angezeigt zu werden. Dieser Wert liegt standardmäßig bei einem Signifikanzniveau von 0,05, da die Wahrscheinlichkeit mindestens einen statistischen Fehler 1. Art, ein falsch-positives Signal zu erhalten, bei 5% liegt (Schneider & Fink, 2007).

Zudem wurde ein faktorielles Design in Form einer multiplen Regression verwendet, um die Aktivität der Proband:innen hinsichtlich ihrer Leistungsunterschiede vergleichen zu können. Ebenso wie in der Gruppenanalyse wurden die Kontrastbilder aus der Einzelpersonenanalyse verwendet. Außerdem wurden diese mit Kovariaten gleichgestellt, welche aus den Ergebnissen des Regression Modells bestanden. Dabei war zu beachten, dass die Kovariaten, bestehend aus den bereinigten Endpunkteständen, für jede Proband:in unabhängig von den Kontrastbildern gleichblieben. Diese Art der Analyse ermöglichte die Erstellung dieser Designmatrix, welche die sich wiederholenden Endpunktestände pro Kontrastbildtyp aller Proband:innen darstellte und dabei noch eine Konjunktionsanalyse zuließ (vgl. Abb. 13).

3.3.4 Parametrische Modulation und zusätzliche Regressoren

Ein parametrischer Modulator wurde als ein zusätzlicher Regressor in die Modellierung eingebaut. Unter einer parametrischen Modulation versteht man allgemein die Analyse eines Stimulus, dessen Eigenschaften über den Verlauf der Untersuchung verändert wird, um zu untersuchen, ob und in

welcher Stärke sich die Veränderungen auf die Aktivität im Gehirn auswirken (Poldrack et. al., 2011). Im Falle der Punkte, der sogenannten „Scores“, die sich über den Verlauf des Spiels erhöhten, wurde die Differenz der Punkte zwischen den Runden berechnet und die Veränderung als zusätzlicher Regressor eingebaut.

Angeichts der Tatsache, dass die Scores der Proband:innen natürlich individuell anders verändert wurden, bestand die Notwendigkeit den zusätzlichen Regressor schon auf der Einzelpersonenebene in die Analyse mit einzubauen. Dafür wurden die Differenzen jedes Einzelnen als Datenreihe in die Analyse eingefügt, als Regressor eingebaut und gegen die funktionellen Scans aufgereiht (vgl. Anhang Tab. 5).

Die daraus resultierenden Dateien wurden im zweiten Schritt auf der Gruppenebene mit einem Einstichproben t-Test analysiert, um festzustellen, welche Gehirnareale bei allen Proband:innen Aktivitäten zeigten.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Fragebögen- und Verhaltensdaten (4.1), sowie die Bildgebungsdaten der MRT-Analyse (4.2) und der Kovariaten Analyse (4.3) wiedergegeben. Die MRT-Analyse stellt dabei das allgemeine, mit Tetris assoziierte Aktivierungsmuster, für die einzelnen Proband:innen (4.2.1) und über die Gruppe gemittelt (4.2.2), dar.

4.1 Fragebögen- und Verhaltensdaten

In den Fragebögen wurden neben Alter und biologischem Geschlecht auch Selbsteinschätzungen abgefragt, in denen die Proband:innen sich hinsichtlich ihrer Tagesform und ihren Spielkenntnissen äußern sollten (vgl. Kapitel 3.2.4).

Die selbsteingeschätzte allgemeine Computerspielerfahrung liegt über alle Proband:innen der Studie gemittelt bei 4,4 und ist damit sehr mittig auf der Skala anzuordnen. Die Abweichungen liegen zudem bei ± 2 Standardabweichungseinheiten (vgl. Abb.5).

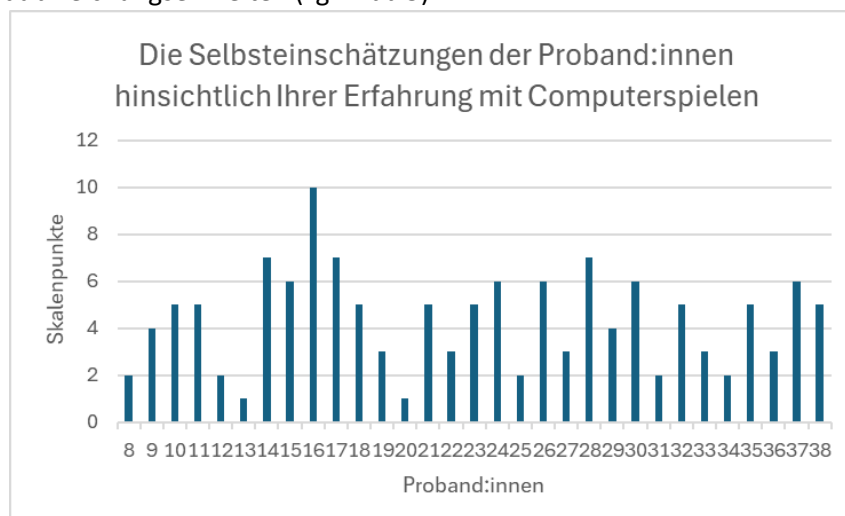


Abbildung 5: Ein Überblick der selbsteingeschätzten Erfahrungswerte der einzelnen Proband:innen hinsichtlich Ihrer Kenntnisse in Computerspielen allgemein. Die Proband:innen haben auf einer Skala von 1-10 bewertet (Skala 1-10, 1 = gar keine Erfahrung; 10 = tägliches Spielen). (Erstellt mit Microsoft Excel).

Dieselbe Auswertung wurde ebenfalls für die Erfahrung mit dem Tetris-Spiel selbst gemacht. Dabei fügt sich der Mittelwert bei 3,4 ein. Die Standardabweichung hier beläuft sich im Durchschnitt auf ebenfalls ca. ± 2 Skalenpunkte (vgl. Abb.6).

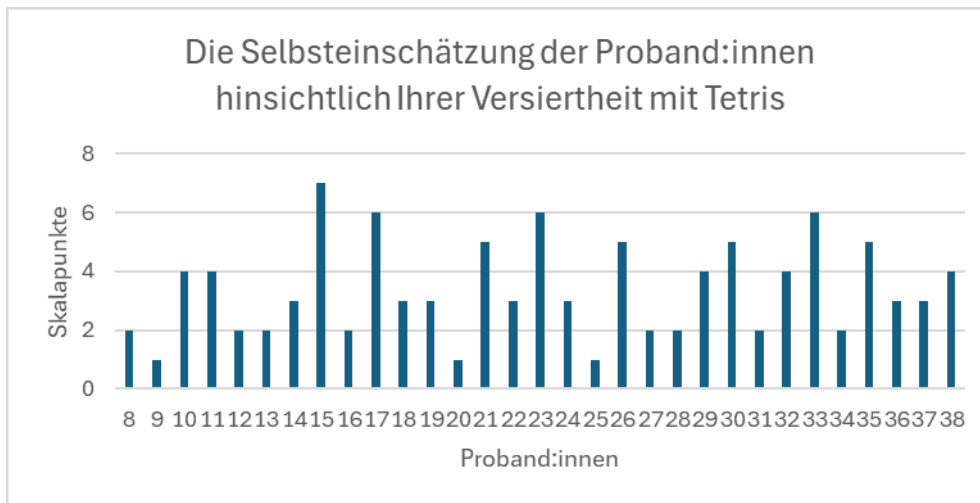


Abbildung 6: Ein Überblick über die Selbsteinschätzungen der Proband:innen hinsichtlich ihrer Erfahrung speziell mit Tetris. Auch hier konnten die Proband:innen auf einer Skala von 1-10 bewerten. (Skala 1-10, 1 = gar nicht/ noch nie gespielt, 10 = tägliches Spielen). (Erstellt mit Microsoft Excel).

Die Selbsteinschätzung der Proband:innen hinsichtlich ihrer Erfahrung mit Computerspielen und der speziellen Frage nach der Versiertheit im Spiel Tetris verglichen mit den Level Zuteilungen legt eine gute Einschätzung der eigenen Erfahrungswerte nahe. Die Korrelationsanalyse, der Selbsteinschätzungen der Kenntnisse in Tetris und der letztlichen Levelzuteilungen, zeigt einen positiven Zusammenhang mit einem Pearson-Korrelationseffizienten von $r = 0,33$. Es ist jedoch an den Levelzuteilungen deutlich zu erkennen, dass Proband:innen mit einer gewissen Routine in Computerspielen besser in den Vorrunden abschneiden, auch wenn sie noch nicht viel Übung mit dem Spiel Tetris vorweisen können.

Betrachtet man die Levelzuteilungen einmal genauer ergibt sich ein Mittelwert von 4,23 und eine Abweichung von 1,56 Standardabweichungseinheiten. Zudem zeigt sich eine breite Verteilung über die Level 1-8 hinweg. Betrachtet man die Verteilung im Detail, so bemerkt man eine annähernde Normalverteilung, da die mittleren Level eindeutig öfter vertreten sind als die außenliegenden. Allerdings sind die Werte nicht symmetrisch verteilt und darüber hinaus gibt es zwei Maxima, was gegen eine Normalverteilung spricht (vgl. Abb. 7).

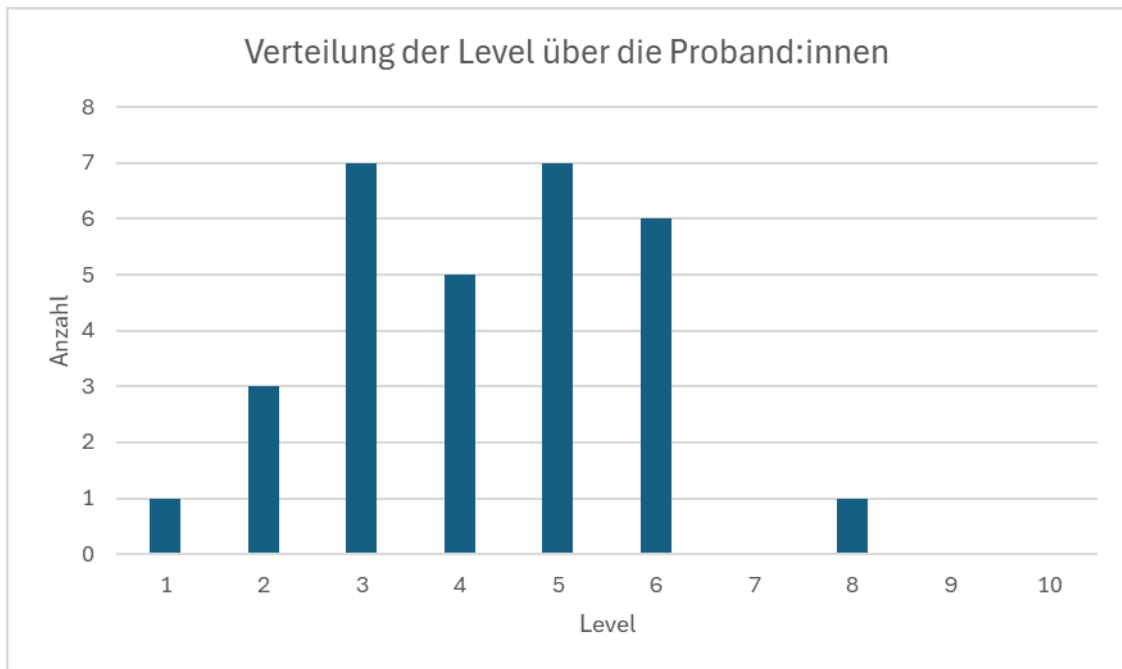


Abbildung 7: Zuteilung der Level über die Daten der 30 Proband:innen Daten hinweg, die für die folgenden Analysen genutzt werden. (Erstellt mit Microsoft Excel).

Die Analyse der nach der Messung erhobenen Daten, zeigte eine allgemein gute Konzentration im MRT-Scanner bei der Messung und demnach auch hinsichtlich des Spiels. Auch die Frage nach der individuellen Einschätzung, wie gut sich die Proband:innen auf das Experiment und dessen Aufgabenstellung einlassen konnten, wurde im Mittel mit einer positiven Rückmeldung beantwortet.

Ein weiter bedeutsamer Punkt dieses Spiels sollte die Aufmerksamkeit auf die nächsten Tetriminos sein. Dies konnte von der Mehrzahl gut umgesetzt werden, nur einzelne Proband:innen gaben im Nachhinein erhebliche Schwierigkeiten damit an.

Allgemeine Schwierigkeiten wurden sehr moderat gesehen, selbst die verborgene Sicht auf die Hand, mit der die Responsebox im Scanner bedient werden sollte, bereitete den Proband:innen keine größeren Schwierigkeiten.

4.2 MRT-Ergebnisse

4.2.1 Einzelebene

Vor der First-Level-Analyse auf der Einzelebene wurden die MRT-Scans bereits, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, vorverarbeitet und ein ALM zur Schätzung der Beta-Werte erstellt. Mithilfe der SPM 12 Software wurde eine statistische t-Karte erstellt, welche die Ergebnisse der Konjunktionsanalyse des Tetris Spielens gegen alle Kontrollbedingungen zeigt, indem sie jedem Voxel des Gehirns einen t-Wert zuordnet. Beispielhaft wird das Aktivierungsmuster des Probanden 12 dargestellt (vgl. Abb. 8).

