

Aus dem

Institut für Medizinische Psychologie der Universität Tübingen

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

Räumliche Gedächtnisintegration während des Schlafes

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Jessing, Leonie Alena, geb. Gölkel

2024

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. J. Born
2. Berichterstatter: Professor Dr. G. Längle

Tag der Disputation: 24.10.2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung und theoretische Grundlagen.....	1
1.1 Navigation	2
1.1.1 Navigationsstrategien	3
1.1.2 Räumliche Referenzsysteme	5
1.1.3 Wahl der Navigationsstrategie	6
1.1.4 Neuronale Korrelate räumlicher Navigation	7
1.2 Schlaf.....	7
1.2.1 Physiologie des Schlafes	7
1.2.2 Schlaf und Gedächtnis.....	9
1.2.3 Schlaf und Navigation.....	13
1.3 Die vorliegende Studie	20
2 Material und Methoden.....	22
2.1 Probandenkollektiv	22
2.2 Studiendesign	23
2.3 Navigationsaufgabe	25
2.3.1 Virtuelle Umgebung.....	25
2.3.2 Variationen zwischen den Versuchsphasen	27
2.3.3 Durchgangszyklen während der Navigationsaufgabe	27
2.3.4 Übungsaufgabe.....	32
2.3.5 Versuchsaufbau der Navigationsaufgabe	32
2.4 Versuchsablauf	33
2.4.1 Ablauf Sitzung 1	34
2.4.2 Ablauf Sitzung 2	36
2.4.3 Schlaf-/ Wachmanipulation.....	37
2.5 Kontrollvariablen.....	38

2.5.1	Standfordschlufigkeitsskala (SSS).....	38
2.5.2	Positive and Negative Affect Schedule (PANAS).....	38
2.5.3	Fragen zum aktuellen Zustand.....	39
2.5.4	Edinburgh Handigkeitsfragebogen.....	39
2.5.5	State-Trait-Anxiety-Inventory (STAI X1 + X2).....	39
2.5.6	Schlaffragebogen (SF-A-R).....	39
2.5.7	Lawton 1 (Angstlichkeit).....	40
2.5.8	Lawton 2 (Strategie).....	40
2.5.9	Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD).....	41
2.5.10	Regensburger Wortflussigkeitstest (RWT).....	41
2.5.11	Psychomotor Vigilance Task (PVT).....	41
2.5.12	Trailmaking Test.....	42
2.5.13	Operation Span Task (OSPAN).....	42
2.5.14	Aktimeter.....	42
2.5.15	Polysomnographie.....	43
2.6	Statistische Analyse.....	44
3	Ergebnisse.....	46
3.1	Verhaltensdaten.....	46
3.1.1	Navigationsgenauigkeit.....	46
3.1.2	Navigationszeit.....	49
3.1.3	Kontrollanalysen.....	51
3.2	Kontrolltests.....	53
3.2.1	Schlaf.....	53
3.2.2	PANAS.....	55
3.2.3	Fragen zum aktuellen Zustand.....	56
3.2.4	Edinburgh Handigkeitsfragebogen.....	56
3.2.5	STAI X1 + X2.....	57
3.2.6	Lawton 1.....	57
3.2.7	Lawton 2.....	58
3.2.8	SBSOD.....	58
3.2.9	RWT.....	59
3.2.10	Trailmaking.....	59
3.2.11	PVT.....	60

3.2.12	OSPAN.....	60
4	Diskussion	62
5	Zusammenfassung.....	68
6	Literaturverzeichnis	70
7	Erklärung zum Eigenanteil.....	80
8	Anhang.....	81
8.1	Aufklärungsbogen	81
8.2	Case Report Form.....	86
8.3	Standfordschläfrigkeitsskala	93
8.4	Positive and Negative Affect Schedule	94
8.5	Santa Barbara Sense of Direction Scale	95
8.6	Lawton 1	96
8.7	Lawton 2.....	97
8.8	Fragen zum aktuellen Zustand	98
8.9	Edinburgh Händigkeitfragebogen.....	99
8.10	Regensburger Wortflüssigkeitstest.....	99
8.11	Trailmaking Test A und B.....	100
8.12	State-Trait-Anxiety-Inventory X1 und X2	104
8.13	Schlaffragebogen (SF-A-R)	106
8.14	Aufklärungsbogen MRT.....	110
9	Danksagung	114

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Versuchsaufbau nach Tolman. S1 und S2 sind Startpunkte, F1 und F2 Zielpunkte. Der ausgefüllte Kreis symbolisiert eine Futterstelle zur positiven Verstärkung des Ziels. a) Bei ‚response learner‘ Ratten bleibt die Start-Ziel Relation stets gleich, sie biegen bspw. immer rechts ab. b) ‚Place learner‘ Ratten sollen den Ort des Ziels verinnerlichen unabhängig von der Relation zum Startpunkt. Nach Tolman et al. (1946).5
- Abbildung 2: Die vier grundlegenden Arten von Orientierungszellen. a) Ortszelle; b) Kopfrichtungszelle; c) Gitterzelle; d) Grenzzelle. Die obere Spalte zeigt eine Karte der Feuerungsrate der jeweiligen Zelle (a, c, d) oder die Feuerungsrichtung (b). Die Spitzenfeuerungsrate ist jeweils links oben in Hertz angegeben. Die Farben spiegeln die Stärke der Feuerungsrate bezüglich der Spitzenfeuerungsrate wider: dunkelblau 0–20%; hellblau 20–40%; grün 40–60%; gelb 60–80%; rot 80–100%. In der unteren Zeile bildet die schwarze Linie den gesamten Weg der Ratte während des Versuchs ab, die grünen Punkte markieren die Orte an denen die jeweilige Zelle gefeuert hat. Zur Aufzeichnung der Grenzzelle (d) wurde eine Mauer in den Versuchsaufbau eingefügt. Nach Hartley et al. (2014).18
- Abbildung 3: Typisches Schlafprofil eines gesunden Erwachsenen. Stadium 3 und Stadium 4 werden nach neuerer Einteilung zu einem Stadium N3 zusammengefasst (Iber et al., 2007). Nach Diekelmann and Born (2010). 8
- Abbildung 4: Überblick über die charakteristischen Graphoelemente für die jeweiligen Schlaf-/ Wachstadien. Nach Carley and Farabi (2016).9
- Abbildung 5: Modell der Gedächtniskonsolidierung. Im Wachzustand erfolgt eine parallele Enkodierung sowohl im Zwischen- als auch im Langzeitspeicher. Im darauffolgenden SWS wird durch eine wiederholte Reaktivierung im Zwischenspeicher eine Reaktivierung der entsprechenden neuen Gedächtnisinhalte im Langzeitspeicher, sowie von bereits vorhandenen assoziierten Repräsentationen (schmal gestrichelte Linien), angeregt. Im REM-Schlaf folgt durch die Desynchronisierung eine funktionelle Trennung von Zwischen- und Langzeitspeicher. Dies ermöglicht lokale Prozesse der synaptischen Konsolidierung zur Stärkung der neuen Gedächtnisrepräsentationen (dickere Linien). Nach Diekelmann and Born (2010).12
- Abbildung 6: Überblick Studiendesign24
- Abbildung 7: Ausschnitt aus der virtuellen Umgebung der Navigationsaufgabe mit den Hinweisreizen Verkehrspylon als proximale Landmarke und Grenzwall: (a) aus Sicht des Probanden; (b) Panoramaansicht der Arena; (c) Übersicht von oben und symbolisch vereinfachte Darstellung26
- Abbildung 8: Objekte Sitzung 127
- Abbildung 9: Objekte Sitzung 227

Abbildung 10: Überblick Prinzipien der verschiedenen Durchgangszyklen in der Familiarisierungsphase bei Sitzung 1: (a) Aneignungsdurchgang (b) Rückmeldungsdurchgang.	30
Abbildung 11: Überblick Prinzipien der verschiedenen Durchgangszyklen bei Sitzung 2: (a) Aneignungsdurchgang der Lernphase; (b) Rückmeldungsdurchgang der Lernphase; (c) Prüfdurchgang der Abrufphase.	31
Abbildung 12: Ausschnitt aus der Übungsumgebung mit Buschpflanze als Landmarke und Grenzwall.	32
Abbildung 13: Überblick Versuchsablauf	34
Abbildung 14: Polysomnographie, Verteilung der Elektroden. C3, C4: Elektroenzephalogramm-Elektroden nach dem 10-20-System; GRND: Erdungselektrode; EOG 1, 2: Elektrookulogramm-Elektroden; REF: Referenzelektrode; EMG 1, 2: Elektromyogramm-Elektroden.	43
Abbildung 15: a) Interaktion mittlere Navigationsgenauigkeit (\pm SEM) in der Lernphase (Block > 4) und der Abrufphase für Schlaf- und Wachgruppe. b) Getrennte Betrachtung nach Richtung des Hinweisreizwechsels (Grenzwall zu Landmarke/ Landmarke zu Grenzwall) für Schlaf- und Wachgruppe.....	47
Abbildung 16: Mittlere Navigationsgenauigkeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die sechs Rückmeldungsdurchgänge der a) Familiarisierungsphase und b) Lernphase.	48
Abbildung 17: Mittlere Navigationsgenauigkeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die vier Prüfdurchgänge der Abrufphase.	49
Abbildung 18: Mittlere Navigationszeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die sechs Rückmeldungsdurchgänge der a) Familiarisierungsphase und b) Lernphase.	50
Abbildung 19: Mittlere Navigationszeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die vier Prüfdurchgänge der Abrufphase.	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Ablauf Sitzung 1	36
Tabelle 2: Übersicht Sitzung 2: Beginn der zweiten Sitzung um 18/ 20/ 22 Uhr in Einzelsitzungen. In dieser Tabelle ist ein beispielhafter zeitlicher Ablauf für den Beginn um 18 Uhr dargestellt.	37
Tabelle 3: Korrelationen der Schlafparameter mit den Navigationsdifferenzen (Differenz zwischen Lernen und Abruf). DNav _i _m : Navigationsdifferenz bzgl. Navigationsgenauigkeit; dNav _i _d : Navigationsdifferenz bzgl. Navigationszeit; ActiN2min: Gesamtschlafdauer in Minuten nach Aktimetauswertung; EEGDauermin: Gesamtschlafdauer in Minuten nach EEG-Auswertung; S3/ S4: Zeit in Schlafstadium 3/ 4 in Minuten.....	53
Tabelle 4: Überblick und Gruppenvergleich über die durchschnittliche Schlafdauer und Schlafqualität der Probanden in der Nacht vor der ersten Sitzung, sowie die Angaben zur aktuellen Schläfrigkeit anhand der Standfordschläfrigkeitsskala in der ersten Sitzung (SSS 1).	54
Tabelle 5: Schlafdauer und Schlafqualität der Schlafgruppe in der Experimentalnacht. 54	
Tabelle 6: Anteile der einzelnen Schlafphasen an der Gesamtschlafdauer während der Experimentalnacht in Minuten und Prozent.	55
Tabelle 7: Überblick und Gruppenvergleich über Schlafdauer und -qualität in der Erholungsnacht, sowie subjektive Schläfrigkeit nach der Standfordschläfrigkeitsskala in der zweiten Sitzung (SSS 2).....	55
Tabelle 8: Ergebnisse des PANAS in der ersten Sitzung. PA: Positive Affekte; NA: Negative Affekte.....	56
Tabelle 9: Ergebnisse des PANAS in der zweiten Sitzung. PA: Positive Affekte; NA: Negative Affekte.....	56
Tabelle 10: Gruppenvergleich der Trait-Anxiety, sowie der State Anxiety in Sitzung 1 (STAI-State 1) und Sitzung 2 (STAI-State 2).	57
Tabelle 11: Gruppenvergleich der räumlichen Ängstlichkeit nach dem Lawton 1 Fragebogen.	58
Tabelle 12: Gruppenvergleich des Lawton 2 Fragebogens zur Nutzung von Navigationsstrategien.	58
Tabelle 13: Gruppenvergleich der Santa Barbara Sense of Direction Scale zur räumlichen Orientierungsfähigkeit	59
Tabelle 14: Gruppenvergleich der korrekt generierten Wörter im Regensburger Wortflüssigkeitstest in der ersten (RWT 1) und zweiten (RWT 2) Sitzung. 59	
Tabelle 15: Gruppenvergleich der benötigten Dauer zur korrekten Absolvierung des Trailmaking Test in Version A und B	60

Tabelle 16: Gruppenvergleich der mittleren Reaktionszeit beim Psychomotor Vigilance Test 1 und 2 in Millisekunden.60

Tabelle 17: Gruppenvergleich der Ergebnisse des OSPAN Absolute Score (oAS) und Partial Load Score (oPLS).61

Abkürzungsverzeichnis

A	Allozentriert
Bzw.	Beziehungsweise
BOLD	Blood oxygenation level dependent
E	Egozentriert
EEG	Elektroenzephalogramm/ Elektroenzephalografie
EHI	Edinburgh Handedness Inventory/ Händigkeitfragebogen
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomografie
GRND	Ground/ Erdungselektrode
M	Mittelwert
MRT	Magnetresonanztomografie
mPFC	Medialer präfrontaler Cortex
NA	Negativer Affekt
NREM/ Non-REM	Non-Rapid Eye Movement
oAS	OSPAN Absolute Score
OSPAN	Operation Span Task
oPLS	OSPAN Partial Load Score
PA	Positiver Affekt
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
REF	Referenzelektrode
RSC	Retrosplenialer Cortex

PSG	Polysomnograph/ Polysomnographie
PVT	Psychomotor Vigilance Task
REM	Rapid Eye Movement
RWT	Regensburger Wortflüssigkeitstest
SBSOD	Santa Barbara Sense of Direction Scale
SD	Standardabweichung
SEM	Standard error of the mean/ Standardfehler des Mittelwerts
SF-A-R	Schlaffragebogen A
SSS	Standfordschläfrigkeitsskala
STAI	State-Trait-Anxiety-Inventory
SWS	Slow Wave Sleep
vm	Virtuelle Meter

1 Einleitung und theoretische Grundlagen

Räumliche Navigation ist nicht sprachlich und ist daher sowohl bei Tieren als auch bei Menschen untersuchbar. Auf dieser Grundlage konnte umfassendes Wissen über die neuronalen Grundlagen der räumlichen Navigation geschaffen werden, indem verschiedene Zelltypen identifiziert wurden, die unterschiedliche Aspekte der räumlichen Kognition neuronal kodieren. In einer bahnbrechenden Untersuchung stellten O'Keefe and Dostrovsky (1971) fest, dass ein bestimmter Zelltyp im Hippocampus, die sogenannten *place cells*, immer dann feuerten, wenn sich Ratten an einem bestimmten Ort in einem kreisförmigen Labyrinth befanden. Es gab dabei unterschiedliche Zellen, die an unterschiedlichen Orten feuerten, so dass sich eine Karte des Labyrinths im Hippocampus der Ratten konstituierte, anhand derer man vorhersagen konnte, wo sich die Ratte befand, wenn man die neuronale Aktivität der *place cells* kannte. Hinzu kamen weitere wichtige Entdeckungen, die unser Verständnis für die Repräsentation räumlicher Umgebung im Gehirn von Ratten – und wie sich später herausstellte auch von Menschen (Ekstrom et al., 2003) – voranbrachte, im Sinne von Zellen des Entorhinalen Kortex, die räumliche Ausdehnungen und relative Positionen kodieren, die sogenannten *grid cells*, (Hafting et al., 2005; Moser et al., 2008), sowie Zellen die die Nähe zu einer nahen Wand kodieren, den *boundary cells* (Solstad et al., 2008; Lever et al., 2009). Ein wesentlicher Vorteil der Kenntnis dieser neuronalen Repräsentation räumlicher Umgebung ist, dass sich derart die unmittelbare Verarbeitung ebenso untersuchen lässt, wie der Verlauf der Repräsentation über die Zeit hinweg, also die Formation, Konsolidierung und der Abruf von Gedächtnisinhalten. So beruht das Modell der Gedächtniskonsolidierung durch nächtliche Reaktivierung neuer Erinnerungen auf Erkenntnissen in diesem Gebiet. Bei Ratten und Menschen wurden nächtliche Muster der koordinierten Reaktivierung spezifischer Zellverbände im Hippocampus und anderen Gehirnregionen nach räumlichen Erfahrungen beobachtet (O'Keefe and Dostrovsky, 1971; Wilson and McNaughton, 1994; Ekstrom et al., 2003; Hafting et al., 2005; Ji and Wilson, 2007). Darüber hinaus gibt es erste Erkenntnisse, dass Schlaf nicht nur eine wichtige Rolle bei der Festigung von Gedächtnisinhalten durch Reaktivierung spielt, sondern auch bei der Neuorganisation und Integration von Gedächtnisrepräsentationen aus verschiedenen Gedächtnissystemen. Beim Navigieren

in einer Umgebung müssen wir uns sowohl an spezifische Orte erinnern, als auch die räumlichen Beziehungen zwischen ihnen verstehen. Die räumliche Navigation eignet sich diesbezüglich als Modellmechanismus, da die Verarbeitung räumlicher Informationen die Zusammenarbeit verschiedener Gehirnregionen erfordert, darunter des Hippocampus und des dorsalen Striatum (Doeller et al., 2008; Hartley et al., 2014). Die Aktivierung dieser beiden Gedächtnissysteme beruht auf verschiedenen Navigationsstrategien, der hippocampalen Orientierungsstrategie und der striatalen Routenstrategie. Der genaue Beitrag jedes dieser Gedächtnissysteme zur Navigationsleistung hängt von verschiedenen Aspekten ab, wird jedoch auch durch den Schlaf vermittelt (Orban et al., 2006; Rauchs et al., 2008; Noack et al., 2021). In dieser Studie befassen wir uns genauer mit der Rolle des Schlafs bei der Gedächtnisbildung im Zusammenhang mit räumlicher Navigation. Wir beschäftigen uns mit den spezifischen Gedächtnissystemen, die an der räumlichen Navigation beteiligt sind, wie der Schlaf diese Systeme beeinflusst und welchen Einfluss dies auf die Navigationsleistung hat. Insbesondere untersuchen wir, wie sich die wechselseitige Kommunikation zwischen Hippocampus und Striatum durch den Schlaf verändert. Durch ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge können wir möglicherweise neue Erkenntnisse darüber gewinnen, wie der Schlaf die Gedächtnisbildung und die räumliche Orientierung im Allgemeinen beeinflusst.

Zum tieferen Verständnis der vorliegenden Arbeit sind grundlegende Kenntnisse auf den Gebieten der räumlichen Navigation, des Schlafes und der Gedächtnisbildung erforderlich. Diese werden in den folgenden Abschnitten vermittelt. Abschließend erfolgt ein Überblick über die vorliegende Arbeit sowie die Vorstellung der aufgestellten Hypothesen.

1.1 Navigation

Die räumliche Navigation und die dafür erforderliche Orientierung spielen schon immer eine wesentliche Rolle im Leben des Menschen und anderer Lebewesen. Zusammengefasst wird dieser Prozess durch den Begriff der Wegfindung (engl. wayfinding) beschrieben. Dies umfasst die kognitive Leistung eine Route vom aktuellen Standort zu einem festgelegten Ziel zu finden (Jellinger, 2000). Die räumliche

Orientierung ermöglicht dabei eine mentale Einordnung der Position des Individuums im Raum, sowie die Konstruktion räumlicher mentaler Repräsentationen (Peruch and Lapin, 1993; Maier, 1999). Innerhalb dieser mentalen Repräsentation müssen Vorstellungsbilder über räumliche Konstellationen, neue Informationen von verschiedenen Modalitäten, der aktuelle Standort, sowie Bewegungspläne geordnet und integriert werden. Die räumliche Navigation stellt dahingegen die aktive Anwendung der Orientierung dar im Sinne einer Handlungsplanung unter Nutzung der mentalen Repräsentationen und führt zu einer gerichteten Bewegung hin auf ein Ziel (Barkowsky, 2007).

1.1.1 Navigationsstrategien

Es können unterschiedliche Methoden zur Navigation in der Umwelt genutzt werden um ein Ziel zu erreichen. In der Literatur finden sich verschiedene Theorien zu Navigationsstrategien. Häufig erfolgt eine Unterscheidung in die Routen- und die Orientierungsstrategie (z. B. Lawton, 1994), dieses Konzept wird auch in der vorliegenden Arbeit verfolgt. Orientierungswissen wird in anderen Arbeiten auch als Überblickswissen (Siegel and White, 1975; O'Keefe and Nadel, 1978) oder Konfigurationswissen (Siegel and White, 1975) bezeichnet.

Bei der Routenstrategie wird eine Abfolge von Anweisungen verinnerlicht, die an markante Landmarken der nahen Umgebung geknüpft ist. Folgt man den Instruktionen gelangt man von einer Landmarke zur nächsten und erreicht letztendlich das gewünschte Ziel. Landmarken können in lokale und globale Landmarken unterschieden werden. Globale Landmarken sind in einer Region jederzeit unabhängig von der aktuellen Position weithin sichtbar. Lokale Landmarken dienen dahingegen nur in einem begrenzten Areal der Region zur Orientierung. Dementsprechend dient beispielsweise ein großer Berg, der hinter einer Stadt aufragt, als globale Landmarke, ein auffälliges Gebäude oder ein Baum jedoch als lokale Landmarke. Im Rahmen der Routenstrategie werden nur lokale Landmarken zur Orientierung genutzt. Gemeinsam mit Handlungsanweisungen wie „biege rechts ab“ „gehe weiter geradeaus“ entsteht eine Route. Diese ist jedoch leicht anfällig für Interferenzen durch Umgebungsänderungen, die zur Desorientierung führen können. Routenwissen vermittelt nur einen Weg zum Ziel und ist demnach als relativ starr zu betrachten (Lawton, 1994).