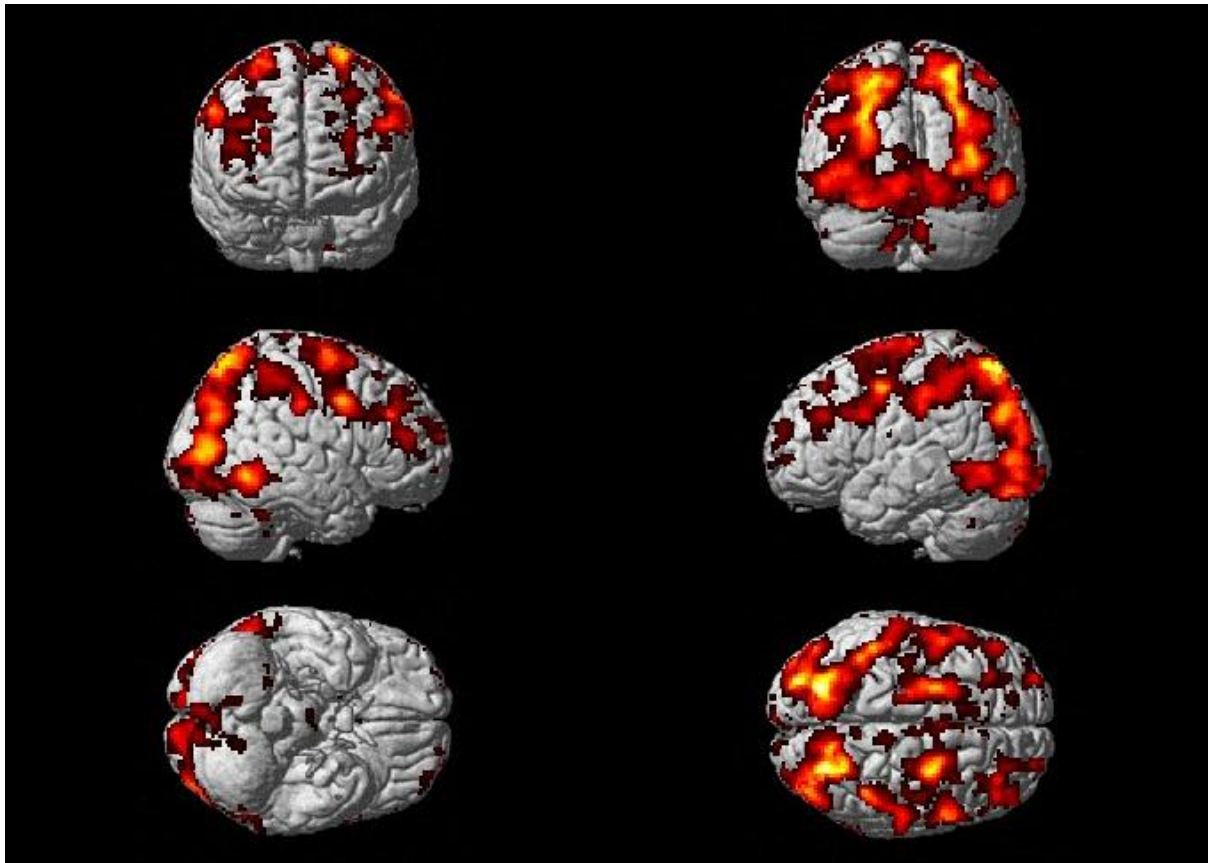


Abbildung 8: Exemplarische Ansicht der First Level Analyse anhand des Probanden 12. Ein weit ausgedehntes Netzwerk verbreitet über verschiedene Areale des gesamten Gehirns ist dargestellt. Die hier dargestellten T-Werte sind mit 0,05 FWE korrigiert und mit einem externen Threshold von 0 versehen. Die Abbildung wurde mit der SPM12 Software und dem SPM Einzelpersonen MNI Template gemacht.

Die Cluster mit den höchsten t-Werten und damit die wichtigsten Aktivierungsareale des Probanden 12 werden in der unterstehenden Tabelle aufgelistet (vgl. Abb. 9). Die Reichweite des Netzwerkes wird erst deutlich, wenn man sich einen Überblick über die Aktivierungsareale verschafft. Die wichtigsten Aktivierungsareale von Proband 12 hinsichtlich des Studienziels sind dabei der Frontallappen, mit Aktivitäten im Gyrus frontalis superior, Gyrus frontalis inferior opercularis und Gyrus frontalis medialis; der Temporallappen, mit Aktivierungen im Gyrus temporalis inferior und im Gyrus temporalis medialis und Gyrus supramarginalis; der Lobulus parietalis superior (SPL), mit dem Precuneus und dem Lobulus parietalis inferior; der Okzipitallappen, mit Aktivierungen im Gyrus occipitalis inferior; das Kleinhirn parietalis inferior; der Okzipitallappen, mit Aktivierungen im Gyrus occipitalis inferior; das Kleinhirn und das supplementär motorische Areal (Abb. 8, Abb.9).

Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm mm mm		
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>q</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>p</i> _{uncorr}	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>q</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	(<i>Z</i> _E)	<i>p</i> _{uncorr}			
0.000	47	NaN	0.000	24907	0.000	0.000	0.000	30.42	Inf	0.000	-20	-78	56
						0.000	0.000	28.88	Inf	0.000	26	-72	60
						0.000	0.000	28.57	Inf	0.000	36	-80	12
		0.000	0.000	1913	0.000	0.000	0.000	26.66	Inf	0.000	60	4	40
						0.000	0.000	18.95	Inf	0.000	52	6	34
						0.000	0.000	14.68	Inf	0.000	54	32	32
		0.000	0.000	1812	0.000	0.000	0.000	24.68	Inf	0.000	30	-8	72
						0.000	0.000	19.37	Inf	0.000	30	-4	62
						0.000	0.000	16.48	Inf	0.000	26	-16	76
		0.000	0.000	256	0.000	0.000	0.000	17.43	Inf	0.000	26	68	18
						0.000	0.000	9.15	Inf	0.000	24	60	18
						0.000	0.000	8.57	Inf	0.000	26	54	26
		0.000	0.000	210	0.000	0.000	0.000	13.41	Inf	0.000	-32	34	48
						0.000	0.000	6.77	6.71	0.000	-30	28	34
						0.003	0.062	5.59	5.56	0.000	-22	30	56
		0.000	0.000	267	0.000	0.000	0.000	12.96	Inf	0.000	-28	62	14
						0.000	0.000	12.37	Inf	0.000	-30	60	24
						0.000	0.000	9.50	Inf	0.000	-24	74	0
		0.000	0.002	24	0.000	0.000	0.000	12.51	Inf	0.000	0	-94	70
		0.000	0.001	31	0.000	0.000	0.000	12.23	Inf	0.000	6	-50	78
		0.000	0.000	95	0.000	0.000	0.000	11.61	Inf	0.000	4	-14	74
						0.000	0.000	6.66	6.61	0.000	4	-20	80
						0.001	0.027	5.77	5.73	0.000	-2	-4	66
		0.000	0.000	105	0.000	0.000	0.000	11.32	Inf	0.000	8	20	36
		0.000	0.000	47	0.000	0.000	0.000	11.03	Inf	0.000	34	28	54
		0.000	0.000	37	0.000	0.000	0.000	9.81	Inf	0.000	-12	-62	-48
		0.000	0.000	57	0.000	0.000	0.000	9.59	Inf	0.000	-12	-34	-14
		0.000	0.002	22	0.001	0.000	0.000	9.46	Inf	0.000	4	72	24
		0.000	0.000	100	0.000	0.000	0.000	9.37	Inf	0.000	-18	36	16
						0.000	0.000	8.93	Inf	0.000	-18	44	22

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: $T = 4.99$, $p = 0.000$ (0.050)
 Extent threshold: $k = 10$ voxels, $p = 0.013$ (0.001)
 Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 1.485$
 Expected number of clusters, $\langle C \rangle = 0.00$
 FWEp: 4.989, FDRp: 5.640, FWEc: 1, FDRc: 9

Degrees of freedom = [1.0, 1290.0]
 FWHM = 7.9 7.6 7.3 mm mm mm; 3.9 3.8 3.6 {voxels}
 Volume: 1738424 = 217303 voxels = 3735.2 resels
 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 53.77 voxels)

Page 1



Abbildung 9: Überblick über die aktivierten Cluster des Proband 12 (PFWE > 0,05) In der Tabelle sind verschiedene Kennwerte dargestellt, u.a. die korrigierten und unkorrigierten *p*-Werte (angeordnet nach den absteigenden *t*-Werten der Cluster).

4.2.2 Gruppenebene

Ein Vergleich auf Gruppenebene stellt die verrechneten Aktivitätsmuster aller Proband:innen gleichzeitig dar. Für den Vergleich wurden die statistischen *t*Beta-Karten der Einzelanalyse wiederverwendet. Nebenbei wurde auf dieser Ebene der Analyse wie bereits in Kapitel 3.3.3 beschrieben eine Konjunktionsanalyse durchgeführt.

Das Aktivitätsmuster der Second Level Analyse stellt ein breites Tetris Netzwerk dar, welches sich über frontale Bereiche bis hin zum posterior liegenden visuellen Kortex zieht (Abb. 10). Es ist ähnlich aufgebaut wie bereits die exemplarische Darstellung des Probanden 12, welche beispielhaft für mehrere Ergebnisse der Einzelanalyse steht (vgl. Kapitel 4.2.1).

Ähnlich zu den meisten Netzwerken aus den Einzelanalysen zeigten sich über alle Proband:innen hinweg signifikante Cluster im Gyrus frontalis superior, im Gyrus frontalis medialis, im Lobulus parietalis superior, im Lobulus parietalis inferior und im Gyrus supramarginal. Außerdem wurden noch weitere Aktivierungscluster im Prämotorischen Kortex des Frontallappens, dem Gyrus precentralis und dem supplementären motorischen Areal (SMA) deutlich. Des Weiteren fanden sich Aktivierungen in den tieferliegenden Thalamus nuclei pulvinar lateral und Thalamus nuclei pulvinar medial und des Kleinhirns, mit den Arealen 4, 5, 8, und Aktivierungscluster in der Vermis. Zusätzlich zeigten sich Aktivierungscluster in den Verarbeitungsarealen und visuell-räumlichen Informationen, wie dem Gyrus temporalis inferior, dem Gyrus fusiformis, dem Gyrus occipitalis inferior, dem Gyrus occipitalis

medialis, dem Gyrus occipitalis superior und dem Gyrus lingualis, welcher den primären visuellen Kortex beinhaltet (Abb. 10, Abb. 11).

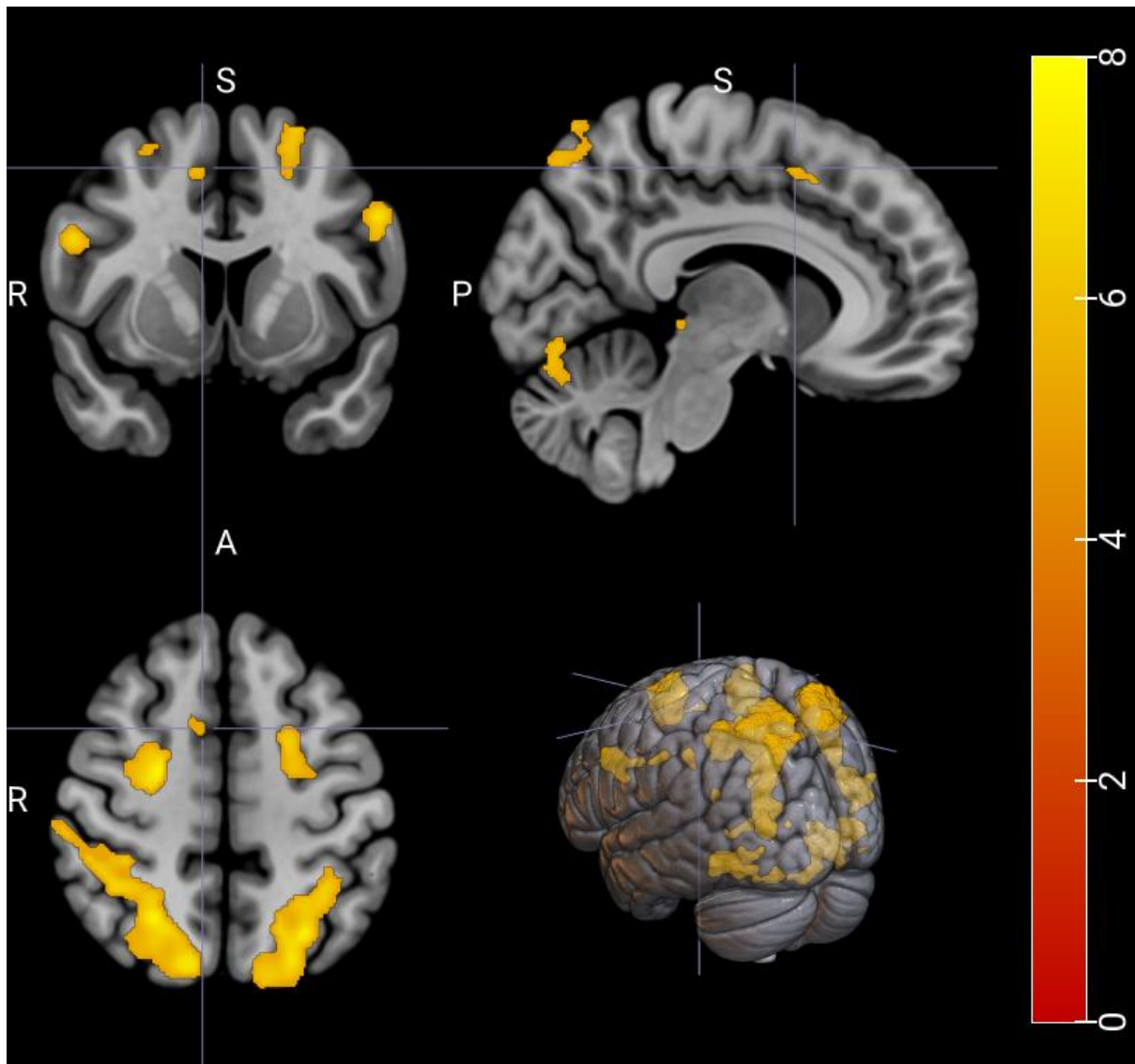


Abbildung 10: Darstellung der Aktivitäten der Gruppenanalyse mit einer 0,05 FWE-Korrektur und einem Cluster-Threshold von 0. Das Aktivierungsmuster zeigt das Tetris Netzwerk, mit den neuronal aktiven Arealen. Die seitliche Skala stellt die Legende für die Verteilung der T-Werte als farbige Aktivierungen dar. Die Abbildung wurde mit MRICroGL erstellt. (Rorden, 2025).