Orientierungswissen beinhaltet demgegenüber Kenntnis über die eigene Position in Relation zu umliegenden Grenzen, globalen Landmarken und dem Ziel. Verschiedene Routen werden in ein Netzwerk integriert, so dass eine kognitive Karte der Umgebung entsteht, in die neue Informationen eingefügt werden können. Dies erlaubt eine flexible Navigation, die Abkürzungen und Umleitungen ermöglicht (Lawton, 1994).

Eng verknüpft mit den Begriffen der Routen- und Orientierungsstrategie sind die Lerntheorien des Reiz-Reaktions-Lernens (*response learning*), zurückgehend auf Hull (1943), und des Ortslernens (*place learning*), zurückgehend auf Tolman (1946). Angewandt auf die Navigation im Raum bedeutet ein Reiz-Reaktions-Lernen, dass mit der Zeit bestimmte Körperbewegungen als Reaktion auf eine Landmarke verinnerlicht werden. Daraus entsteht eine Reiz-Reaktions-Kette, räumlich gesehen eine Route. Ein Ziel wird demnach nur korrekt aufgefunden, wenn die räumliche Beziehung vom Startpunkt zum Ziel immer die gleiche bleibt. Für diese Art des Lernens spielt das Striatum eine große Rolle (Packard and Knowlton, 2002; Iaria et al., 2003; Doeller et al., 2008). Das Ortslernen setzt eine komplexere Verarbeitung eines Reizes voraus. Der Reiz wird erfasst, in vorhandenes Wissen integriert und eine logische Entscheidung getroffen, wie die Reaktion ausfallen soll. Die Integration erfolgt in eine mentale Repräsentation der Umgebung, eine kognitive Karte (Tolman, 1948; O'Keefe and Nadel, 1978). Diese kognitive Karte ist im Hippocampus implementiert (O'Keefe and Nadel, 1978; Pearce et al., 1998; Iaria et al., 2003; Doeller et al., 2008) und Grundlage einer Orientierungsstrategie. Tolman operationalisierte diese beiden Lernmethoden 1946 bei Ratten. Dafür baute er ein vierarmiges Labyrinth innerhalb eines Raumes auf. Die Startpunkte S1 und S2 liegen sich gegenüber auf einer Geraden, die Zielpunkte F1 und F2 ebenfalls auf einer Geraden im rechten Winkel zur Startpunktgeraden. Gegenstände im Raum außerhalb des Labyrinths bieten externe Orientierungshinweise. Die Ratten wurden in zwei Gruppen eingeteilt und trainiert. Für die ‚response learner‘ blieb die Start-Ziel-Relation stets dieselbe. Sie fanden das Ziel in Form von Futter immer im Arm rechts vom Startarm des Labyrinths, d.h. bei einem Start von S1 bei F1, bei einem Start von S2 respektive bei F2. Der Start- und Zielpunkt wechselten, ihre Relation blieb jedoch gleich. Bei ‚place learner‘ Ratten blieb das Ziel unabhängig vom Startpunkt S1 oder S2 stets am selben Ort, beispielsweise bei F1. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

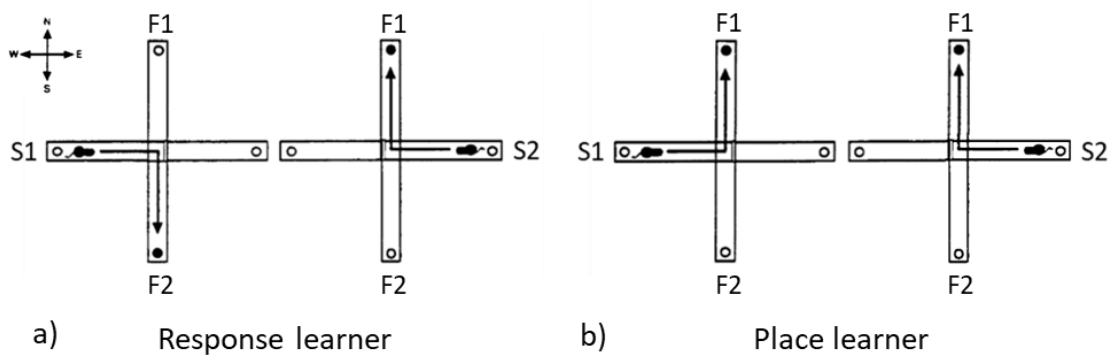


Abbildung 1: Versuchsaufbau nach Tolman. S1 und S2 sind Startpunkte, F1 und F2 Zielpunkte. Der ausgefüllte Kreis symbolisiert eine Futterstelle zur positiven Verstärkung des Ziels. a) Bei ‚response learner‘ Ratten bleibt die Start-Ziel Relation stets gleich, sie biegen bspw. immer rechts ab. b) ‚Place learner‘ Ratten sollen den Ort des Ziels verinnerlichen unabhängig von der Relation zum Startpunkt. Nach Tolman et al. (1946).

1.1.2 Räumliche Referenzsysteme

Je nach Betrachtungsweise einer mentalen Repräsentation können zwei verschiedene Referenzsysteme unterschieden werden: das allozentrische und das egozentrische (Klatzky, 1998). Wird ein allozentrischer Referenzrahmen verwendet, besteht ein fixes Koordinatensystem wie beim Blick auf eine Karte. Objekte stehen in Relation zu anderen Objekten in einem konstanten externen Bezugsrahmen, der unabhängig vom Individuum ist. Die Ausrichtung des Koordinatensystems bleibt stets die gleiche und das Individuum bewegt sich im Koordinatensystem.

Bei einem egozentrischen Referenzrahmen wird das Zentrum des Koordinatensystems durch die eigene Körperachse definiert. Objekte werden in Relation zum Individuum lokalisiert, die Ausrichtung des Koordinatensystems ändert sich mit der Blickrichtung des Individuums.

In der Regel wird davon ausgegangen, dass Routenwissen in einem egozentrischen und Orientierungswissen in einem allozentrischen Referenzrahmen repräsentiert wird. Die Übergänge zwischen den beiden Referenzsystemen sind jedoch unscharf. Während eine egozentrische Repräsentation alleine existieren kann, liegt es in der Natur der egozentrischen Wahrnehmung der Umwelt, dass Input in und Output aus allozentrischen Systemen eine vorübergehende egozentrische Übersetzung benötigt (Burgess, 2006).

1.1.3 Wahl der Navigationsstrategie

Das Vorhandensein von verschiedenen Strategien impliziert, dass individuell eine Entscheidung getroffen werden muss, welche Strategie Anwendung findet. Es scheint eine individuelle Nutzungspräferenz zu geben (Gramann et al., 2005; Iaria et al., 2003). In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze, wodurch diese Präferenz situativ beeinflusst werden kann. Shelton und Gabrieli (2002) nehmen an, dass die Art der Informationsdarbietung einen direkten Einfluss hat. Demzufolge erzeugt Lernen aus der Egoperspektive Routenwissen und aus der Vogelperspektive oder mit Hilfe einer Karte Orientierungswissen. Hartley et al. (2003) verfolgen ebenfalls den Ansatz der Informationsdarbietung. In ihrer Studie zu ‚route-following‘ und ‚wayfinding‘ soll das freie Erkunden einer Umgebung Orientierungswissen vermitteln, das wiederholte Ablaufen einer spezifischen Route dahingegen Routenwissen.

Der Einfluss des Geschlechts auf die Strategiewahl wurde vielfach untersucht mit unterschiedlichen Ergebnissen. Während ein Teil der Studien keinen Unterschied in der Strategiepräferenz fand (z. B. Levy et al., 2005), deutet der andere Teil darauf hin, dass Männer eher allozentrische, euklidische und Richtungsinformationen nutzen, Frauen dagegen eher egozentrische, Landmarken und Routeninformationen (Lawton and Kallai, 2002; Saucier et al., 2002; MacFadden et al., 2003; Boone et al., 2018). Um mögliche Geschlechtseffekte auszuschließen, wurden in der vorliegenden Studie nur Männer untersucht.

Einen weiteren Einfluss auf die Wahl der Strategie hat der Grad der Gewöhnung an die spezifische Aufgabe. Packard zeigte in einer Läsionsstudie bei Ratten (1996), dass das Hippocampus-abhängige Ortslernen schneller erworben wird, als das striatale Reiz-Reaktionslernen. Mit der Zeit und vermehrter Gewöhnung an die Aufgabe beginnt jedoch das striatale Reiz-Reaktionslernen in den Vordergrund zu rücken. Diese Ergebnisse lassen sich auf den Menschen übertragen (Iaria et al., 2003). Nach anfänglicher spontaner Strategiewahl, erhöhte sich mit der Erfahrung in der Aufgabe der Anteil der Probanden, die eine striatale Reiz-Reaktions-Strategie verwendeten. Zudem zeigte sich eine positive Korrelation von erhöhter Aktivität im Striatum mit einer verbesserten Leistung. Durch das Training wird eine gewohnheitsmäßige Vorgehensweise entwickelt, die effizienter ist (Iaria et al., 2003). Es wird vermutet, dass die Aktivierung des jeweiligen hippocampalen oder striatalen Systems im medialen

präfrontalen Cortex (mPFC) koordiniert wird (Ragozzino et al., 1999; Rich and Shapiro, 2009).

1.2 Schlaf

Schlaf ist ein systemischer Prozess, der auf vielfältige Weise die Funktionen des Körpers beeinflusst. Das charakteristischste Merkmal ist dabei der Zustand der äußeren Ruhe, der von einem Verlust des Bewusstseins und der Verhaltenssteuerung begleitet ist. Neben seiner essentiellen Rolle für das Leben an sich, wirkt er sich auf den Stoffwechsel, das Immunsystem, sowie die Entwicklungsbiologie aus und hat eine generelle regenerative Funktion (z. B. Siegel, 2003). Eine besondere Bedeutung kommt darüber hinaus seiner Rolle bei der Gedächtnisbildung zu. Diese scheint nicht mit der Gehirnaktivität im Wachzustand vereinbar zu sein, die sich mit der Verarbeitung von Umweltreizen auseinandersetzt. Während des Schlafes wird vor allem die Gedächtniskonsolidierung, die Festigung neuer Erinnerungen gefördert, während die Enkodierung und der Abruf vorrangig im Wachzustand stattfinden (z. B. Diekelmann and Born, 2010; Brodt et al., 2023).