Verglichen mit den Ergebnissen der Pilotstudie aus dem Jahre 2024, kann man deutliche Übereinstimmung erkennen. Die Aktivierungscluster der Hauptaktivierungen zeigten Aktivierung in den gleichen Arealen. Sie umfassten durch die größere Stichprobe nun mehr Voxel.

Interessanterweise wurde in der Pilotstudie eine rechtsseitige Lateralisierung entdeckt. In dieser Studie stellte sich jedoch heraus, dass die Aktivierungscluster in den prämotorischen Bereichen links sowie rechts vorhanden sind. Allerdings ist das Aktivierungscluster im Gyrus precentralis links lateralisiert. Dieses Areal ist für die Kontrolle von willkürlichen Bewegungen des Muskelskeletts zuständig und steuert die Muskeln der Körperhälften dabei contralateral. Da die Mehrzahl der Proband:innen Rechtshänder waren, ist diese Lateralisierung nicht verwunderlich.

Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm mm mm		
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>q</i> _{FDR-corr}	<i>k</i> _E	<i>p</i> _{uncorr}	<i>p</i> _{FWE-corr}	<i>q</i> _{FDR-corr}	<i>T</i>	(<i>Z</i> _E)	<i>p</i> _{uncorr}			
0.000	29	0.000	0.000	537	0.000	0.000	0.000	8.31	7.11	0.000	-24	-2	62
						0.001	0.021	6.38	5.76	0.000	-24	8	64
						0.003	0.090	5.95	5.43	0.000	-20	-2	74
		0.000	0.000	2389	0.000	0.000	0.000	7.98	6.90	0.000	26	-58	52
						0.000	0.001	7.77	6.75	0.000	12	-74	52
						0.000	0.002	7.35	6.47	0.000	32	-60	60
		0.000	0.000	493	0.000	0.000	0.001	7.87	6.82	0.000	22	-4	54
						0.000	0.003	7.18	6.34	0.000	30	-2	62
		0.000	0.000	1997	0.000	0.000	0.001	7.67	6.69	0.000	-26	-62	48
						0.000	0.001	7.52	6.58	0.000	-20	-74	44
						0.000	0.002	7.41	6.51	0.000	-34	-74	20
		0.000	0.000	231	0.000	0.000	0.002	7.26	6.40	0.000	54	-54	-12
		0.000	0.000	153	0.000	0.000	0.002	7.24	6.38	0.000	-52	8	34
						0.002	0.077	6.00	5.47	0.000	-42	-2	32
						0.003	0.097	5.92	5.41	0.000	-50	4	24
		0.000	0.000	46	0.000	0.000	0.005	6.94	6.18	0.000	-4	-38	-2
						0.020	0.448	5.43	5.02	0.000	-6	-26	-8
		0.000	0.000	342	0.000	0.000	0.005	6.91	6.15	0.000	26	-66	-16
						0.000	0.011	6.60	5.93	0.000	30	-52	-10
						0.000	0.012	6.56	5.90	0.000	28	-64	-8
		0.000	0.000	156	0.000	0.000	0.006	6.86	6.12	0.000	2	-72	-24

table shows 3 local maxima more than 8.0mm apart

Height threshold: $T = 5.17$, $p = 0.000$ (0.050)
 Extent threshold: $k = 0$ voxels
 Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 2.494$
 Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 0.05$
 FWEp: 5.167, FDRp: 6.243, FWEc: 1, FDRc: 12

Degrees of freedom = [1.0, 87.0]
 FWHM = 9.7 9.3 8.8 mm mm mm; 4.9 4.6 4.4 {voxels}
 Volume: 1318104 = 164763 voxels = 1512.7 resels
 Voxel size: 2.0 2.0 2.0 mm mm mm; (resel = 99.46 voxels)
 Page 1

1 / 3

Labels : *volume summary (labels and distances for entire volume)*

x,y,z mm	label	dist mm					
-24 -2 62	Frontal_Sup_2_L	0.00	Precentral_L	2.83	Frontal_Mid_2_L	3.46	
-24 8 64	Frontal_Sup_2_L	0.00	Frontal_Mid_2_L	3.46	Supp_Motor_Area_L	8.94	
-20 -2 74	Frontal_Sup_2_L	0.00	Supp_Motor_Area_L	8.00	Precentral_L	8.25	
26 -58 52	Parietal_Sup_R	0.00	Angular_R	2.00	Parietal_Inf_R	2.00	
12 -74 52	Parietal_Sup_R	0.00	Precuneus_R	2.00	Cuneus_R	9.17	
32 -60 60	Parietal_Sup_R	0.00	Parietal_Inf_R	7.21	Angular_R	8.00	
22 -4 54	Frontal_Sup_2_R	0.00	Precentral_R	4.90	Frontal_Mid_2_R	6.00	
30 -2 62	Frontal_Sup_2_R	0.00	Frontal_Mid_2_R	4.47	Precentral_R	7.21	
-26 -62 48	Parietal_Sup_L	0.00	Parietal_Inf_L	4.47	Occipital_Mid_L	8.00	
-20 -74 44	Parietal_Sup_L	0.00	Occipital_Sup_L	2.83	Parietal_Inf_L	6.32	
-34 -74 20	Occipital_Mid_L	0.00	Temporal_Mid_L	7.21	Occipital_Sup_L	8.25	
54 -54 -12	Temporal_Inf_R	0.00	Temporal_Mid_R	6.00	Occipital_Inf_R	10.20	
-52 8 34	Precentral_L	0.00	Frontal_Inf_Oper_L	6.00	Frontal_Mid_2_L	6.00	
-42 -2 32	Precentral_L	0.00	Frontal_Inf_Oper_L	6.00	Postcentral_L	6.00	
-50 4 24	Precentral_L	0.00	Frontal_Inf_Oper_L	2.00	Rolandic_Oper_L	8.25	
-4 -38 -2	Cerebellum_4_5_L	0.00	Vermis_3	2.83	Lingual_L	4.00	
-6 -26 -8	Red_N_L	2.83	Raphe_D	4.00	SN_pc_L	6.93	

table shows at most 3 local maxima > 8.0mm apart per cluster

Height threshold: $T = 5.17$, $p = 0.000$ (0.050)
 Extent threshold: $k = 0$ voxels, $p = 1.000$ (0.050)
 Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 2.494$
 Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 0.05$
 Expected false discovery rate, $\leq \text{NaN}$

Degrees of freedom = [1.0, 87.0]
 Smoothness FWHM = 9.7 9.3 8.8 {mm} = 4.9 4.6 4.4 {voxels}
 Search vol: 1318104 cmm; 164763 voxels; 1512.7 resels
 Voxel size: [2.0, 2.0, 2.0] mm (1 resel = 99.46 voxels)
 Page 1

1 / 4

Abbildung 11: Tabelle der Aktivierungsmuster aller Proband:innen verglichen auf Gruppenebene mit einem Konjunktionskontrast Tetr>Baseline und Tetr> Visuelle Kontrolle und Tetr> Motor Kontrolle mit einem korrigierten p -Wert von 0.05 und einem Cluster-Threshold von 0. Die obige Tabelle der statistischen Karte sowie auch die untere Tabelle zur Clusterverteilung wurden in der SPM12 Software mithilfe der AAL3 Toolbox erstellt.

4.3 Kovariaten Analyse

4.3.1 Parametrische Modulation

In diesem Abschnitt geht es um die Analyse des parametrischen Regressors. Wie bereits in Kapitel 3.3.4 beschrieben wurden dafür die Differenzen der Punktestände zwischen den Spielrunden verwendet, um die Veränderung des Merkmals über die Zeit der Messung hinweg darzustellen und feststellen zu können, ob diese Veränderung eine signifikante Beeinflussung der neuronalen Aktivität mit sich bringt.

Abb. 12 zeigt, dass es Gehirnareale gibt, die durch die Veränderung der Punktestände beeinflusst werden. Dies sind, laut dem AAL3 Atlas, zum einen der Nucleus caudatus, der Gyrus fusiformis, der Gyrus postcentralis, der Gyrus precentralis, der mediale Gyrus Cinguli und der inferiore Bereich des Okzipitallappens (vgl. Abb. 13).

Interessanterweise wurden die neuronalen Areale nicht bilateral in ihrer Aktivität beeinflusst.

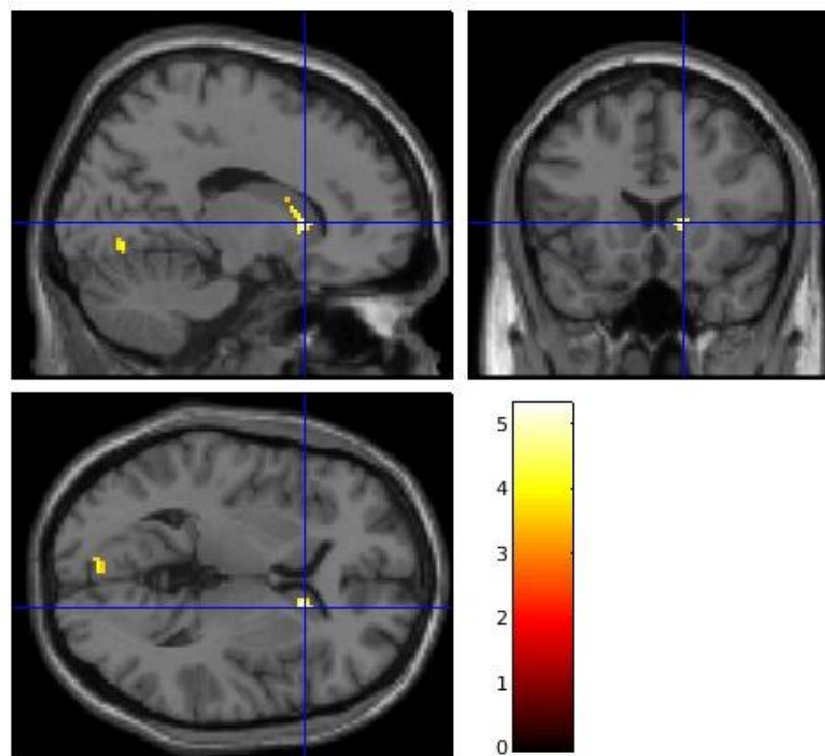


Abbildung 12: Überblick über die durch den parametrischen Regressor, in ihrer neuronalen Aktivität, beeinflussten Areale. Die Darstellung ist unkorrigiert mit einem p -Wert von 0.001 und einer festgelegten Clustergröße von 10 Voxeln. (Erstellt mit SPM12 und des AAL3 Atlas).

Labels : volume summary (labels and distances for entire volume)

x,y,z mm	label	dist mm					
16 18 4	Caudate_R	0.00	Putamen_R	4.47	Vent_Str_R	9.17	
14 10 16	Caudate_R	0.00	Putamen_R	10.00	ACC_sup_R	10.77	
26 -68 -14	Fusiform_R	0.00	Cerebellum_6_R	2.83	Lingual_R	4.00	
10 -74 -12	Lingual_R	0.00	Cerebellum_6_R	2.00	Vermis_6	4.00	
18 -72 -8	Lingual_R	0.00	Fusiform_R	6.00	Cerebellum_6_R	6.32	
-50 -12 52	Postcentral_L	0.00	Precentral_L	5.66	Parietal_Inf_L	10.20	
-44 -14 46	Postcentral_L	0.00	Precentral_L	4.90	Parietal_Inf_L	11.49	
-28 -72 -12	Fusiform_L	0.00	Occipital_Inf_L	4.90	Lingual_L	5.66	
-32 -76 -18	Fusiform_L	0.00	Cerebellum_6_L	2.00	Cerebellum_Crus1_L	2.83	
2 -86 0	Calcarine_L	0.00	Calcarine_R	4.00	Lingual_L	4.00	
36 -6 56	Precentral_R	0.00	Frontal_Sup_2_R	2.00	Frontal_Mid_2_R	2.83	
-14 -24 46	Cingulate_Mid_L	0.00	Supp_Motor_Area_L	4.90	Paracentral_Lobule_L	5.66	
48 -62 -14	Occipital_Inf_R	0.00	Temporal_Inf_R	2.00	Fusiform_R	4.47	

table shows at most 3 local maxima > 8.0mm apart per cluster

Height threshold: T = 3.40, p = 0.001 (1.000)	Degrees of freedom = [1.0, 29.0]
Extent threshold: k = 10 voxels, p = 0.240 (0.996)	Smoothness FWHM = 9.3 8.9 8.2 {mm} = 4.6 4.4 4.1 {voxels}
Expected voxels per cluster, <k> = 7.785	Search vol: 1318104 cmm; 164763 voxels; 1771.2 resels
Expected number of clusters, <c> = 5.61	Voxel size: [2.0, 2.0, 2.0] mm (1 resel = 84.94 voxels)
Expected false discovery rate, <= NaN	

Abbildung 13: Abbildung der Areale die durch den parametrischen Regressor beeinflusst werden. Die Darstellung ist unkorrigiert mit einem p-Wert von 0.001 und einer festgelegten Clustergröße von 10 Voxeln. (Erstellt mit SPM12).