1.2.1 Physiologie des Schlafes

Der Schlaf-Wach-Zyklus eines erwachsenen Menschen folgt einer zirkadianen Periodik. Dabei wird der endogene Biorhythmus durch den Nucleus suprachiasmaticus mit dem umweltbedingten Tag-Nacht-Rhythmus synchronisiert. Im Laufe einer Nacht ist der Schlaf nicht einheitlich, vielmehr werden verschiedene tiefe Stadien unterschieden. Eine grundsätzliche Klassifizierung erfolgt in die Non-REM Stadien N1-N3 und die REM-Phase (Iber et al., 2007). Pro Nachtschlaf werden 4-7 Schlafzyklen zu je etwa 90-120 Minuten durchlaufen, die aus einer Non-REM und darauffolgender REM-Phase bestehen. Der erste Teil der Nacht (der frühe Schlaf) ist dabei durch einen hohen Anteil an Tiefschlaf (SWS) gekennzeichnet, während der REM-Schlaf in der zweiten Hälfte (dem späten Schlaf) überwiegt. Ein typisches Schlafprofil ist in Abbildung 2 dargestellt.

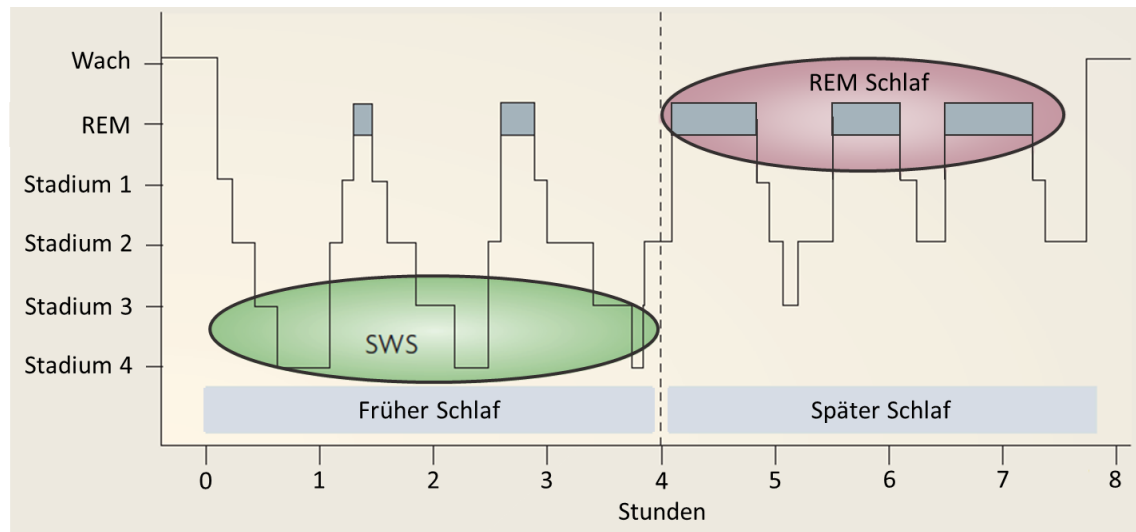


Abbildung 2: Typisches Schlafprofil eines gesunden Erwachsenen. Stadium 3 und Stadium 4 werden nach neuerer Einteilung zu einem Stadium N3 zusammengefasst (Iber et al., 2007). Nach Diekelmann and Born (2010).

Die Differenzierung der Stadien gelingt anhand charakteristischer Kennzeichen in der Polysomnografie. Mit Hilfe des dazu gehörenden Elektroenzephalogramms (EEG) werden kortikale Potenzialschwankungen registriert, die die gesamte synaptische Aktivität eines Bereiches abbilden. Nach Frequenz und Amplitude lassen sich verschiedene Wellenmuster und dazugehörige Stadien unterscheiden. Einen Überblick gibt Abbildung 3.

Im Wachzustand herrschen bei gerichteter Aufmerksamkeit β -Wellen mit einer Frequenz von 13-20 Hz vor. Die Frequenz verringert sich in entspanntem Zustand mit geschlossenen Augen und es treten α -Wellen auf. Im Übergang zum Stadium N1 verschwindet zunächst der α -Rhythmus des EEG und es überwiegen θ -Wellen mit einer Frequenz von 4-7 Hz und einer Amplitude von 50 bis 75 μ V. Gegen Ende von N1 können Vertexzacken mit einer relativ großen Amplitude von circa 250 μ V auftreten. Im Stadium N2 kommen zu den vorhandenen θ -Wellen Schlafspindeln und K-Komplexe hinzu. Schlafspindeln sind höher frequente, spindelförmige Potenzialschwankungen, die als hemmende Reaktion auf Wahrnehmungsreize interpretiert werden und dem Thalamus entspringen. K-Komplexe stellen sich als scharfe Welle mit hoher Amplitude dar, bestehend aus einem negativem, gefolgt von einem positiven Ausschlag. Es handelt sich um eine Aktivierung durch externe oder interne Reize. Der Tiefschlaf, auch slow-wave-sleep (SWS), wird mit dem Stadium N3

erreicht. Charakteristisch sind langsame δ -Wellen (0-4 Hz) mit hoher Amplitude, sogenannte ‚langsame Oszillationen‘ die im Neocortex generiert werden. Ebenso können noch thalamische Schlafspindeln und hippocampale sharp-wave-ripples auftreten. Es besteht eine hohe Weckschwelle, die Körpertemperatur, Atem- und Herzfrequenz, sowie der Muskeltonus sind herabgesetzt.

Die REM-Phase (Rapid Eye Movement) zeichnet sich durch schnelle Augenbewegungen aus. Abgesehen von der Augen- und Atemmuskulatur herrscht eine generelle Atonie der Skelettmuskulatur vor. Das EEG ähnelt einem Wach-EEG mit gemischten Frequenzen bei niedriger Amplitude. Da jedoch eine ähnlich hohe Weckschwelle wie im Tiefschlaf besteht, wird der REM-Schlaf auch als paradoxer Schlaf bezeichnet. Des Weiteren sind ein Anstieg des Blutdrucks sowie der Atem- und Herzfrequenz festzustellen. Träume treten vorwiegend in dieser Schlafphase auf.

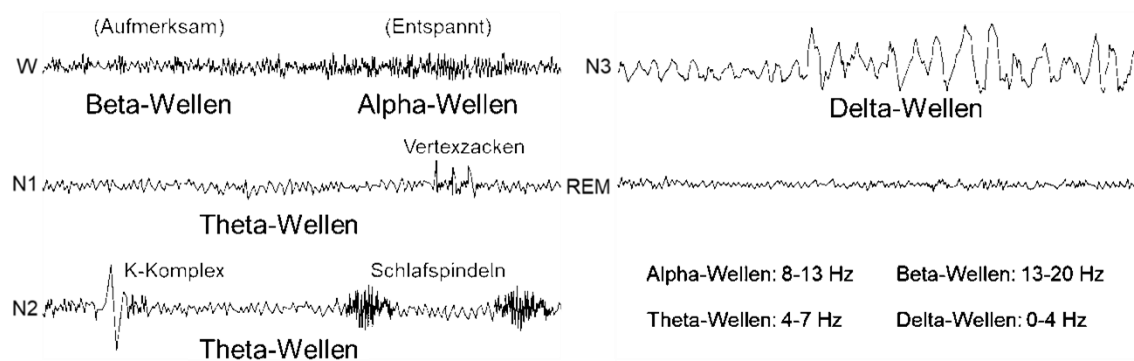


Abbildung 3: Überblick über die charakteristischen Graphoelemente für die jeweiligen Schlaf-/Wachstadien. Nach Carley and Farabi (2016).

1.2.2 Schlaf und Gedächtnis

Eine geläufige Einteilung des Gedächtnisses erfolgt zeitlich in ein Kurz- und ein Langzeitgedächtnis (Squire et al., 1993). Das Langzeitgedächtnis kann inhaltlich weiter unterteilt werden in ein deklaratives Gedächtnis und ein non-deklaratives Gedächtnis. Der Hauptunterschied besteht in einer vorwiegend bewussten (expliziten) Speicherung von Faktenwissen im Rahmen des deklarativen Gedächtnisses, während das non-deklarative Gedächtnis verschiedene Formen des unbewussten (impliziten) Lernens umfasst. Dazu gehört das prozedurale Gedächtnis, welches dem Abrufen von motorischen Fertigkeiten dient, die klassische Konditionierung und das Priming. In diesen Fällen kommt das Gedächtnis eher durch Leistung als durch Erinnerung zum

Ausdruck (Squire et al., 1993). Die beiden Systeme unterscheiden sich auch strukturell, während das deklarative Gedächtnis vom Hippocampus abhängig ist (Squire and Zola-Morgan, 1991), sind bei der Speicherung von non-deklarativen Gedächtnisinhalten insbesondere das Kleinhirn, der Neocortex und die Basalganglien beteiligt, zu denen auch das dorsale Striatum gehört.

Der förderliche Einfluss von Schlaf auf die Gedächtniskonsolidierung sowohl von deklarativen, als auch von prozeduralen Gedächtnisinhalten wurde im Laufe der Zeit vielfach nachgewiesen. Konsolidierung beschreibt dabei den Prozess, im Wachzustand enkodierte und zu Beginn labile Informationen in ein Netzwerk bereits bestehender Gedächtnisinhalte zu integrieren und langfristig zu festigen. Während früher davon ausgegangen wurde, dass Schlaf passiv zur Konsolidierung beiträgt, indem er Gedächtnisinhalte vor Interferenzen und Verfall schützt, tendiert man heute zu der Annahme, dass eine aktive Konsolidierung durch spezielle schlaf-abhängige neurobiologische Prozesse stattfindet (Ellenbogen et al., 2006; Rasch and Born, 2013). Für Letzteres sprechen eine Vielzahl an Verhaltensstudien, die zeigen, dass Schlaf sowohl eine Verstärkung von Assoziationen bewirken, als auch qualitative Veränderungen herbeiführen kann (Plihal and Born, 1997; Stickgold et al., 2000; Fischer et al., 2002; Fischer et al., 2006). Eine Reorganisation der Gedächtnisinhalte während des Schlafes kann darüber hinaus zur Bildung neuer Assoziationen und dadurch zu Erkenntnissen und Einblicken führen, die vor dem Schlaf noch nicht vorhanden waren (Wagner et al., 2004; Fischer et al., 2006; Ellenbogen et al., 2007).