4.3.2 Beeinflussung des Aktivitätsmusters durch das Spielkönnen

Das hier gewählt experimentelle Design einer multiplen Regressionsanalyse im Sinne eines faktoriellen Designs ermöglicht es, alle drei Bedingungen, die in der Analyse auf Einzelebene erstellt wurden, einzeln über alle Proband:innen hinweg zu analysieren. Wie man in Abb. 13 erkennen kann, wurden die, zuvor bereinigten, Endpunktestände aller 30 Proband:innen (vgl. Kapitel 3.2.5.4) als einzelne Parameter gegen die gewünschten Konditionen Tetris > Visuelle Kontrolle (con_001), Tetris > Motor Kontrolle (con_004), und über Tetris > Baseline (con_005) gestellt und analysiert.

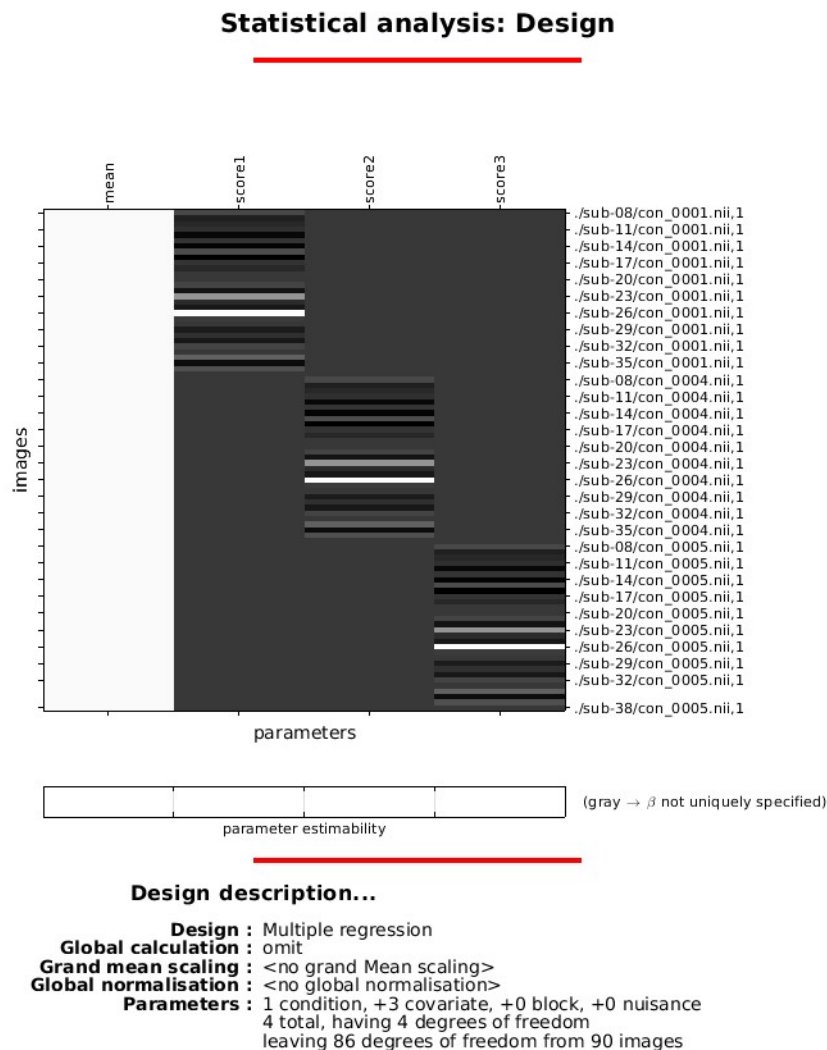


Abbildung 14: Designmatrix der multiplen Regressionsanalyse hinsichtlich des faktoriellen Designs.

In der Auswertung ergab sich eine maximale Aktivierung in dem Gehirnareal des Precuneus in der rechten Gehirnhälfte (vgl. Abb. 15). Dieses Areal ist interessanterweise ebenfalls in der Einzel- sowie auch in der Gruppenebene gefunden worden, liegt jedoch außerhalb des Tetris Netzwerkes, wenn man das Tetris Aktivierungsmuster über diese gefundene Aktivität legt.

Außerdem ist auch hier trotz der größeren Stichprobengröße nur eine unkorrigierte Darstellung möglich, da sich keine Signifikanz dieser neuronalen Aktivitätsänderung feststellen lässt.

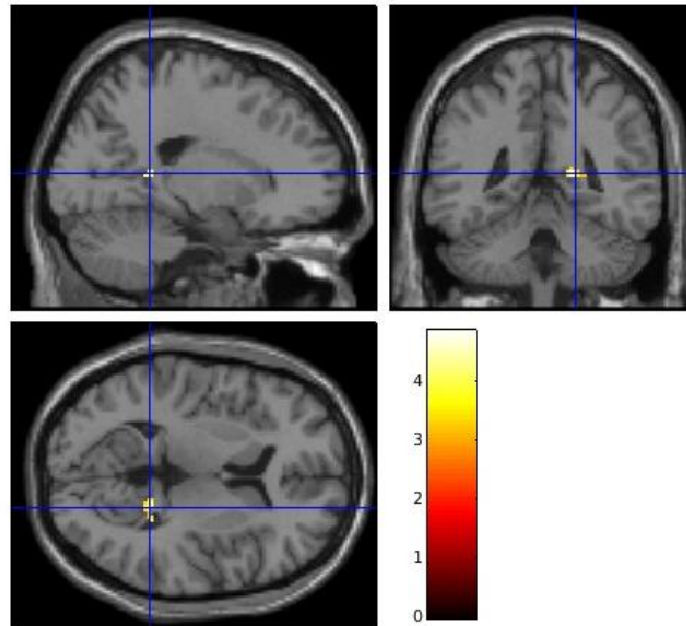


Abbildung 15: Aktivierungsmuster das sich hinsichtlich der Betrachtung des Endpunktestands beeinflussen lässt. Die Darstellung ist unkorrigiert mit einem p -Wert von 0.001 und einer festgelegten Clustergröße von 23 Voxeln. (Erstellt mit SPM12)

5 Diskussion

In diesem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse dieser Studie mit denen der vorherigen Pilotstudie verglichen und dazu noch der Vergleich mit Literaturergebnissen gezogen. Es soll zunächst vor allem die Frage geklärt werden, ob die Hypothesenareale Aktivitäten gezeigt haben. Des Weiteren soll festgestellt werden, ob die obigen Ergebnisse die Ergebnissen der Pilotstudie replizieren und validieren können. Um daraufhin einordnen zu können wie dieses Paradigma zukünftig in der PTBS-Therapie zu nutzen sein können. Außerdem wird das Netzwerk hinsichtlich seiner Funktionen beschrieben, aber auch hinsichtlich des Spielkönnens verglichen und dahingehend die Frage beantwortet, ob sich mehr Erfahrung mit Computerspielen im Allgemeinen und dem Spiel Tetris im Besonderen einen Einfluss auf die Aktivierung des Netzwerks auswirkt.

5.1 Vergleich mit der Pilotstudie

Die Hauptzielsetzung dieser Studie ist die Darstellung eines Tetris Netzwerkes bei gesunden Proband:innen. Dafür wurde in der Arbeit 2024 ein neuartiges Paradigma ausgearbeitet, welches nun erneut in einer größeren Stichprobe getestet wurde, um das Paradigma und das damit bisherig ausgearbeitete Tetris Netzwerk zu replizieren, zu validieren und zu verfeinern (vgl. Kapitel 2.2).

Vergleicht man nun die Ergebnisse der Einzelebenen- und der Gruppenebenen Analyse dieser Studie miteinander, wird ein breites Tetris Netzwerk dargestellt. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Ebenen zeigen viele Ähnlichkeiten, aber auch ein paar wenige Unterschiede zueinander auf.

Die Ergebnisse der vorausgegangenen Pilotstudie von Grote im Jahre 2024 zeigte ebenfalls ein breites Netzwerk über die frontalen Bereiche bis hin zum Lobus parietalis. Dabei wurden Aktivitäten in Bereichen des Thalamus, des Hippocampus und der visuellen Verarbeitungsbereiche im Okzipitallappen hervorgehoben. Um einen Vergleich der Paradigma Testungen möglich zu machen, wurden die 2024 festgelegten Hypothesenareale nicht verändert. Somit wurden beide Studien nach denselben Kriterien ausgewertet.

Der präfrontale Cortex stellte das erste Hypothesenareal dar. Dabei lag das besondere Augenmerk auf den Arealen des IFG, des medial frontalen Kortex, des OFG und den FEF. Funktionell spielt dieses Hypothesenareal in vielen zu erwartenden Verarbeitungsnetzwerken eine nicht ganz unerhebliche Rolle. Im Allgemeinen stellt der PFC eine Art kognitive Kontrolle von mentalen Denkprozessen und deren Zuordnung zu aktuellen Zielsetzungen dar (Menon & D'Esposito, 2022). Sowohl in der Arbeit von Grote, 2024 sowie auch in diesem Experiment konnten Aktivierungen in diesem Hypothesenareal gefunden werden. Es wurden ebenso wie in der Pilotstudie Aktivierungen im IFG gefunden, genauer gesagt im IFG opercularis. Der pars opercularis ist funktionell als eigenständig zu betrachten, hinsichtlich der Imitation von Bewegungen aktiv (Molnar-Szakacs et al., 2005) und außerdem funktionell mit dem orofazialen Kortex verbunden (Greenlee et al., 2004). Hinsichtlich Tetris könnte man also bei dieser speziellen Aktivierung annehmen, dass hier die Verbindung zu dem Verarbeitungsnetzwerk zur Planung der Bewegungsprozesse gegeben ist. Auch Aktivierungen im MFC und damit ebenso Aktivierungen in den FEF sind gegeben. Obwohl die FEF einen funktionellen Bereich darstellen, welcher nicht anhand der anatomischen Grundlagen genau festzulegen ist (Chen et al., 2023; Kanwisher & Yovel, 2006), gehen wir hier aufgrund der maximalen und weitreichenden Aktivierung im SFC davon aus, dass die Ausstrahlungen dieses Clusters, ebenso wie in der Pilotstudie, in die Bereiche des PMC, des prä-SMA und der FEF reichen (Bedini et al., 2023; Sigl, 2018; Ruan et al., 2018). Einzig der OFC konnte nicht als Aktivierung gefunden werden. Dies stimmt allerdings erneut mit der Beobachtung aus der Pilotstudie überein und muss daher als Verfeinerung des Netzwerks nicht mehr weiter betrachtet werden.

Von besonderer Wichtigkeit hinsichtlich der Planung von Bewegungsprozessen stellten sich durch vorherige Literaturquellen das Kleinhirn sowie der PMC heraus. Cerebrale Aktivität konnte dort ebenso wie in der Pilotstudie festgestellt werden und neben der Aktivierung in den Kleinhirnhemisphären wurde auch eine signifikante Aktivierung im Kleinhirnwurm (Vermis cerebelli) entdeckt. Schon 2013 wurde das Kleinhirn mit samt dem Kleinhirnwurm mit der kognitiven Kontrolle im virtuellen Spiel in Verbindung gebracht, indem es anhand adaptiver Rückmeldungen die Denkprozesse und die darauf aufbauenden motorischen Funktionen kontrolliert (Rezakova et al., 2013). Hinsichtlich des Tetris Spiels könnte dies demnach bedeuten, dass die Veränderung der Blöcke im laufenden Spiel als adaptive Rückmeldung an das Kleinhirn weitergegeben werden und die geplanten Bewegungen hinsichtlich dieser Veränderungen angepasst werden können. Dies stimmt mit der Einschätzung überein, dass das Kleinhirn aufgrund vorheriger sensorischer Grundlagen Vorhersagen für zukünftige Veränderungen geben kann und motorische Feinschliffe auf dieser Grundlage vornehmen kann (Bennet & Reiner, 2022; Iacoboni, 2006; Wolpert et al., 1998). Die Aktivität im PMC beschränkt sich auf Aktivierungscluster in der SMA und ist laut Literatur besonders für die Koordination willkürlicher Bewegungen und die sensorische Weiterleitung wichtig (Agren et al., 2023; Bennet & Reiner, 2022; Inagaki et al., 2022; Mattar & Lengyel, 2022; Rietschel et al., 2012; Wolpert et al., 1998; Wong et al., 2015). Zusätzlich wurden in beiden Arbeiten in der Einzelebenenanalyse Aktivierungen im Precuneus gefunden, was darauf hindeutet, dass die Bewegungsprozesse auch durch dieses Gehirnareal kontrolliert werden könnten.