Nach dem Modell der ‚aktiven Systemkonsolidierung‘ (Diekelmann and Born, 2010) sind zwei separate Speichersysteme notwendig, um neue Informationen langfristig zu speichern, ohne bereits vorhandene Erinnerungen zu beeinträchtigen. Bei deklarativen Gedächtnisinhalten erfolgt die Enkodierung im Wachzustand parallel im Hippocampus und im Neocortex. Dabei fungiert der Hippocampus als schnell lernender Zwischenspeicher. Durch seine hohe Plastizität ermöglicht er eine rasche Informationsaufnahme, jedoch zu Lasten einer begrenzten Kapazität und hohen Interferenzanfälligkeit. Um eine langfristige, interferenzfreie Speicherung zu gewährleisten, findet im Schlaf eine Übertragung in den Neokortex als Langzeitspeicher statt. Dies geschieht durch eine wiederholte Reaktivierung der neuen Erinnerungen im Hippocampus während des darauffolgenden SWS (Born et al., 2006; Ellenbogen et al.,

2006). Durch die Reaktivierung im Hippocampus wird simultan eine Reaktivierung der entsprechenden neu enkodierten Gedächtnisinhalte im Neokortex angeregt, sowie von bereits vorhandenen assoziierten Gedächtnisrepräsentationen. Es wird davon ausgegangen, dass neue Erinnerungen dadurch allmählich gestärkt, reorganisiert und in bereits vorhandene Gedächtnisinhalte integriert werden. Durch die wiederholte Reaktivierung von invarianten Informationen findet zudem ein Abstraktionsprozess statt, durch den im Laufe der Zeit Schemata entwickelt werden können, da zentrale Aspekte der neu erlernten Informationen häufiger reaktiviert werden als voneinander abweichende Details (Diekelmann and Born, 2010; Rasch and Born, 2013).

Auf physiologischer Ebene wird die synchronisierte Reaktivierung von Hippocampus und Neocortex im SWS durch die im Neocortex generierten langsamen Oszillationen angetrieben (Diekelmann and Born, 2010; Rasch and Born, 2013). Sie steuern den Dialog zwischen Hippocampus und neocorticalen Arealen und ermöglichen dadurch eine effektive Informationsübertragung. Dies geschieht, indem sie ‚sharp-wave-ripples‘ im Hippocampus während der depolarisierenden kortikalen ‚Upstates‘ induzieren. Diese sharp-wave-ripples sind parallel dazu in thalamo-kortikale-Spindeln eingebettet. Zwischen diesen Spindel-Ripple-Ereignissen und den langsamen Oszillationen wird eine negative synchronisierte Rückkopplung angenommen, sodass auch umgekehrt der hippocampale Replay die entsprechende Reaktivierung im Neokortex bewirkt (Rasch and Born, 2013). Diese Synchronisierung verschiedener Gehirnareale während des Replays, um einen Informationstransfer zu ermöglichen, ist nicht vereinbar mit dem fortlaufenden neuen Input während des Wachzustandes. Dies könnte den evolutionär gesehen riskanten Aspekt der Bewusstlosigkeit während des Schlafes erklären (Born et al., 2006; Rasch and Born, 2013).

Zeitgleich zur aktiven Systemkonsolidierung findet während des SWS ein globaler synaptischer downscaling Prozess statt. Dieser beinhaltet die Depotenzierung von Synapsen, um eine Sättigung derselben vorzubeugen. Das Herunterskalieren fördert die Eliminierung schwacher und den Erhalt starker Synapsen im Sinne eines nachhaltigen Energie- und Gewebevolumenmanagements und ermöglicht dadurch die Wiederverwendung von Synapsen für die zukünftige Enkodierung (Diekelmann and Born, 2010; Stern, 2018). Dieser Prozess dient als Erklärung dafür, dass Schlaf aktiv die

Enkodierung neuer Informationen im darauffolgenden Wachzeitraum vereinfacht (Diekelmann and Born, 2010).

Um die während der Systemkonsolidierung neu entstandenen synaptischen Verbindungen auf lange Sicht zu stabilisieren und zu stärken, findet im folgenden REM-Schlaf eine lokale synaptische Konsolidierung statt. Dabei erfolgt eine Trennung von Langzeit- und temporärem Speicher im Sinne einer Desynchronisierung. Daraufhin werden lokal auf synaptischer Ebene Gedächtnisrepräsentationen nach dem Prinzip der Langzeitpotenzierung gestärkt, bei denen zuvor eine Systemkonsolidierung stattgefunden hat (Diekelmann and Born, 2010).

Eine optimale Konsolidierung findet demnach durch die charakteristische Abfolge von aktiver Systemkonsolidierung während des SWS und synaptischer Konsolidierung während des REM-Schlafes statt. Da deklarative Gedächtnisinhalte jedoch mehr auf die Integration verschiedener Erinnerungen über verschiedene Gedächtnissysteme angewiesen sind, profitieren diese mehr von der Systemkonsolidierung im Rahmen des SWS. Im Gegensatz dazu sind prozedurale Inhalte in der Regel sehr spezifisch und eigenständig, weswegen für sie die synaptische Konsolidierung lokaler Schaltkreise während des REM-Schlafes von größerer Bedeutung sein könnte (Plihal and Born, 1997; Diekelmann and Born, 2010). Das Prinzip der Gedächtniskonsolidierung nach Diekelmann und Born ist in Abbildung 4 dargestellt.

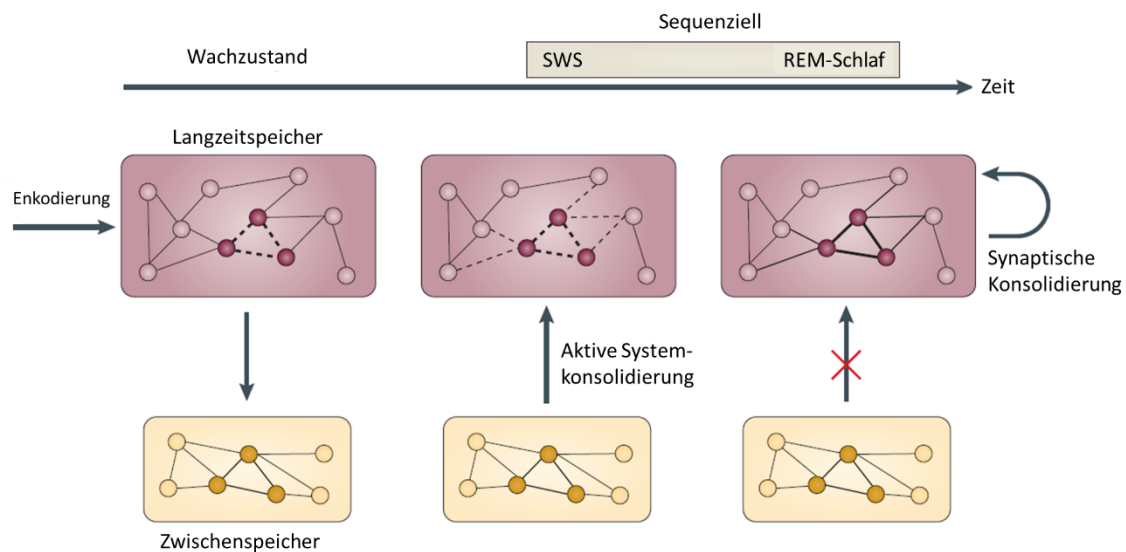


Abbildung 4: Modell der Gedächtniskonsolidierung. Im Wachzustand erfolgt eine parallele Enkodierung sowohl im Zwischen- als auch im Langzeitspeicher. Im darauffolgenden SWS

wird durch eine wiederholte Reaktivierung im Zwischenspeicher eine Reaktivierung der entsprechenden neuen Gedächtnisinhalte im Langzeitspeicher, sowie von bereits vorhandenen assoziierten Repräsentationen (schmal gestrichelte Linien), angeregt. Im REM-Schlaf folgt durch die Desynchronisierung eine funktionelle Trennung von Zwischen- und Langzeitspeicher. Dies ermöglicht lokale Prozesse der synaptischen Konsolidierung zur Stärkung der neuen Gedächtnisrepräsentationen (dickere Linien). Nach Diekelmann and Born (2010).

1.2.3 Schlaf und Navigation

Die räumliche Navigation stellt ein geeignetes Modellsystem dar, um den Einfluss von Schlaf auf die Gedächtnisbildung zu untersuchen. Das Modell der Konsolidierung durch nächtliche Reaktivierung neuer Erinnerungen beruht auf Erkenntnissen in diesem Gebiet. Wilson and McNaughton (1994) trainierten Ratten den Weg zu einer Futterstelle in einem Labyrinth zu finden. Währenddessen wurde die Aktivität hippocampaler Ortszellen (s. 1.2) abgeleitet, die für die Position des Tieres im Raum kodieren. Es ergibt sich ein spezifisches Erregungsmuster der Ortszellen entlang der Route. Dieses zeitlich geordnete Erregungsmuster hippocampaler Aktivität zeigt sich im darauffolgenden Non-REM-Schlaf erneut (Wilson and McNaughton, 1994; Skaggs and McNaughton, 1996; Ji and Wilson, 2007).

Ähnliche Befunde ergaben sich bei menschlichen Probanden mit Hilfe von regionalen zerebralen Blutflussmessungen. Peigneux et al. (2004) zeigten, dass die Hippocampusbereiche die beim Lernen einer Route in einer virtuellen Umgebung aktiv waren, auch während des anschließenden SWS aktiviert werden. Zudem fanden sie eine positive Korrelation zwischen der Menge der Hippocampusaktivität während des SWS und einer verbesserten Leistung beim Routenlernen am darauffolgenden Tag. Der Einfluss von Schlaf auf die Navigationsleistung wurde daraufhin in weiteren Studien untersucht. Probanden erkundeten dabei eine reale (Ferrara et al., 2006) oder eine virtuelle Umgebung während einer Lernphase. Nach einer Periode des Schlafes oder der Wachheit durchliefen sie eine Abruf-Aufgabe mit einem vordefinierten Ziel. Während weitere Studien einen positiven Einfluss von Schlaf auf die räumliche Gedächtnisleistung fanden (Ferrara et al., 2006; Ferrara et al., 2008; Wamsley et al., 2010; Nguyen et al., 2013; Coutanche et al., 2013; Varga et al., 2016; Noack et al., 2017), zeigten andere keinen Effekt basierend auf Verhaltensdaten (Orban et al., 2006; Rauchs et al., 2008; Javadi et al., 2015; Villemonteix et al., 2023).

Trotz fehlender Verhaltenseffekte fanden Orban et al. (2006) und Rauchs et al. (2008) jedoch eine Modulation der zugehörigen neuronalen Substrate im fMRT. Die Schlafgruppen wiesen, nach einem 72-stündigen Retentionsintervall, eine progressive Verschiebung der anfänglichen hippocampalen Aktivität hin zu einer erhöhten striatalen Aktivität auf. Die striatale Aktivität wird mit einer effizienteren Reiz-Reaktions-Strategie, im Gegensatz zur hippocampalen Orientierungsstrategie, assoziiert (s. 1.1.1). Diese Verschiebung konnte bei den Wachgruppen nicht nachgewiesen werden und deutet auf eine Reorganisation der Gedächtnisinhalte während des Schlafes hin. Die Aktivierung des jeweiligen hippocampalen oder striatalen Repräsentationssystems wird vermutlich durch den medialen präfrontalen Cortex koordiniert (Ragozzino et al., 1999; Rich and Shapiro, 2009; Preston and Eichenbaum, 2013). Dieser ist an der Abstraktion schemaähnlicher räumlicher Repräsentationen beteiligt (Tse et al., 2011; van Buuren et al., 2014) und weist ebenso eine neuronale Reaktivierung im SWS auf, parallel zu den sharp-wave-ripples des Hippocampus (Euston et al., 2007; Peyrache et al., 2009).