Hinsichtlich des Aufmerksamkeitsnetzwerkes wurde der Cinguläre Kortex als eines der Hypothesenareale benannt. Anders als durch Curtis & Sprague, 2021; Petersen & Posner, 2012 und Rahm et al., 2014 zu vermuten war, konnte jedoch, wie auch in der Pilotstudie zuvor, keine Aktivierung in diesem Bereich gefunden werden. Dennoch gaben die Proband:innen nach dem Experiment eine sehr positive Rückmeldung hinsichtlich ihrer Aufmerksamkeits- und Konzentrationsfähigkeit während des Spiels. Dementsprechend muss ein Aufmerksamkeitsnetzwerk arbeiten und wie bereits im Kapitel 2.3.2 thematisiert gibt es noch weitere Hirnregionen, die sich mit der Kodierung einkommender sensorischer Informationen und dessen Prioritätseinordnung befassen, um entscheiden zu können, auf welche Information die Aufmerksamkeit gerichtet werden sollte. Genannt wurden dabei speziell die Bereich der FEF, des PPC, ganz besonders des IPS. Man weiß bereits, dass die FEF stark mit dem IPS aber auch mit dem SPL verknüpft sind, ganz besonders hinsichtlich des Arbeitsgedächtnisses. Allerdings auch hinsichtlich des dorsalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes (DAN) (Grote, 2024), da der IPS funktionell die Aufgabe der Verarbeitung und dem Enkodierung einkommender sensorischer Informationen übernimmt und der PPC vor allem für die Verarbeitung visueller Informationen wichtig ist (Curtis & Sprague, 2021; Iacoboni, 2006; Inagaki et al., 2022; Rahm et al., 2014; Rietschel et al., 2012; Wong et al., 2015). Vergleicht man nun die Aktivierungsmuster der Gruppenanalyse hinsichtlich dieses Netzwerkes, zeigen sich Aktivitäten in allen genannten Regionen. Da diese Beobachtung ebenfalls in der vorherigen Testung gemacht wurde, kann man davon ausgehen, dass das Tetris Netzwerk das DAN als Aufmerksamkeitsnetzwerk beinhaltet. Bezüglich des Spiels bedeutet dies wahrscheinlich vor allem die freiwilligen Aufmerksamkeitswechsel vom aktiv fallenden Tetrimino zu der Vorschau der nächsten Tetriminos.

Ein Überblick über die Ergebnisse und den Vergleich der zwei Testungen zeigt, dass diese nachfolgende Arbeit die zuvor gefunden Ergebnisse sehr gut validiert. Interessanterweise gilt dies jedoch nicht hinsichtlich des letzten Hypothesenareals – des Hippocampus. Betrachtet man die Einzelanalysenergebnisse so fällt auf, dass es bei fast allen Proband:innen mindestens einen Aktivitätscluster im Hippocampus gibt. Bei den Proband:innen 11, 22 und 30 sind nur Aktivitätscluster in Parahippocampalen Bereichen zu finden und bei den Proband:innen 14, 29 und 38 sind weder im Hippocampus noch in Parahippocampalen Bereichen Aktivierungscluster zu finden. Die Koordinaten der Aktivierungen der einzelnen Proband:innen betreffen jedoch nicht alle den gleichen Bereich, sodass vermutlich kein einheitliches Cluster entstanden ist, welches man in der Gruppenanalyse hätte sehen können (vgl. Anhang Tab. 4, re.). Festzuhalten ist daher, dass es eine Aktivierung dieses Hypothesenareals gibt, dieses jedoch anders als zuvor gedacht keinen einheitlichen Bereich dieses Gehirnabschnitts betrifft, sondern sich die lokalen Maxima individuell räumlich voneinander unterscheiden. Daher kann kein einheitliches Aktivierungscluster bei einer voxelbasierten Analyse in der Gruppenebene dargestellt werden. Hinsichtlich des Spiels ist die Aktivität trotz der individuellen Unterschiede wahrscheinlich auf die Verknüpfung zum räumlichen Arbeitsgedächtnisses zurückzuführen. In dem Fall könnte der Hippocampus funktionell dafür sorgen, dass sich die Proband:innen die Position der Steine im Spielfeld merken können und die Einordnung der neuen Tetriminos mit bereits bekannten Strategien aus dem episodischen Gedächtnis verknüpft werden (Curtis & Sprague, 2021; Duvernoy, 2005; Daume et al., 2024; Hallenbeck et al., 2021; Pearson, 2019).

Rückblickend lässt sich der Vergleich damit abschließen, dass die in der Pilotstudie gefundenen Aktivierungscluster validiert und repliziert werden konnten. Allerdings sind Unterschiede in der Größe der Cluster zu erkennen, welche sich jedoch leicht mit der Stichprobengröße erklären lassen und Verfeinerungen des Tetris Netzwerkes nötig. Erwartete Aktivitäten, die weder in der Pilotstudie noch in dieser Studie gefunden werden konnten, sollten in weiterführenden Studien nicht ins Tetris Netzwerk mit einbezogen werden. Diese Verfeinerungen umfassen den Cingulären Cortex, Teile des PFC sowie den OFC. Auch bei dem Hippocampus konnten Unterschiede festgestellt werden, da die

Einzelanalyse jedoch bis auf ein paar Ausnahmen Aktivierungen gezeigt hat und diese eventuell durch Artefakte so versetzt wurden, dass die Überlagerungen der Einzelanalysen keine gemeinsamen Voxel erkennen konnte, sollte diese Region weiterhin als Teil des Netzwerkes betrachtet werden.

5.2 Beeinflussung des Aktivitätsmusters durch das Spielkönnen

Die Hypothese der Beeinflussung des Aktivitätsmusters basiert auf dem Gedanken, dass Spieler:innen mit unterschiedlichen Erfahrungswerten sich in ihrer neuronalen Aktivität unterscheiden könnten. Da sie zum einen die Spielbedingungen schon besser kennen und auch mit dem großen visuellen Input des Spiels vertraut sind und da sie zum anderen auf bereits gelernte Spielstrategien zurückgreifen könnten, welche dann ebenfalls aktiv im Arbeitsgedächtnis gehalten werden müssten. Es wurde auf Grund dieser Überlegungen eine explorative Analyse durchgeführt die sich mit den erreichten Punkteständen als Maß für das Können der einzelnen Proband:innen befasst.

Die Ergebnisse zeigten eine Veränderung in der Gehirnregion des Precuneus mit einer deutlichen rechtsseitigen Lateralisierung. Die Gehirnregion des Precuneus ist in der Auswertung der Gruppenanalyse als kein Aktivitätscluster zu erkennen und daher liegt diese Veränderung hinsichtlich des Können der Spieler:innen auf den ersten Blick außerhalb des Tetris Netzwerks. Wenn man diese Ergebnisse allerdings einmal mit den Ergebnissen der Einzelebenen Analyse vergleicht, so wird deutlich, dass der Precuneus bei individueller Betrachtung bei allen Proband:innen bis auf Proband:innen 13 und 24 mindestens ein, meist mehrere, signifikante Aktivitätscluster zeigt (vgl. Anhang Tab. 4, li.). Ebenso wie bei der Betrachtung des Hippocampus könnte es auch bei dem Bereich des Precuneus durch Verschiebungen der Aktivitäten dazu kommen das die aktivierten Voxel in der Gruppenanalyse nicht überlappen und daher kein signifikantes Cluster in der Gruppenebene zu sehen ist, obwohl eine Aktivierung dieses Bereichs bei dem Spiel vorliegt.

Anatomisch gesehen liegt der Precuneus zwischen visuellen und sensomotorischen Regionen und lange Zeit galt die Verarbeitung von visuellen und sensomotorischen Informationen als die einzige Funktionalität dieser Region. Durch neue Ansätze wurde jedoch bewiesen, dass der Precuneus einen hoch funktionelle Knoten darstellt, welcher für komplexe kognitive Funktionen wichtig zu sein scheint. Darunterfallen zum einen die Verknüpfung mit dem episodischen Gedächtnis und der Theory of Mind und zum anderen eine Verknüpfung mit der Aktualisierung und der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses (Dadario & Sughrue, 2023). Es könnte demnach tatsächlich eine Region sein, die durch unterschiedliche Erfahrungswerte auf verschiedene Strategien aus dem episodischen Gedächtnis zurückgreifen könnte, um diese im Arbeitsgedächtnis abrufen zu können. Trotzdem müssen wir zunächst davon ausgehen, dass die Beeinflussung der Precuneus Aktivität auf der rechten Seite so gering ist, dass keine Änderungen des Tetris Netzwerkes hinsichtlich Spielerfahrungen zu erkennen sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend kann man sagen, dass das Tetrix Paradigma auch in einer größeren Stichprobe ein konsistentes neuronales Netzwerk anspricht, welches wiederum einzelne Netzwerke wie Aufmerksamkeit, kognitive Kontrolle und Planung von Bewegungen sowie adaptive und motorische

Änderungen beinhaltet. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Pilotstudie, wodurch die Funktionalität des Paradigmas als repliziert und validiert angesehen werden kann.

Wiederholt nicht nachgewiesene Areale wie der orbitofrontale Kortex und der Cinguläre Kortex sollten in weiteren Anwendungen des Tetrix Paradigmas nicht mehr als Teil des Tetris Netzwerkes angesehen werden.

Spezielle Ergebnisse, die nur auf der Einzelebene gefunden wurden, sich in der Gruppenanalyse durch voxelbasierte Analysen nicht durchsetzen konnten, wie es bei dem Hippocampus und dem Precuneus der Fall war konnten noch nicht abschließend und umfassend geklärt werden. Es wurde deutlich, dass diese Gehirnregionen in der Konjunktionsanalyse auf Einzelebene Aktivitäten zeigen und demnach eine Signifikanz aufzeigen, sich diese jedoch, durch die individuellen Unterschiede, nicht als konsistente Aktivierung in der Second Level Analyse abbilden lässt. In Zukünftigen Analysen sollten diese Areale nicht von der Betrachtung ausgeschlossen werden, sondern viel mehr eine Augenmerk darstellen, um mehr Informationen über die Beteiligung dieser Areale am Tetris Netzwerk zu erfahren. Durch ROI-basierte Analysen könnte man beispielsweise die räumlich individuellen Aktivierungen als Gesamtsignal darstellen.

Explorativ lässt sich dementsprechend die Hypothese aufstellen, dass sich das Spielkönnen auf die Aktivierung des Precuneus auswirken könnte. Auch wenn die beobachteten Effekte keine konsistente Wirkung auf Gruppenebene zeigten, könnte dieses Areal in Zusammenhang mit bereits erlernten Strategien und dem Rückgriff erfahrener Spieler:innen darauf stehen.

Zusammenfassend empfiehlt sich für zukünftige Studien ROI-basierte Analysen der Bereiche des Hippocampus und des Precuneus anzustreben, um offene Fragen zu beantworten und eventuell die spekulativen Hypothesen validieren zu können.

Hinsichtlich der Nutzung im klinischen Aspekt ist zu sagen, dass das Paradigma bei gesunden Proband:innen ein klares weitreichendes Netzwerk aufzeigt, welches die kognitive Komplexität des Spiels widerspiegelt. Des Weiteren wurden die erwarteten Netzwerke als Aktivierungscluster gefunden und daher kann angenommen werden, dass die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses durch die Teilnahme an dem Tetris Spiel voll ausgelastet wird. Die Rekonsolidierungsprozesse der traumatischen Erfahrungen, welche den Zielpunkt im Therapieansatz darstellen, können durch die ausgelastete Kapazität des Arbeitsgedächtnis durch Spielstrategien und die aktive Aufrechterhaltung sensorischen Inputs tatsächlich überschrieben werden. In der Anwendung der PTBS-Therapie, sollte Tetris demnach zeitnah nach der Konfrontation mit den traumatischen Erfahrungen, innerhalb der Therapiesitzung, gespielt werden. Da die traumatischen Erfahrungen direkt nach der Konfrontation durch eine angeleitete Wiederholung der Situation im Arbeitsgedächtnis aktiv gehalten werden, die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses dann jedoch durch das Spiel gebraucht wird, werden die vorherig aktiv gehaltenen Informationen verdrängt, wodurch die Flashbacks der Patient:innen verringert werden können.

Als Fazit kann man demnach festhalten, dass das Tetrix Paradigma hinsichtlich klinischer Aspekte und als Therapieansatz verwendet werden kann, allerdings ist noch nicht geklärt, ob und inwiefern sich das Tetris Netzwerk bei Proband:innen mit einer Erkrankung an PTBS von dem der gesunden Proband:innen unterscheidet.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der kanonischen hämodynamischen Antwort (HRF). Beispielhafte Modellierung der BOLD-Antwort nach neuronaler Aktivität. (Erstellt mit SPM12) S. 11

Abbildung 2: Überblick über die verschiedenen Experimentellen Designs (Petersen & Dubis, 2012) S. 12

Abbildung 3: Darstellung der Zeichen einzelner Aufgaben in der fMRT Studie. (li. Hauptaufgabe Tetris spielen; re. die 3 Kontrollbedingungen Tetrispiel zuschauen, Tasten drücken und ein Kreuz fixieren.) S. 14

Abbildung 4: Übersicht über den Ablauf der Messung mit Hilfe des Paradigmas im MRT-Scanner. Graue Felder: Kernprogrammierungen (nicht herausnehmbar, Pause anpassbar), Grüne Felder: Instruktionen, Blaue Felder: Spielzeiten (nur bei Main Part eine MRT-Messung) Paradigma von Grote, J. (2024) S. 15

Abbildung 5: Ein Überblick der selbsteingeschätzten Erfahrungswerte der einzelnen Proband:innen hinsichtlich Ihrer Kenntnisse in Computerspielen allgemein. Die Proband:innen haben auf einer Skala von 1-10 bewertet (Skala 1-10, 1 = gar keine Erfahrung; 10 = tägliches Spielen). (Erstellt mit Microsoft Excel) S. 22

Abbildung 6: Ein Überblick über die Selbsteinschätzungen der Proband:innen hinsichtlich ihrer Erfahrung speziell mit Tetris. Auch hier konnten die Proband:innen auf einer Skala von 1-10 bewerten. (Skala 1-10, 1 = gar nicht/ noch nie gespielt, 10 = tägliches Spielen). (Erstellt mit Microsoft Excel) S. 23

Abbildung 7: Zuteilung der Level über die Daten der 30 Proband:innen Daten hinweg, die für die folgenden Analysen genutzt werden. (Erstellt mit Microsoft Excel) S. 24

Abbildung 8: Exemplarische Ansicht der First Level Analyse anhand der Proband:in 12. Ein weit ausgedehtes Netzwerk verbreitet über verschiedene Areale des gesamten Gehirns ist dargestellt. Die hier dargestellten T-Werte sind mit 0,05 FWE korrigiert und mit einem externen Threshold von 0 versehen. Die Abbildung wurde mit der SPM12 Software und dem SPM Einzelpersonen MNI Template gemacht. S. 25

Abbildung 9: Überblick über die detektierten Cluster der Proband:in 12 (PFWE >0,05) in einem korrigierten und einem unkorrigierten Zustand (p-Werte). Angeordnet sind die Werte nach den absteigenden t-Werten der Cluster. S. 26

Abbildung 10: Darstellung der Aktivitäten der Gruppenanalyse mit einer 0,05 FWE-Korrektur und einem Threshold von 0. Das Aktivierungsmuster zeigt das Tetris Netzwerk, mit den neuronal aktiven Arealen. Die seitliche Skala stellt die Legende für die Verteilung der T-Werte als farbige Aktivierungen dar. Die Abbildung wurde mit MRICroGL erstellt. (Rordon, 2025). S. 27

Abbildung 11: Tabelle der Aktivierungsmuster aller Proband:innen verglichen auf Gruppenebene mit einem Konjunktionskontrast Tetris>Baseline und Tetris> Visuelle Kontrolle und Tetris> Motor Kontrolle mit einem korrigierten p-Wert von > 0.05 und einem Theshold von 0. Die obige Tabelle der statistischen Karte sowie auch die untere Tabelle zur Clusterverteilung wurden in der SPM12 Software mithilfe der AAL3 Toolbox erstellt. S. 28

Abbildung 12: Überblick über die durch den parametrischen Regressor, in ihrer neuronalen Aktivität, beeinflussten Areale. Die Darstellung ist unkorrigiert mit einem p-Wert von 0.001 und einer festgelegten Clustergröße von 10 Voxeln. (Erstellt mit SPM12 und des AAL3 Atlases.) S. 29

Abbildung 13: Abbildung der Areale die durch den parametrischen Regressor beeinflusst werden. Die Darstellung ist unkorrigiert mit einem p-Wert von 0.001 und einer festgelegten Clustergröße von 10 Voxeln. (Erstellt mit SPM12) S. 30

Abbildung 14: Designmatrix der multiplen Regressionsanalyse hinsichtlich des faktoriellen Designs. S. 31

Abbildung 15: Aktivierungsmuster das sich hinsichtlich der Betrachtung des Endpunktestands beeinflussen lässt. Die Darstellung ist unkorrigiert mit einem p-Wert von 0.001 und einer festgelegten Clustergröße von 23 Voxeln. (Erstellt mit SPM12) S. 32

Abbildung 16: RStudio Skript zur Programmierung eines linearen Regressionsmodells zur Einschätzung der Beeinflussung der Endpunktestände durch die Prädiktoren Level und Geschwindigkeit. S. 49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Proband:innen Daten. Nachfrage nach Händigkeit zur Einstellung der Responsebox und Frage nach Seh- oder Farbschwächen als mögliche Ausschlusskriterien. Proband:in 36 wurde aus der Studie exkludiert. S. 44

Tabelle 2: Übersicht über die Antworten des Fragebogens vor der fMRT-Messung. Die Händigkeit wurde durch Fragen bestimmt, bei denen die Proband:innen beispielsweise gefragt wurden mit welcher Hand sie einen Box Deckel entfernen würden. Selbsteinschätzungen hinsichtlich Erfahrungen in Computerspielen und mit Tetris, sowie die Einschätzung der Leistungsfähigkeit wurden auf einer Skala von 1-10 bewertet, wobei 1 das niedrigste und 10 das höchste Ranking darstellte. S. 45

Tabelle 3: Übersicht der Antworten des Fragebogen nach der fMRT-Messung. Alle Fragestellungen sollten auf einer Skala von 1-10 bewertet werden, wobei 1 das niedrigste und 10 das höchste Ranking darstellte. S. 46

Tabelle 4: Übersicht über die Koordinaten der Aktivitätscluster in der Einzelebenen Analyse (re. Koordinaten der Aktivierungen im Bereich des Hippocampus; li. Koordinaten der Aktivierungen im Bereich des Precuneus) S. 47

Tabelle 5: Übersicht über die Differenzen der Punktestände zwischen den Spielrunden einzelner Proband:innen. S. 48

Literaturverzeichnis

KI-Tool ChatGPT wurde lediglich für stilistische Hilfestellungen verwendet.

Agren, T., Hoppe, J. M., Singh, L., Holmes, E. A., Rosén, J. (2023). The neural basis of Tetris gameplay: implicating the role of visuospatial processing. *Current Psychology*, 42(10), 8156–8163. <https://doi.org/10.1007/s12144-021-02081-z>

Ashburner J., Barnes G., Chen C.C., Daunizeau J., Flandin G., Friston K., Gitelman D., Glauche V., Henson R., Hutton C., Jafarian A., Kiebel S., Kilner J., Litvak V., Mattout J., Moran R., Penny W., Phillips C., Razi A., Stephan K., Tak S., Tyrer A., Zeidman P. (2021). SPM12 Manual. Functional Imaging Laboratory, London. https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/spm12_manual.pdf

- Bedini, M., Olivetti, E., Avesani, P., Baldauf, D. (2023). Accurate localization and coactivation profiles of the frontal eye field and inferior frontal junction: An ALE and MACM fMRI meta-analysis. *Brain Structure and Function*, 228(3-4): 997–1017. <https://doi.org/10.1007/s00429-023-02641-y>
- Benjamin Marian Sigl. (2018). *Zytoarchitektur, Netzwerke und Funktionen der Areale des menschlichen dorsolateralen prämotorischen Kortex: Komponenten motorischer Planung und Kandidat für das Frontale Augenfeld*. <https://d-nb.info/1160441839/34>
- Bennet, R., Reiner, M. (2022). Shared mechanisms underlie mental imagery and motor planning. In *Scientific Reports*, 12(1), 2947. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06800-9>
- Birbaumer N., Schmidt R. F. (2010). *Biologische Psychologie*. Heidelberg Springer Medizin Verlag, 7. ISBN-13 978-3-540-95937-3
- Bolognini, N., Maravita, A. (2007). Proprioceptive Alignment of Visual and Somatosensory Maps in the Posterior Parietal Cortex. In *Current Biology*, 17: 1890 – 1895. [https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(07\)02020-9?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982207020209%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(07)02020-9?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982207020209%3Fshowall%3Dtrue)
- Brühl A., Heinrichs N., Bernstein E. E., McNally R. J. (2019). Preventive efforts in the aftermath of analogue trauma: The effects of Tetris and exercise on intrusive images. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry* 64: 31-35. <https://doi.org/10.1016/j.jbtep.2019.01.004>
- Butler O., Herr K., Willmund G., Gallinat J., Kühn S., Zimmermann P. (2020). Trauma, treatment and Tetris: video gaming increases hippocampal volume in male patients with combat-related posttraumatic stress disorder. In *Journal Psychiatry Neuroscience* 45(4): 279-287. DOI: 10.1503/jpn.190027. <https://www.jpn.ca/content/45/4/279.long>
- Curtis, C. E., & Sprague, T. C. (2021). Persistent Activity During Working Memory From Front to Back. *Frontiers in Neural Circuits*, 15, 696060. <https://doi.org/10.3389/fncir.2021.696060>
- Dadario, N. B., Sughrue M. E. (2023). The functional role of the precuneus. In *Brain*, 146(9): 3598 – 3607. <https://doi.org/10.1093/brain/awad181>
- Daume, J., Kamiński, J., Schjetnan, A. G. P., Salimpour, Y., Khan, U., Kyzar, M., Reed, C. M., Anderson, W. S., Valiante, T. A., Mamelak, A. N., Rutishauser, U. (2024). Control of working memory by phase-amplitude coupling of human hippocampal neurons. In *Nature* 629, 393-401. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07309-z>
- Dores, A. R., Barbosa, F., Carvalho, I. P., Almeida, I., Guerreiro, S., Da Rocha, B. M., De Sousa, L., & Castro-Caldas, A. (2017). Study of behavioural and neural bases of visuo-spatial working memory with an fMRI paradigm based on an n-back task. In *Journal of Neuropsychology*, 11(1), 122–134. <https://doi.org/10.1111/jnp.12076>
- Duvernoy, H. M. (2005). *The human hippocampus: functional anatomy, vascularization and serial sections with MRI*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-27077-9_3.pdf
- Eichenbaum, H. (2017). Prefrontal–hippocampal interactions in episodic memory. *Nature Review Neuroscience*, 18: 547 - 558. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.74>

- Esteban O., Birman D., Schaer M., Koyejo O.O., Poldrack R.A., Gorgolewski K.J. (2017). MRIQC: Advancing the automatic prediction of image quality in MRI from unseen sites. *PLoS ONE* 12(9): e0184661. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184661>
- fMRI-Prep. (2016). *fMRIPrep: A Robust Preprocessing Pipeline for fMRI Data*. <https://fmriprep.org/en/stable/>
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Price, C. J., Büchel, C., Worsley, K. J. (1999). Multisubject fMRI Studies and Conjunction Analyses. In *NeuroImage*, 10(4): 385 – 396. <https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0484>
- Ganis, G., Thompson, W. L., Kosslyn, S. M. (2004). Brain areas underlying visual mental imagery and visual perception: an fMRI study. In *Cognitive Brain Research*, 20(2): 226-241. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.02.012>
- Greenlee, J. D. W., Oya, H., Kawasaki, H., Volkov, I. O., Kaufman O. P., Kovach, C., Howard, M. A., Brugge, J. F. (2004). A functional connection between inferior frontal gyrus and orofacial motor cortex in human. In *Journal of neurophysiology*, 92(2), 1153–1164. <https://doi.org/10.1152/jn.00609.2003>
- Grote, J. (2024). Tetrix: A novel Tetris Paradigm for Application in cognitive Research. Bachelorarbeit, Philipps Universität Marburg
- Hagenaars, M. A., Holmes, E. A., Klaassen, F., Elzinga, B. (2017). Tetris and Word games lead to fewer intrusive memories when applied several days after analogue trauma. *European journal of psychotraumatology*, 8(1), 1386959. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20008198.2017.1386959>
- Hallenbeck, G. E., Sprague, T. C., Rahmati, M., Sreenivasan, K. K., Curtis, C. E. (2021). Working memory representations in visual cortex mediate distraction effects. In *Nature Communications*, 12(1), 4714. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24973-1>
- Harrison, S. A., Tong, F. (2009). Decoding reveals the contents of visual working memory in early visual areas. *Nature*, 458(7238), 632–635. <https://doi.org/10.1038/nature07832>
- Holmes, E. A., James, E. L., Coode-Bate, T., Deeprose, C. (2009). Can playing the computer game "Tetris" reduce the build-up of flashbacks for trauma? A proposal from cognitive science. *PLOS ONE*, 4(1), e4153. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004153>
- Holmes, E. A., Kilford E.J., Deeprose, C. (2010). Key Steps in Developing a Cognitive Vaccine against Traumatic Flashbacks: Visuospatial Tetris versus Verbal Pub Quiz. *PLoS ONE*, 5(11), e13706. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0013706>
- Iacoboni, M. (2006). Visuo-motor integration and control in the human posterior parietal cortex: Evidence from TMS and fMRI. In *Neuropsychologia*, 44(13), 2691-2699. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.04.029>
- Inagaki, H. K., Chen, S., Daie, K., Finkelstein, A., Fontolan, L., Romani, S., Svoboda, K. (2022). Neural Algorithms and Circuits for Motor Planning. In *Annual Review of Neuroscience*, 45, 249–271. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-092021-121730>
- Iyadurai L., Blackwell S. E., Meiser-Stedman R., Watson P. C., Bonsall M. B., Geddes J. R., Nobre A. C., Holmes E. A. (2018). Preventing intrusive memories after trauma via a brief intervention involving Tetris computer game play in the emergency department: a proof-of-concept randomized controlled trial, In *Molecular Psychiatry* 23: 674-682. <https://www.nature.com/articles/mp201723>