Die Vermutung, dass auch bei der Konsolidierung von räumlichen Gedächtnisinhalten während des Schlafes ein Abstraktionsprozess stattfindet, wird ebenfalls durch die Ergebnisse von Coutanche et al. (2013) unterstützt. Probanden der Schlafgruppe erlangten implizit Erkenntnis über eine zugrunde liegende Regel und konnten die räumliche Aufgabe daraufhin exakter lösen als Probanden der Wachgruppe.

Der retrospleniale Cortex (RSC) bildet eine weitere Gehirnregion, die an der räumlichen Navigation beteiligt ist, indem er eine Übersetzung zwischen den unterschiedlichen räumlichen Referenzsystemen vermittelt (s. 1.2). Im RSC zeigt sich eine verstärkte neuronale Aktivierung synchron zu den Theta-Wellen des Hippocampus während des REM-Schlafes (Vann et al., 2009; Koike et al., 2017). Dies kann als Hinweis auf eine Beteiligung des RSC an der Konsolidierung und Reorganisation von räumlichen Gedächtnisinhalten während des Schlafes gedeutet werden (Koike et al., 2017).

Eine wesentliche Problematik bei der Untersuchung der Auswirkungen des Schlafes auf das räumliche Gedächtnis, ergibt sich aus der Tatsache, dass mindestens zwei verschiedene Gedächtnissysteme mit unterschiedlichen zugrunde liegenden Strategien daran beteiligt sind. Um die Effekte auf die einzelnen beteiligten Systeme sowie ihre Interaktion untersuchen zu können, konzipierten Noack et al. (2021) eine Studie, bei

welcher die zu verwendende Strategie durch entsprechende Hinweisreize in einer virtuellen Umgebung vorgegeben wurde. Nachdem anfänglich beide Strategien verwendet werden konnten, mussten die Probanden nach einem Retentionsintervall flexibel zwischen den beiden Gedächtnisrepräsentationen wechseln können. Dabei erzielte die Schlafgruppe ein besseres Ergebnis als die Wachgruppe. In einem Kontrollexperiment zeigte sich kein Effekt von Schlaf auf die Navigationsleistung per se, wenn kein Strategiewechsel notwendig war. Dies lässt darauf schließen, dass Schlaf nicht primär eine einzelne räumliche Repräsentation stärkt, sondern vielmehr eine Integration verschiedener beteiligter Repräsentation in ein übergeordnetes Schema stattfindet (Noack et al., 2021).

1.2.4 Neuronale Korrelate räumlicher Navigation

Die räumliche Navigation kann sich auf verschiedene Systeme stützen, die als Schlüsselstrukturen hippocampale bzw. striatale Schaltkreise beinhalten und mit verschiedenen räumlichen Bezugsrahmen verbunden sind. Kenntnisse über die jeweiligen Gehirnregionen wurden mittels Einzelzelleitungen, Läsions- und fMRT-Studien erlangt.

Der Hippocampus liegt als Teil des Gyrus parahippocampalis an der Basis des Temporallappens. Er setzt sich aus mehreren Strukturen zusammen, die gemeinsam die hippocampale Formation bilden. Dazu zählen das Ammonshorn, auch als eigentlicher Hippocampus bezeichnet, bestehend aus den vier Feldern CA1 - CA4, der Gyrus dentatus und das Subiculum. Durch seine histologische Dreischichtung gehört der Hippocampus zu dem evolutionär alten Gebiet des Archicortex. Der entorhinale Cortex bildet sowohl anatomisch, als auch funktionell die Schnittstelle zum sechsschichtigen Neocortex. Dabei dient er als Eingangstor zum Hippocampus, durch das ein überwiegender Teil der Afferenzen den Hippocampus erreichen. Diese kommen vom Thalamus, dem Gyrus cinguli, der Amygdala und nahezu allen Cortexarealen. Die Projektionsbahnen verlaufen vom entorhinalen Cortex größtenteils über den sogenannten Tractus perforans zum Gyrus dentatus, teilweise aber auch direkt zum eigentlichen Hippocampus. Einige Autoren zählen auf Grund der engen funktionellen Verbindung auch den entorhinalen Cortex, sowie das Prä- und Parasubiculum zur hippocampalen Formation. Die Efferenzen des Hippocampus verlaufen über die Projektionsbahn des

Fornix zu den Corpora mamillaria, zur Amygdala, zum Septum und zum Hypothalamus (Insausti and Amaral, 2004).

Das Striatum ist ein Teil der Basalganglien und gehört zum Großhirn. Es liegt beidseits an dessen Basis seitlich des Thalamus. Das Striatum wird zusammen aus dem medial gelegenen Nucleus caudatus und lateral gelegenen Putamen gebildet. Es bildet die Eingangsstation der Basalganglien und erhält Afferenzen hauptsächlich von der Großhirnrinde, sowie der Substantia nigra und verschiedenen Kerngebieten des zentralen Nervensystems.

Das von Tolman entwickelte Konzept der kognitiven Karte erfuhr regen Zuspruch, als O'Keefe 1971 das Vorhandensein von Ortszellen (*place cells*) im Hippocampus von Ratten nachweisen konnte. Im Zusammenspiel mit weiteren Orientierungszellen im erweiterten Hippocampus dienen die Ortszellen als ein inneres Navigationssystem bei Ratten. Diese Entdeckung wurde 2014 mit der Verleihung des Nobelpreises für Physiologie oder Medizin an John O'Keefe, sowie May-Britt Moser und Edvard Moser honoriert. Zu den wichtigsten Orientierungszellen zählen neben den Ortszellen die Gitterzellen, die Kopfrichtungszellen, sowie die Grenzzellen. Im Zusammenspiel bilden sie eine kartenähnliche allozentrische Repräsentation der Umgebung.

Bei den Ortszellen handelt es sich um spezialisierte Zellen im eigentlichen Hippocampus und Gyrus dentatus, die durchgehend mit einer konstanten, niedrigen Rate feuern. Die Feuerungsrate einer einzelnen Ortszelle steigt an, wenn sich das Tier in einem umschriebenen Areal einer bekannten Umgebung aufhält, dem sogenannten Ortsfeld (*place field*) dieser Zelle. Die Ortsfelder der Zellen unterscheiden sich, so dass an jeder Stelle nur wenige Ortszellen verstärkt feuern. Durch Aufzeichnung der Feuerungsraten einer Zellpopulation entsteht somit eine Karte (*firing rate map*), anhand deren der aktuelle Standort des Tieres sehr akkurat rekonstruiert werden kann. Die erstellte Karte ist für jede Umgebung höchst individuell und damit kontextspezifisch. Zellen die in einer Umgebung für benachbarte Ortsfelder kodieren, wechseln ihre Relation in einer anderen Umgebung (O'Keefe and Dostrovsky, 1971; Hartley et al., 2014). Dabei scheinen sie jedoch in geometrisch verschiedenen Umgebungen an korrespondierenden Orten bezüglich der Entfernung zur nächstgelegenen Begrenzung zu feuern (O'Keefe and Burgess, 1996; Lever et al., 2002). Ortszellen vermitteln somit

Informationen über den aktuellen Standort, ermöglichen für sich genommen jedoch noch keine erfolgreiche Navigation (O'Keefe, 1976). Das Vorhandensein von Ortszellen wurde auch im menschlichen Hippocampus nachgewiesen (Ekstrom et al., 2003).

May-Britt und Edvard Moser entdeckten 2005 die Gitterzellen (*grid cells*) als Schlüsselkomponente der Navigation im medialen entorhinalen Cortex (Hafting et al., 2005). Später wurden diese auch im Prä- und Parasubiculum nachgewiesen (Boccaro et al., 2010). Im Gegensatz zur Ortszelle feuert eine Gitterzelle an mehreren Stellen einer Umgebung. Diese befinden sich in streng regelmäßigen Abständen zueinander und bilden ein Gitterfeld aus gleichseitigen Dreiecken. Die Gitterfelder verschiedener Gitterzellen können sich hinsichtlich der Skalierung, der Ausrichtung und der Phase (Position der Gitterpunkte in zweidimensionaler Ebene) voneinander unterscheiden und zeigen diesbezüglich eine topografisch modulare Organisation innerhalb des medialen entorhinalen Cortex. Lokale Zellverbände zeigen kaum Varianz in Skalierung und Ausrichtung ihrer Gitterfelder, unterscheiden sich jedoch in ihrer Phase, so dass mit einem Modul die gesamte Umgebung abgebildet wird. Verschiedene Zellmodule variieren dahingegen deutlich in Skalierung und Ausrichtung ihrer Gitterfelder. Durch parallele Aktivierung von Gitterzellen verschiedener Module kann somit eine genaue Lokalisation der aktuellen Position erfolgen. Die Gitterfelder sind dabei über verschiedene Umgebungen stereotypisch, so dass sie als universelle Basis für metrische Distanzen und Richtungsorientierung dienen können. Der Ursprung der Gitterfelder wird kontrovers diskutiert. Da die Felder zwar an externe Landmarken geknüpft sind, aber auch in völliger Dunkelheit stabil bleiben, wird vermutet, dass Informationen über die Eigenbewegung des Tieres als Grundlage zur Ausbildung der Gitterfelder dienen und eine Fehlerkorrektur über sensorischen Input stattfindet (Hafting et al., 2005; Fuhs and Touretzky, 2006). Doch auch eine Änderung der Geometrie der Umgebung beeinflusst die Felder (Krupic et al., 2014), so dass auch Informationen über umweltbezogene Grenzen eine wichtige Rolle zu spielen scheinen.

Kopfrichtungszellen (*head direction cells*) wurden im dorsalen Präsubiculum (Taube et al., 1990), entorhinalen Cortex (Sargolini et al., 2006), Thalamus und retrosplenialen Kortex (Taube, 2007) nachgewiesen. Sie reagieren auf die Orientierung des Kopfes des Tieres, wobei jede Zelle entsprechend einer bevorzugten Kompassrichtung feuert (Taube et al., 1990). Im Gegensatz zu einem Kompass erfolgt die Ausrichtung jedoch

nicht abhängig vom Magnetfeld der Erde, sondern ist vorrangig an prominente Landmarken der Umgebung geknüpft.