- James E. L., Bonsall M. B., Hoppitt L., Tunbridge E.M., Geddes J. R., Milton A. L., Holmes E. A. (2015). Computer Game Play Reduces Intrusive Memories of Experimental Trauma via Reconsolidation-Update Mechanisms. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0956797615583071>
- Jensen, K. T., Hennequin, G., Mattar M. G. (2024). A recurrent network model of planning explains hippocampal replay and human behavior. In *Nature Neuroscience*, 27: 1340 -1348. <https://doi.org/10.1038/s41593-024-01675-7>
- Kamiński, J., Sullivan, S., Chung, J. M., Ross, I. B., Mamelak, A. N., & Rutishauser, U. (2017). Persistently active neurons in human medial frontal and medial temporal lobe support working memory. In *Nature Neuroscience*, 20(4), 590–601. <https://doi.org/10.1038/nn.4509>
- Kessler H., Schmidt A.C., James E. L., Blackwell S. E., Von Rauchhaupt M., Harren K., Kehyayan A., Clark I. A., Sauvage M., Herpertz S., Axmacher N., Holmes E. A. (2020). Visuospatial computer game play after memory reminder delivered three days after a traumatic film reduces the number of intrusive memories of the experimental trauma. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.jbtep.2019.01.006>
- Kircher, T., Gauggel, S. (2008). *Neuropsychologie der Schizophrenie – Symptome, Kognition, Gehirn*. Heidelberg: Springer (Hrsg.): S. 20;26
- Lau-Zhu A., Holmes E. A., Butterfield S., Holmes J. (2017). Selective Association Between Tetris Game Play and Visuospatial Working Memory: A Preliminary Investigation, In *Applied Cognitive Psychology* 31: 438-445. <https://doi.org/10.1002/acp.3339>
- Maercker A., Augsburger M. (2020) *Posttraumatische Belastungsstörungen – PTBS und KPTBS: Ein Leitfaden für die Diagnostik und Behandlung*, Stuttgart: W. Kohlhammer: S. 13-18; 24-27; 33-38; 57-60
- Maercker, A., Hecker T., Augsburger M., Kliem S. (2018) ICD-11 Prevalence Rates of Posttraumatic Stress Disorder and Complex Posttraumatic Stress Disorder in a German Nationwide Sample. *Journal of Nervous and Mental Disease* 206(4): 270–276. doi: 10.1097/NMD.000000000 00000790. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29377849/>
- Majdandzić, J., Grol, M. J., van Schie, H. T., Verhagen, L., Toni, I., Bekkering, H. (2007). The role of immediate and final goals in action planning: An fMRI study. In *NeuroImage*, 37(2), 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.04.071>
- Mattar, M. G., Lengyel, M. (2022). Planning in the brain. *Neuron*, 110(6), 914–934. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.12.018>
- Menon, V., D'Esposito, M. (2022). The role of PFC networks in cognitive control and executive function. In *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 47(1), 90–103. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01152-w>
- Molnar-Szakacs, I., Iacoboni, M., Koski, L., Mazziotta, J. C. (2005). Functional Segregation within Pars Opercularis of the Inferior Frontal Gyrus: Evidence from fMRI Studies of Imitation and Action Observation. In *Cerebral Cortex*, 15(7): 986–994. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh199>
- Pearson J., Naselaris T., Holmes E.A., Kosslyn S.M. (2015). Mental Imagery: Functional Mechanisms and Clinical Applications. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 590 – 602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.08.003>
- Pearson, J. (2019). The human imagination: The cognitive neuroscience of visual mental imagery. In *Nature Reviews Neuroscience*, 20, 624–634. <https://doi.org/10.1038/s41583-019-0202-9>

- Petersen, S. E., Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. In *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73–89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- PLAYSTUDIOS INC. (2024, July 10). Scoring in Tetris® — Tetris Mobile Help Center. <https://playstudios.helpshift.com/hc/en/16-tetris-mobile/faq/2437-scoring-in-tetris/?p=ios>
- Pollmann, S., Noesselt, T. (2023). Funktionelle MRT – Grundlagen, Experimentaldesign und Datenanalyse. Springer Verlag (Hrsg.)
- Posner, M. I., Petersen, S. E., Fox, P. T., Raichle, M. E. (1988). Localization of cognitive operations in the human brain. *Science* (New York, N.Y.), 240(4859), 1627–1631. <https://doi.org/10.1126/science.3289116>
- Posner, M. I., Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Poldrack, R.A., Mumford J.A., Nichols T.E. (2011). *Handbook of functional MRI Data Analysis*. Cambridge University Press, New York.
- Provins C., MacNicol E., Seeley S.H., Hagmann P. and Esteban O. (2023). Quality control in functional MRI studies with MRIQC and fMRIPrep. *Front. Neuroimaging* 1:1073734. doi: 10.3389/fnimg.2022.1073734. <https://www.frontiersin.org/journals/neuroimaging/articles/10.3389/fnimg.2022.1073734/full#supplementary-material>
- PsychoPy (2002): <https://www.psychopy.org/>
- Ptak R. (2012). The frontoparietal attention network of the human brain: action, saliency, and a priority map of the environment. *The Neuroscientist: a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 18(5), 502–515. <https://doi.org/10.1177/1073858411409051>
- Rahm, B., Kaiser, J., Unterrainer, J. M., Simon, J., Bledowski, C. (2014). fMRI characterization of visual working memory recognition. In *NeuroImage*, 90, 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.017>
- Rezakova, M. V., Mazhirina, K. G., Pokrovskiy, M. A., Savelov, A. A., Savelova, O. A., Shtark, M. B. (2013). Dynamic Mapping of Brain and Cognitive Control of Virtual Gameplay (Study by Functional Magnetic Resonance Imaging). In *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 154: 706 – 710. <https://doi.org/10.1007/s10517-013-2035-2>
- Rietschel, J. C., Miller, M. W., Gentili, R. J., Goodman, R. N., McDonald, C. G., Hatfield, B. D. (2012). Cerebral-cortical networking and activation increase as a function of cognitive-motor task difficulty. In *Biological Psychology*, 90(2), 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2012.02.022>
- Rorden, C. (2025). MRICroGL: voxel-based visualization for neuroimaging. In *Nature Methods*, 22: 1613–1614. <https://doi.org/10.1038/s41592-025-02763-7>
- Ruan, J., Bludau, S., Palomero-Gallagher, N., Caspers, S., Mohlberg, H., Eickhoff, S. B., Seitz, R. J., Amunts, K. (2018). Cytoarchitecture, probability maps, and functions of the human supplementary and pre-supplementary motor areas. In *Brain Structure and Function*, 223(9). 4169–4186. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1738-6>
- Schneider, F., Fink G. R. (Hrsg.). (2007). *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*. Heidelberg: Springer.

Svoboda, K., Li, N. (2018). Neural mechanisms of movement planning: motor cortex and beyond. In *Current Opinion in Neurobiology*, 49: 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2017.10.023>

Tetris (2025): <https://tetris.com/about>

Van Asselen M., Kessels R. P. O., Neggers S. F. W., Kappelle L. J., Frijns C. J. M., Postma A. (2006). Brain areas involved in spatial working memory. In *Neuropsychologia*, 44(7): 1185 – 1194. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.005>

WHO (World Health Organization) (2018). ICD-11 for Mortality and Morbidity Statistics. <https://icd.who.int/browse/2025-01/mms/en#2070699808>

Wolpert, D. M., Miall, R. C., Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. In *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 338–347. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)

Wong, A. L., Haith, A. M., Krakauer, J. W. (2015). Motor Planning. In *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry*, 21(4), 385-398. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1073858414541484>

Bildreferenzen

Abbildung 2: Petersen S. E., Dubis J. W. (2012). The mixed block/event-related design. *NeuroImage*.62(2): 1177-1184. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.084>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1053811911011608?via%3Dihub>

Abbildung 4: Grote, J. (2014). Tetrix: A novel Tetris Paradigm for Application in cognitive Research. Bachelorarbeit, Philipps Universität Marburg

Anhang

Proband:innen Daten

Tabelle 1: Übersicht über die Proband:innen Daten. Nachfrage nach Händigkeit zur Einstellung der Responsebox und Frage nach Seh- oder Farbschwächen als mögliche Ausschlusskriterien. Proband:in 36 wurde aus der Studie exkludiert.

ID	Datum	Geschlecht	Alter	Händigkeit	Seh-schwäche	Farbseh-schwäche	Kommentar
8	13.11.24	w	26	rechts	kurzsichtig -1.5 dpt	/	länger auf Grund von Problemen mit Brille und Liegeposition
9	14.11.24	m	22	rechts	Brille -1.0 dpt	/	Kleinhirn abgeschnitten
10	14.11.24	w	27	rechts	/	/	/
11	14.11.24	w	19	rechts	kurzsichtig -1.5 dpt	/	/
12	14.11.24	m	25	rechts	kurzsichtig -4.5/-4.0 dpt	/	/
13	04.12.24	w	23	rechts	/	/	/
14	14.11.24	m	23	rechts	kurzsichtig -7.5 /-8.0 dpt (li/re)	/	/
15	04.12.24	w	27	rechts	kurzsichtig -3 dpt	/	/
16	04.12.24	m	31	rechts	kurzsichtig -6 dpt	/	/
17	04.12.24	m	20	rechts	/	/	Messung musste 2. tes mal gestartet werden
18	04.12.24	w	20	rechts	/	/	Messung musste 2. tes mal gestartet werden
19	04.12.24	m	22	rechts	/	/	/
20	04.12.24	w	23	rechts	/	/	T1 verwackelt, musste wiederholt werden
21	05.12.24	w	25	links	kurzsichtig -1.5 dpt bds	/	/
22	05.12.24	w	22	links	/	/	/
23	05.12.24	m	28	rechts	/	/	/
24	05.12.24	m	29	rechts	kurzsichtig -1.0 dpt	/	/
25	05.12.24	w	22	rechts	kurzsichtig -2.5 dpt	/	/
26	05.12.24	w	31	rechts (beidhändig)	/	/	/
27	05.12.24	m	37	rechts	/	/	/
28	11.12.24	m	20	rechts	Brille (kurzsichtig) -4.5 dpt -4.25 dpt	/	keine Pretrialmessung außen
29	11.12.24	m	31	rechts	/	/	/
30	22.01.25	m	37	rechts	kurzsichtig - 3 dpt beidseitig	/	weiche Kontaktlinsen
31	22.01.25	w	36	rechts	kurzsichtig -3 dpt rechts -2.5 dpt links	/	weiche Kontaktlinsen
32	22.01.25	m	36	links	kurzsichtig -0,75 dpt beidseitig	/	/
33	22.01.25	m	44	rechts	/	Rot-Grün-Schwäche	/
34	30.01.25	w	40	rechts	kurzsichtig -3,5 dpt links -5,25 dpt rechts	/	weiche Kontaktlinsen
35	05.02.25	w	36	rechts	/	/	/
36 (exkl.)	05.02.25	w	39	rechts	/	/	/
37	19.02.25	w	36	rechts	weitsichtig 1,7 dpt 2,0 dpt	/	Brustkrebs in Vergangenheit
38	19.02.25	w	37	rechts	/	/	/

Tabelle 2: Übersicht über die Antworten des Fragebogens vor der fMRT-Messung. Die Händigkeit wurde durch Fragen bestimmt, bei denen die Proband:innen beispielsweise gefragt wurden mit welcher Hand sie einen Box Deckel entfernen würden. Selbsteinschätzungen hinsichtlich Erfahrungen in Computerspielen und mit Tetris, sowie die Einschätzung des Leistungsfähigkeit wurden auf einer Skala von 1-10 bewertet, wobei 1 das niedrigste und 10 das höchste Ranking darstellte.

Subjekt ID/ Fragen	biologisches Geschlecht	Alter	Selbsteingeschätzte Erfahrung mit Computerspielen	Spezielle Erfahrungen mit Tetris	Level Zuteilung	Endpunkte- stand	Selbsteinschätz- ung zur Leistungsfähig- keit am Tag der Studie	Händigkeit
8	w	26	2	2	1	736	2	rechts
9	m	22	4	1	3	7641	5	rechts
10	w	27	5	4	4	18428	8	rechts
11	w	19	5	4	5	29885	8	rechts
12	m	25	2	2	6	27714	6	rechts
13	w	23	1	2	2	4786	5	rechts
14	m	23	7	3	6	26196	10	rechts
15	w	27	6	7	5	36930	9	rechts
16	m	31	10	2	8	40976	6	rechts
17	m	20	7	6	5	30555	8	rechts
18	w	20	5	3	3	9729	6	rechts
19	m	22	3	3	2	5566	7	rechts
20	w	23	1	1	2	5072	7	rechts
21	w	25	5	5	4	26484	8	links
22	w	22	3	3	4	13504	9	links
23	m	28	5	6	4	48008	8	rechts
24	m	29	6	3	3	10950	4	rechts
25	w	22	2	1	3	5445	7	rechts
26	m	31	6	5	6	93096	4	links/rechts
27	m	37	3	2	3	14697	8	rechts
28	m	20	7	2	4	23388	8	rechts
29	m	31	4	4	3	6132	7	rechts
30	m	37	6	5	6	38652	7	rechts
31	w	36	2	2	5	22655	5	rechts
32	m	36	5	4	5	34700	7	links
33	m	44	3	6	5	31110	7	rechts
34	w	40	2	2	6	50820	3	rechts
35	w	36	5	5	5	19230	7	rechts
36 (exkl.)	w	39	3	3	4	11048	7	rechts
37	w	36	6	3	3	20316	7	rechts
38	w	37	5	4	6	40518	7	rechts

Tabelle 3: Übersicht der Antworten des Fragebogen nach der fMRT-Messung. Alle Fragestellungen sollten auf einer Skala von 1-10 bewertet werden, wobei 1 das niedrigste und 10 das höchste Ranking darstellte.