Die Feststellung, dass Ortszellen in geometrisch verschiedenen Umgebungen an korrespondierenden Orten bezüglich der Entfernung zur nächsten Grenze feuern, führte zu der Hypothese, dass es bestimmte Zellen geben müsse, die speziell auf Grenzen in der Umgebung reagieren (O'Keefe and Burgess, 1996; Hartley et al., 2000). Diese Grenzzellen (*boundary cells*) wurden schließlich im Subiculum (Barry et al., 2006; Lever et al., 2009), medialen entorhinalen Cortex (Solstad et al., 2008; Savelli et al., 2008) und Prä- und Parasubiculum (Boccarda et al., 2010) nachgewiesen. Sie feuern, wenn eine bestimmte Distanz zu einer Grenze in einer allozentrischen Richtung erreicht wird. Als Grenzen zählen dabei sowohl Wände, als auch die Kanten von Abstürzen nach unten (Stewart et al., 2014).

Abbildung 5 zeigt die Feuerungsratenkarten je eines Exemplars der vier verschiedenen Orientierungszellen bei einer Ratte, sowie die dazugehörigen Wege des Tieres im Versuchsaufbau.

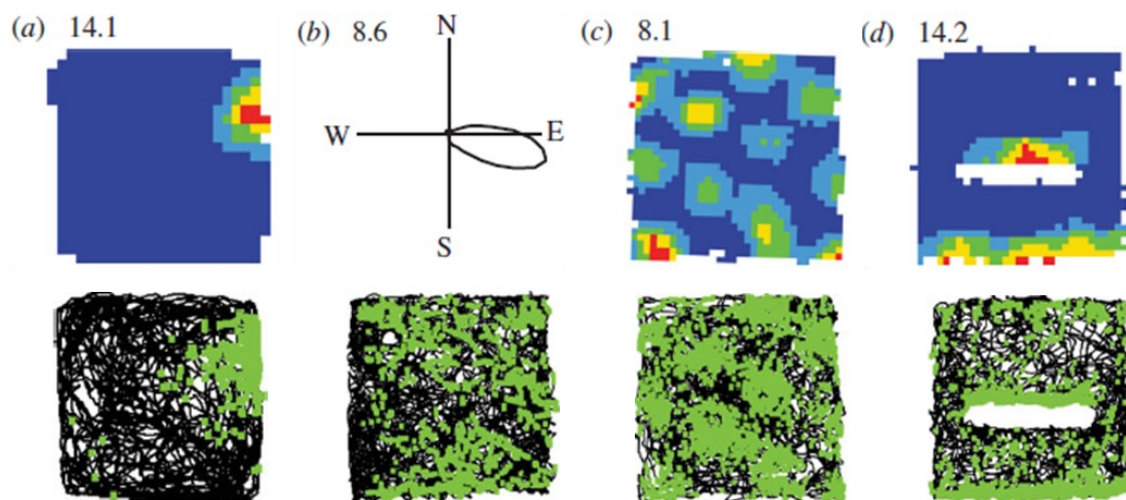


Abbildung 5: Die vier grundlegenden Arten von Orientierungszellen. a) Ortszelle; b) Kopfrichtungszelle; c) Gitterzelle; d) Grenzzelle. Die obere Spalte zeigt eine Karte der Feuerungsrate der jeweiligen Zelle (a, c, d) oder die Feuerungsrichtung (b). Die Spitzenfeuerungsrate ist jeweils links oben in Hertz angegeben. Die Farben spiegeln die Stärke der Feuerungsrate bezüglich der Spitzenfeuerungsrate wider: dunkelblau 0–20%; hellblau 20–40%; grün 40–60%; gelb 60–80%; rot 80–100%. In der unteren Zeile bildet die schwarze Linie den gesamten Weg der Ratte während des Versuchs ab, die grünen Punkte markieren die Orte an denen die jeweilige Zelle gefeuert hat. Zur Aufzeichnung der Grenzzelle (d) wurde eine Mauer in den Versuchsaufbau eingefügt. Nach Hartley et al. (2014).

Die Existenz von Grenzzellen und ihre Interaktion mit Ortszellen und Gitterzellen zeigt, dass Grenzen eine wichtige Rolle beim räumlichen Lernen im Hippocampus spielen. Dieser Zusammenhang wurde auch mittels Läsionsstudien bei Ratten gezeigt (Morris et al., 1982; Pearce et al., 1998; Maurer and Derivaz, 2000; Horne et al., 2010). Angelehnt an das Morris Wasserlabyrinth entwickelten Doeller et al. (2008) eine virtuelle Umgebung, in der menschliche Probanden Objekte entweder in Bezug zu einer Grenze oder zu einer Landmarke finden sollten. Eine fMRT-Auswertung zeigte, dass die Aktivierung des rechten posterioren Hippocampus mit der Suche nach Objekten einhergeht, die mit der Grenze assoziiert sind. Dahingegen zeigt sich eine Aktivierung des dorsalen Striatum bei Objekten, die mit der Landmarke assoziiert sind.

Dies steht im Einklang mit den unterschiedlichen Funktionen, die den beiden Arealen zugeschrieben werden. Der Hippocampus dient dem schnellen Aneignen von Erfahrungen im Rahmen des episodischen Gedächtnisses durch beiläufiges, inzidentelles Lernen, wie es beim Ortslernen in Bezug zu Grenzen benötigt wird (Doeller and Burgess, 2008; Doeller et al., 2008). Die Basalganglien sind in ein langsames, kumulatives Aneignen von Fähigkeiten involviert, das auf assoziativer Verstärkung durch Versuch und Irrtum beruht (White, 1989; Packard and Knowlton, 2002). Sie dienen daher als Basis des egozentrischen Reiz-Reaktions-Lernen, das an lokale Landmarken geknüpft ist.

Schon Experimente mit Ratten im vierarmigen Kreuzlabyrinth von Tolman zeigten, dass bei einer Inaktivierung des dorsalen Striatum die Tiere vermehrt der ‚place strategy‘ folgten, wohingegen eine Inaktivierung des Hippocampus zu einer häufigeren Nutzung der ‚response strategy‘ führte (Packard and McGaugh, 1996; Packard, 1999). Ebenso zeigen fMRT-Studien bei Menschen eine Aktivierung des rechten Hippocampus bei Verwendung einer allozentrischen, Grenzen-bezogenen Orientierungsstrategie (Iaria et al., 2003; Doeller et al., 2008; Bird et al., 2010) und respektive eine Aktivierung des dorsalen Striatums bei Verwendung einer egozentrischen Landmarken-bezogenen Routenstrategie (Hartley et al., 2003; Doeller et al., 2008; Wegman et al., 2014).

Die beiden Gedächtnissysteme arbeiten parallel und können dabei sowohl kompetitiv als auch synergistisch zur Navigationsleistung beitragen (Packard and McGaugh, 1996; Doeller et al., 2008). An der Koordination ihrer Aktivierung ist der mediale präfrontale

Cortex (mPFC) beteiligt (Ragozzino et al., 1999; Rich and Shapiro, 2009; Preston and Eichenbaum, 2013). Der mPFC ist eine Gedächtnisregion die zur Abstraktion räumlicher Schemata beiträgt (Tse et al., 2011; van Buuren et al., 2014). Dies bedeutet, er hilft bei der Organisation von Verhalten durch Kodierung abstrakter Regeln und ist entscheidend für den Wechsel zwischen verschiedenen Gedächtnisstrategien. Bei Ratten konnte der Wechsel zwischen einer Hippocampus- und einer Striatum-abhängigen Navigationsstrategie durch die neuronale Aktivität des mPFC vorhergesagt werden (Rich and Shapiro, 2009).

Die dabei notwendige Übersetzung zwischen einer allozentrischen und egozentrischen Perspektive wird durch den retrosplenialen Cortex vermittelt (Byrne et al., 2007; Vann et al., 2009; Alexander and Nitz, 2015). Er verbindet die aktuelle Blickrichtung mit lokalen topographischen Merkmalen, sowie mit bereits vorhandenen räumlichen Repräsentationen und ermöglicht dadurch die Bestimmung der eigenen Position und Orientierung relativ zu den festen Elementen der Außenwelt (Marchette et al., 2015). Auf der Grundlage eines Rechenmodells, vermuten Byrne et al. (2007), dass Informationen von den Kopfrichtungszellen des anterioren Thalamus verwendet werden um den Rotationsversatz zwischen allozentrischer und egozentrischer Perspektive zu kompensieren.

1.3 Die vorliegende Studie

Die vorliegende Studie dient der Untersuchung der physiologischen Grundlagen des räumlichen Gedächtnisses und deren Veränderung durch Schlaf. Dabei stützen wir uns auf die Hypothese, dass Schlaf zu einer Integration von hippocampalen und striatalen Repräsentationssystemen führt, unter Beteiligung übergeordneter Zentren wie dem mPFC und dem RSC. Das Studiendesign baut auf der Verhaltensstudie von Noack et al. (2021) auf. Die verwendete virtuelle Realität enthält zwei Hinweisreize, eine lokale, proximale Landmarke zur Stimulation einer striatalen Routenstrategie und einen Grenzwall zur Stimulation einer hippocampalen Orientierungsstrategie. Die Probanden lernen die Lokalisation verschiedener Objekte in einer Umgebung, die zunächst beide Hinweisreize enthält. Nach einer Experimentalnacht, in der die Probanden entweder schlafen oder wach bleiben und einer weiteren Erholungsnacht, lernen sie die

Lokalisation von neuen Objekten in derselben Umgebung, die nun jedoch entweder die Landmarke oder den Grenzwall enthält (Enkodierung). Um zu testen, ob eine Integration stattgefunden hat und nun implizit eine Repräsentation vorhanden ist, die beide Hinweisreize enthält, wird untersucht wie akkurat die Probanden die Beziehung zwischen der Landmarke, dem Grenzwall und den neu gelernten Objekten abrufen können. Dazu sollen sie die Objekte, die sie relativ zur Landmarke gelernt haben nun in der Grenzwallumgebung lokalisieren und umgekehrt (Retrieval). Wir erwarten, dass dies den Probanden der Schlafgruppe schneller und genauer gelingt als den Probanden der Wachgruppe. Zur Untersuchung der Beziehung zwischen einer schlafabhängigen Leistungsverbesserung und der Schlafqualität, wird die Schlafgruppe während der Experimentalnacht mit einem Polysomnographen (PSG) ausgestattet. Wir erwarten, dass die Fähigkeit auf den Wechsel der räumlichen Hinweisreize zu reagieren mit physiologischen Kennzeichen der Schlafqualität (Gesamtschlafdauer, Dauer SWS) korreliert. Zur Beurteilung der Aktivität der beteiligten Gehirnareale wird in der zweiten Sitzung während der Enkodierung und des Retrieval die funktionelle Magnetresonanztomografie genutzt. Die Auswertung der fMRT-Daten ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2 Material und Methoden

2.1 Probandenkollektiv

An der Studie nahmen insgesamt 59 männliche Probanden im Alter von 18 bis 33 Jahren teil (Mittelwert $M = 24,34$ Jahre mit einer Standardabweichung von $SD = 3,07$). Davon gehörten ursprünglich 31 Probanden der Schlafgruppe und 28 der Wachgruppe an. Fünf Probanden mussten nachträglich aus der Studie ausgeschlossen werden, sodass 27 Teilnehmer der Schlafgruppe und 27 der Wachgruppe in die Auswertung einfließen. Der Ausschluss erfolgte aus unterschiedlichen Gründen. Bei einem Probanden wurde ein anderes MRT-Protokoll angewandt, ein Proband musste die Teilnahme krankheitsbedingt abbrechen, bei einem Probanden wurde ein Zufallsbefund im MRT festgestellt, in einem weiteren Fall kam es zu organisatorischen Schwierigkeiten bezüglich des zweiten Termins und der fünfte wurde auf Grund von nachträglich festgestellter MRT-Inkompatibilität vor dem zweiten Termin ausgeschlossen.