Subjekt ID/ Fragen	Konzentration während des Spiels	Eintauchen in die Aufgabenstellung	Miteinbeziehung der Vorschaublöcke	Wahrgenommene Spielschwierigkeit
8	5	3	3	5
9	3	7	2	4
10	9	5	4	6
11	8	9	5	5
12	6	7	9	4
13	4	6	2	5
14	7	10	4	5
15	9	8	8	5
16	9	10	5	4
17	8	9	7	5
18	7	8	3	4
19	8	9	8	3
20	8	8	5	3
21	7	9	7	2
22	8	9	8	3
23	7	9	7	5
24	8	9	4	5
25	7	7	7	4
26	4	7	8	2
27	9	10	4	3
28	7	9	7	7
29	8	9	1	4
30	8	8	8	5
31	9	10	7	6
32	9	9	5	4
33	9	8	7	4
34	9	9	8	7
35	8	9	7	6
36 (exkl.)	6	7	2	5
37	9	7	3	5
38	8	9	8	4
Mittelwert	7,45	8,16	5,58	4,48

Tabelle 4: Übersicht über die Koordinaten der Aktivitätscluster in der Einzelprobenanalyse (re. Koordinaten der Aktivierungen im Bereich des Hippocampus; li. Koordinaten der Aktivierungen im Bereich des Precuneus)

Proband:in	x, y, z mm	Aktivierungscluster	Proband:in	x, y, z mm	Aktivierungscluster
8	10, 2, -16	Hippocampus (re.)	8	12, -72, 64	Precuneus (re.)
9	-18, -30, -6	Hippocampus (li.)		-10, -70, 64; 6, -72, 54; 4, -42, 48; 0, -48, 54; 22, -54, 20; 14, -90, 76; 12, -48, 14	Precuneus (re. & li.)
10	38, -6, -24; -22, -14, -20	Hippocampus (re. & li.)		8, -72, 58; -14, -70, 64; 32, -56, 20	Precuneus (re. & li.)
11	-10, -12, -26	Parahippocampal (li.)	11	-6, -46, 50;	Precuneus (re. & li.)
	22, -36, 8; 28, -38, -2;			0, -94, 70; 6, -50, 78; 26, -46, 24	Precuneus (re. & li.)
12	36, -6, -16	Hippocampus (re.)	12	26, -46, 24	Precuneus (re. & li.)
13	28, -38, 0; -26, -16, 8	Hippocampus (re. & li.)	13	/	keine
14	/	keine		2, -96, 68; 8, -94, 70; 6, -52, 78	Precuneus (re. & li.)
15	-32, -40, 8; -18, -40, 2; 34, -42, 12	Hippocampus (re. & li.)		-26, -54, 6; 16, -56, 18; 20, -52, 46	Precuneus (re. & li.)
	-26, -28, -12; -24, -36, 0; 28, -36, 0; -34, -32, -8	Hippocampus (re. & li.)	15	-10, -40, 46; 18, -50, 22	Precuneus (re. & li.)
16	8, 2, -16	Hippocampus (re.)	16	-6, -82, 90	Precuneus (li.)
17	-16, -4, -22; 38, -30, -6	Hippocampus (re. & li.)	17	-6, -44, 76	Precuneus (li.)
18	24, -32, 12; -18, -30, -8; -20, -36, 6; 22, -18, -10; 34, -36, 0; -28, -36, 10	Hippocampus (re. & li.)	18	-8, -36, 56; 0, -74, 80	Precuneus (re. & li.)
19	-24, -38, 14; 26, -32, 12	Hippocampus (re. & li.)	19	10, -70, 58; 6, -52, 80	Precuneus (re.)
20	-26, -40, 8; -20, -16, -10	Hippocampus (li.)		8, -70, 36; -6, -56, 80; 14, -40, 46	Precuneus (re. & li.)
21	10, 0, -24	Parahippocampal (re.)	20	14, -42, 48; -8, -80, 54	Precuneus (re. & li.)
22	24, -6, -20; -28, -10, -18	Hippocampus (re. & li.)	21	6, -46, 10	Precuneus (re.)
23	24, -28, -4; -38, -8, -20; 28, -28, 2	Hippocampus (re. & li.)	22	/	keine
24	22, -34, 0	Hippocampus (re.)		-6, -42, 80; -16, -40, 2; 10, -46, 12; 4, -42, 52	Precuneus (re. & li.)
	-14, -38, 4; -24, -28, -6; -26, -44, 10; 42, -18, -18; 26, -34, 12; -36, -34, -8	Hippocampus (re. & li.)	23	18, -44, 10; 22, -62, 24; -6, -46, 82	Precuneus (re. & li.)
25	-34, -34, -10	Hippocampus (li.)	24	-6, -80, 56	Precuneus (li.)
26	-10, -10, -20; -18, -34, -4; -30, -6, -22; -20, -36, 14	Hippocampus (li.)		6, -46, 56; -4, -62, 74; 20, -46, 24; -62, 10, 32	Precuneus (re. & li.)
27	/	keine	25	10, -66, 70	Precuneus (re.)
28	-16, -26, 16	Parahippocampal (li.)		-8, -98, 70; -8, -50, 84	Precuneus (li.)
29	30, -40, 14; -16, -14, -18	Hippocampus (re. & li.)	26	-12, -42, 72; 28, -44, 22	Precuneus (re. & li.)
30	40, -6, -22; -30, -38, 4	Hippocampus (re. & li.)	27	-12, -50, 58; -8, -70, 44	Precuneus (li.)
31	-22, -36, 0	Hippocampus (li.)		10, -54, 78; 8, -44, 46; 0, -50, 14; -6, -52, 76; 2, -56, 70	Precuneus (re. & li.)
32	24, -34, 18; -38, -26, -6; -34, -20, -20	Hippocampus (re. & li.)	28	-8, -42, 62; 8, -60, 56; -8, -44, 46	Precuneus (re. & li.)
33	-22, -38, 16; -20, -30, -8	Hippocampus (li.)	29	-24, -46, 16; 0, -56, 82; 4, -54, 16;	Precuneus (re. & li.)
34	28, -24, -14	Hippocampus (re.)		-2, -54, 52; 0, -56, 62; -10, -46, 66; 24, -44, 10; 2, -48, 60	Precuneus (re. & li.)
35	/	keine	30	4, -64, 36; 0, -60, 76; -4, -52, 12	Precuneus (re. & li.)
36			31		
37			32		
38			33		
			34		
			35		
			36		
			37		
			38		

Tabelle 5: Übersicht über die Differenzen der Punktestände zwischen den Spielrunden einzelner Proband:innen.

Spielrunden / Proband:in	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	102	312	1220	515	1200	608	4812	500	816	2030	303	8	0	1212	412
2	102	315	824	1515	1200	612	1218	500	2408	2035	0	610	202	816	1204
3	2	333	2032	1520	1824	212	3642	2015	1624	2040	1206	214	8	1220	428
4	0	618	12	1505	600	6	1818	3020	2408	1525	906	406	202	1624	0
5	3	15	1616	1000	3000	610	1230	1010	0	1525	600	608	400	2416	812
6	101	18	2020	2000	600	4	4212	2010	4048	1530	9	10	202	1624	404
7	3	1218	416	500	0	0	30	2500	4808	3530	1512	812	200	408	8
8	101	618	412	2000	1200	6	1824	505	1600	1535	3	10	204	1220	1212
9	2	24	420	15	1200	806	12	4520	800	1010	303	0	0	808	412
10	4	336	436	1040	18	214	642	3540	1600	1015	309	206	1214	1228	816
11	0	318	2020	515	1800	210	1224	1025	2416	510	909	2	200	808	416
12	0	315	816	1510	3600	8	6	3015	800	500	1203	200	202	1224	1212
13	2	324	420	3030	2400	14	30	3540	2400	10	318	2	212	1636	24
14	1	615	416	520	1200	206	618	1520	1600	540	3	4	400	832	1212
15	2	21	16	3030	0	4	1812	515	3200	3545	603	612	0	1628	1224
16	103	636	432	2545	24	210	24	1025	1624	30	15	618	608	2440	1220
17	103	1227	1220	535	12	8	618	530	1608	2030	606	6	10	2056	16
18	0	21	1220	1015	4200	4	612	2045	816	3040	306	208	600	416	812
19	103	324	432	1530	1236	1022	612	1545	2400	30	312	216	8	1644	32
20	0	21	2016	4045	1800	12	1200	2050	4000	2010	303	810	200	1220	1628
Spielrunden / Proband:in	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	37	38
1	3224	0	0	4284	9	1232	9	2400	0	1530	1000	2400	500	1227	1806
2	428	1206	300	4284	306	2432	1206	600	15	3035	2005	1200	1505	21	3612
3	1236	603	0	6708	321	428	309	1230	535	1565	3010	1254	1015	318	1218
4	2440	609	0	3678	1209	428	9	1200	25	35	500	4200	1515	306	1200
5	3228	6	0	6084	1218	2032	900	1200	1520	545	2000	600	20	18	3600
6	3248	9	300	4284	15	1620	6	600	1030	1525	500	2400	510	324	600
7	2436	309	0	3090	6	36	0	4800	1535	1525	2000	7206	0	1821	1800
8	1240	303	0	9696	9	2032	3	3000	530	3040	1500	3612	5	1824	1206
9	1616	6	0	2478	6	436	0	1800	1525	4045	1500	612	505	924	624
10	828	18	15	4920	1518	432	312	612	2040	1055	1520	3636	2025	1233	12
11	3248	300	0	4854	912	1212	0	600	30	3530	500	1800	2510	918	612
12	3252	909	0	4290	606	12	6	1200	1525	530	2000	2406	1505	21	3612
13	2052	912	2706	6120	621	1236	318	3648	1035	2035	1530	4842	515	2433	3648
14	3240	903	0	2496	318	2036	6	1206	1540	2030	2000	2424	1000	1524	1206
15	28	906	0	5484	918	1228	3	1200	3040	1025	3515	3612	2510	1830	3612
16	7660	1518	1206	3708	2733	1652	312	4242	3565	2540	5	3078	1010	942	1242
17	2452	612	9	3108	24	3228	1815	1236	525	515	2010	2466	515	1827	2436
18	2048	906	600	4878	2715	408	303	3618	1050	2000	500	1212	25	627	5418
19	2840	306	9	3696	1224	28	303	1848	1050	1045	2015	1248	530	621	1224
20	1236	606	300	4890	6	820	309	1812	530	1030	1000	612	1510	1530	606

RStudio Skripte

```
1 data <- data.frame(  
2   Proband = c(8:35,37:38),  
3   Level = c(1,3,4,5,6,2,6,5,8,5,3,2,2,4,4,4,3,3,6,3,4,3,6,5,5,5,6,5,3,6),  
4   Speed = c(1,0.62,0.47,0.36,0.26,0.79,0.26,0.36,0.12,0.36,0.62,0.79,0.79,0.47,0.47,0.62,0.62,0.26,0.62,0.47,0.62,0.26,0.36,0.36,0.36,0.26,0.36,0.62,0.26),  
5   Score = c(736,7641,18428,29885,27714,4786,26196,36930,40976,30555,9729,5566,5072,26484,13504,48008,10950,5445,93096,14697,23388,6132,38652,22655,34700,31110,50820,19230,20316,40518)  
6 )  
7  
8 # set level as an ordinal independent variable  
9 data$Level <- as.numeric(as.character(data$Level))  
10  
11 # test for correlation  
12 cor.test(as.numeric(data$Level), data$Speed)  
13  
14 # set model  
15 model <- lm(Score ~ Level + Speed, data = data)  
16 summary(model)  
17  
18 # test for multicollinearity  
19 install.packages("car")  
20 library(car)  
21 vif(model)  
22  
23 # speed without level = speed_resid  
24 speed_resid <- resid(lm(Speed ~ Level, data = data))  
25 data$SpeedRest <- speed_resid  
26  
27 # cleaned model with level as an ordinal independent variable  
28 model_clean <- lm(Score ~ Level + SpeedRest, data = data)  
29 summary(model_clean)  
30  
31 # install needed packages  
32 install.packages("reformulate", dependencies = TRUE)  
33 install.packages("effects", dependencies = TRUE)  
34 install.packages("ggplot2")  
35  
36 # plot data  
37 library(effects)  
38 plot(allEffects(model_clean))  
39  
40 library(ggplot2)  
41 ggplot(data, aes(x = Level, y = Score_resid)) +  
42   geom_point() +  
43   geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed") +  
44   labs(title = "Level vs. bereinigter Score", y = "Score_resid (bereinigt)", x = "Level")
```

Abbildung 16: RStudio Skript zur Programmierung eines linearen Regressionsmodells zur Einschätzung der Beeinflussung der Endpunktestände durch die Prädiktoren Level und Geschwindigkeit.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Lucia Elodie Ackerschott, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Tetris als Behandlungsmöglichkeit für posttraumatische Belastungsstörungen: eine fMRT-Pilotstudie zur Darstellung neuronaler Aktivität bei gesunden Proband:innen“ selbstständig verfasst und keine anderen als die im Text angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche Textstellen, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind mit einer Quellenangabe kenntlich gemacht. Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Hilfsmittel verwendet habe, deren Nutzung der Prüfer/ die Prüferin explizit ausgeschlossen hat.

Generative KI-Programme z.B. für den Themeneinstieg, die Hypothesenentwicklung, die Auswahl der wissenschaftlichen Methode, zur Ergebniserstellung oder -bewertung werden in der Dokumentation mit Programm-Namen und Nutzungszweck im Anhang tabellarisch aufgeführt.

KI-Programme, die den wissenschaftlichen Gehalt der Arbeit nicht verändern (z.B. bzgl. Stil, Grammatik, Rechtschreibung, Übersetzungsprogramme), werden lediglich gelistet, eine Kennzeichnung im Text erfolgt nicht.

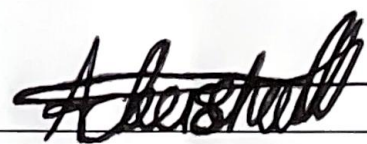
Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Die Abschlussarbeit wurde in der jetzigen oder in ähnlicher Form noch bei keiner anderen Hochschule eingereicht und hat noch keinen sonstigen Prüfungszwecken gedient. Alle zur Bewertung der Arbeit eingereichten Exemplare (Druck- und pdf-Version) sind identisch in Wortlaut, Abbildungen, Grafiken und Tabellen.

Experimentelle Daten und Materialien (inkl. Organismen) sowie deren Metadaten wurden ordnungsgemäß gesichert und dem Betreuer/ der Betreuerin übergeben.

Marburg, 29.08.2025

Ort, Datum



Unterschrift