Die teilnehmenden Probanden waren gesunde Rechtshänder (s. Abschnitt 2.5.4) und Nicht- oder Gelegenheitsraucher, die sich grundsätzlich bereit erklärten, eine Nacht wach im Labor zu verbringen. Chronische und akute psychische oder somatische Leiden wurden in einer ausführlichen Eigenanamnese erhoben (s. Case Report Form, Anhang 0). Dauerhafte, regelmäßige Medikamenteneinnahme, Reisen in andere Zeitzonen, sowie Nacharbeit innerhalb der letzten sechs Wochen vor dem Studientermin bildeten weitere Ausschlusskriterien. Um den Sicherheitserfordernissen der MRT-Messungen gerecht zu werden, wurden weiterhin Probanden mit nicht-entfernbaren metallischen Objekten an oder im Körper, mit Tätowierungen, Klaustrophobie, Tinnitus, jedweden Prothesen, Implantaten, sowie Retainern von der Teilnahme ausgeschlossen. Alle Studieninteressierten wurden vor Einschluss ausführlich über den Hintergrund, Ablauf, die Risiken, die datenschutzrechtlichen Bedingungen der Studie, sowie den Umgang mit etwaigen Zufallsbefunden aufgeklärt und erklärten im Anschluss daran ihr Einverständnis für die Teilnahme. Auf die MRT-bezogenen Risiken wurde nochmals direkt vor dem Zugang zum Messraum explizit hingewiesen und die entsprechenden sicherheitsrelevanten Aspekte abgefragt.

Der entstandene Aufwand wurde mit einer Entschädigung von 50 € für die Schlafgruppe, bzw. 120 € für die Wachgruppe, ausgeglichen. Hinzu kam eine leistungsabhängige Erfolgsprämie von maximal 30 €.

Die Gruppengröße wurde durch eine statistische Kalkulation bestimmt, die auf den Effektgrößen ($d = 0,71$) basiert, die für schlafbezogene Integrationseffekte in einer früheren Verhaltensstudie ermittelt wurden. Nach den Berechnungen in G*Power 3.0 mit einer Potenz von $(1-\beta) = 0,80$ und $\alpha = 0,05$ führt dies zu einer Kalkulation von mindestens 25 Teilnehmern pro Gruppe.







Die Studie wurde von der Ethikkommission der Universität Tübingen geprüft und genehmigt (Projektnummer 380/2016BO2).

2.2 Studiendesign

Die Studie war in einem pseudo-randomisierten Messwiederholungsdesign mit zwei Parallelgruppen und zwei Sitzungen angelegt. Dabei wurden die Probanden nach der Reihenfolge ihrer Kontaktaufnahme, sowie terminlicher Verfügbarkeit einer von zwei Gruppen (schlaf/ wach) zugeteilt. Die Gruppenzugehörigkeit wurde den Probanden erst nach der ersten Sitzung mitgeteilt. Die Schlafgruppe wurde nach der ersten Sitzung nach Hause entlassen um ihrem gewohnten Schlafrhythmus in gewohnter Umgebung zu folgen, während die Schlafaktivität durch einen Aktimeter (s. Abschnitt 2.5.14) und Polysomnographie (s. Abschnitt 2.5.15) aufgezeichnet wurde. Die Wachgruppe hingegen verbrachte die Nacht bis zum kommenden Morgen um 7:00 Uhr unter Aufsicht wach im Labor und war angehalten bis zum folgenden Abend um 20:00 Uhr nicht zu schlafen. Alle Probanden wurden aufgefordert im Laufe der Studie keine koffeinhaltigen Getränke, Alkohol oder Nikotin zu sich zu nehmen, in den Schlafnächten vor 24 Uhr zu Bett zu gehen, ausreichend zu schlafen und tagsüber nicht zu schlafen.

Die Studie begann mit der etwa dreistündigen Sitzung ‚Familiarisierung‘ (‚familiarization‘) an Tag eins, in der sich die Probanden mit der virtuellen Umgebung vertraut machten, die parallel zwei verschiedene Hinweisreize umfasste (proximale Landmarke und zirkulärer Grenzwall; s. Abschnitt 2.3.1 für eine detaillierte Beschreibung). In dieser Familiarisierungsphase lernten die Probanden die Positionen

von acht Objekten in einer virtuellen Arena. Nach der Experimentalnacht, in der die Probanden gemäß ihrer Gruppenzugehörigkeit schliefen oder wachten, gab es eine weitere Erholungsnacht, um direkte Effekte der Schlafdeprivation auszugleichen. Anschließend kehrten die Probanden 47-51 Stunden nach Beginn der ersten Sitzung, zur zweiten Sitzung ‚Lernen und Abruf‘ (‚learning and retrieval‘), ins Labor zurück. Diese nahm eine Zeit von zwei Stunden in Anspruch und beinhaltete zwei Durchgänge der Navigationsaufgabe. Hierbei traten die Probanden erneut in die virtuelle Umgebung ein, mit der sie sich während der ersten Sitzung bereits vertraut gemacht hatten. Sie wurden während der Lernphase aufgefordert die Position von acht neuen Objekten in der virtuellen Umgebung zu lernen. Im Unterschied zur ersten Sitzung wurde nun aber jeweils nur ein Hinweisreiz präsentiert, also entweder der Grenzwall oder die proximale Landmarke. Vier Objekte wurden in Gegenwart der Landmarke präsentiert und gelernt, vier weitere in Gegenwart des Grenzwalls. Die Beziehung des Grenzwalls und der Landmarke zueinander und ihre Position in der virtuellen Umgebung war dabei identisch zu denen während der ersten Sitzung. Um zu testen, inwieweit die Probanden in der Lage sind, ihre Kenntnisse über die Beziehung der Hinweisreize zueinander zu nutzen, wurden die Objektpositionen während der Abrufphase in Bezug auf den jeweils anderen Hinweisreiz abgefragt. Das heißt, diejenigen Objekte, die während der Lernphase in Gegenwart des Grenzwalls gelernt wurden, wurden nun in Gegenwart der proximalen Landmarke abgefragt und umgekehrt wurden diejenigen Objekte, die in Gegenwart der Landmarke gelernt wurden nun in Bezug auf den Grenzwall abgefragt. Abbildung 6 gibt einen Überblick über das Studiendesign.

	Tag 1 <i>Familiarisierungsphase</i>		Nacht 1	Tag 2	Nacht 2	Tag 3 <i>Lern- und Abrufphase</i>
Wachgruppe	Hinweisreize: Grenzwall <u>und</u> Landmarke	Offenlegung der Gruppenzugehörigkeit				Hinweisreizwechsel: Grenzwall oder Landmarke \times Grenzwall oder Landmarke
Schlafgruppe						
Ort	IMP		Wach: IMP Schlaf: Zuhause	Zuhause	Zuhause	MPI



Legende:  Wach IMP - Institut für medizinische Psychologie
 Schlaf MPI - Max-Planck Institut für biologische Kybernetik

Abbildung 6: Überblick Studiendesign

2.3 Navigationsaufgabe

In einer virtuellen Umgebung sollen die Positionen von acht verschiedenen Objekten gelernt werden. Als Objekte dienen graphische Abbildungen alltäglicher Gegenstände. Es gibt drei verschiedene Versuchsphasen. In der ersten Sitzung findet die Familiarisierungsphase, in der zweiten Sitzung die Lern- und Abrufphase statt.

2.3.1 Virtuelle Umgebung

Die Verwendung einer virtuellen Realität zur Untersuchung von Navigation und Orientierung im Raum, bietet neben einer idealen Kontrollierbarkeit und Manipulationsmöglichkeiten, den entscheidenden Vorteil, dass neuronale Aktivierungen im fMRT aufgezeichnet werden können. Prinzipiell sind die Navigationsleistungen in einer virtuellen Realität vergleichbar mit denen in einer realen Umwelt (Ruddle et al., 1997). Es fehlt jedoch unweigerlich an propriozeptiven Informationen, sowie Beschleunigungs- und Lageinformationen des Vestibularapparates.

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Navigationsaufgabe wurde von Doeller et al. (2008) konzipiert und für die vorliegende Studie angepasst. Zur visuellen Darstellung der virtuellen Umgebung wurde die Unreal Engine 2 von Epic Games (Epic Games Inc., Cary, NC, USA) verwendet. Bei der virtuellen Umgebung handelt es sich um eine alpine Landschaft, die teilweise Berge im entfernten Hintergrund zeigt und eine weite Grasfläche als Untergrund verwendet. An Stellen an denen keine Berge zu sehen sind, ist der Himmel mit vereinzelt Wolken sichtbar. Die virtuelle Umgebung aus unterschiedlichen Perspektiven ist in Abbildung 7 veranschaulicht. Die gesamte Hintergrundumgebung ist ins Unendliche projiziert, so dass sie Richtungs- aber keine Entfernungsinformationen enthält. In der nahen Umgebung sind je nach Versuchsphase ein oder zwei verschieden Hinweisreize eingeblendet. Erstens eine fixe, proximale Landmarke (,landmark‘) in Form eines rot-weiß gestreiften Verkehrspyloons, als Stimulus für eine striatale, landmarkenbasierte Routenstrategie. Zweitens ein kreisförmiger felsiger Grenzwall (,boundary‘). Dieser hat eine Höhe von zwei virtuellen Metern (vm) und grenzt die Arena auf einen Durchmesser von 80 vm ein. Der Wall dient zur Stimulation einer hippocampalen, grenzenbasierten Orientierungsstrategie. Beide Hinweise sind rotationssymmetrisch, sie helfen primär bei der Einschätzung von Entfernungen und nicht bei der Richtungsorientierung.

Die Probanden starten bei jedem Durchgang von einer zufälligen Position innerhalb der Arena und navigieren aus einer Egoperspektive mit den Pfeiltasten der Tastatur. Als Bewegungsrichtungen sind geradeaus gehen und separat Drehungen nach rechts oder links möglich. Objekte werden automatisch beim Gehen über die Objektposition eingesammelt. Das Ablegen von Objekten erfolgt mit der Leertaste.

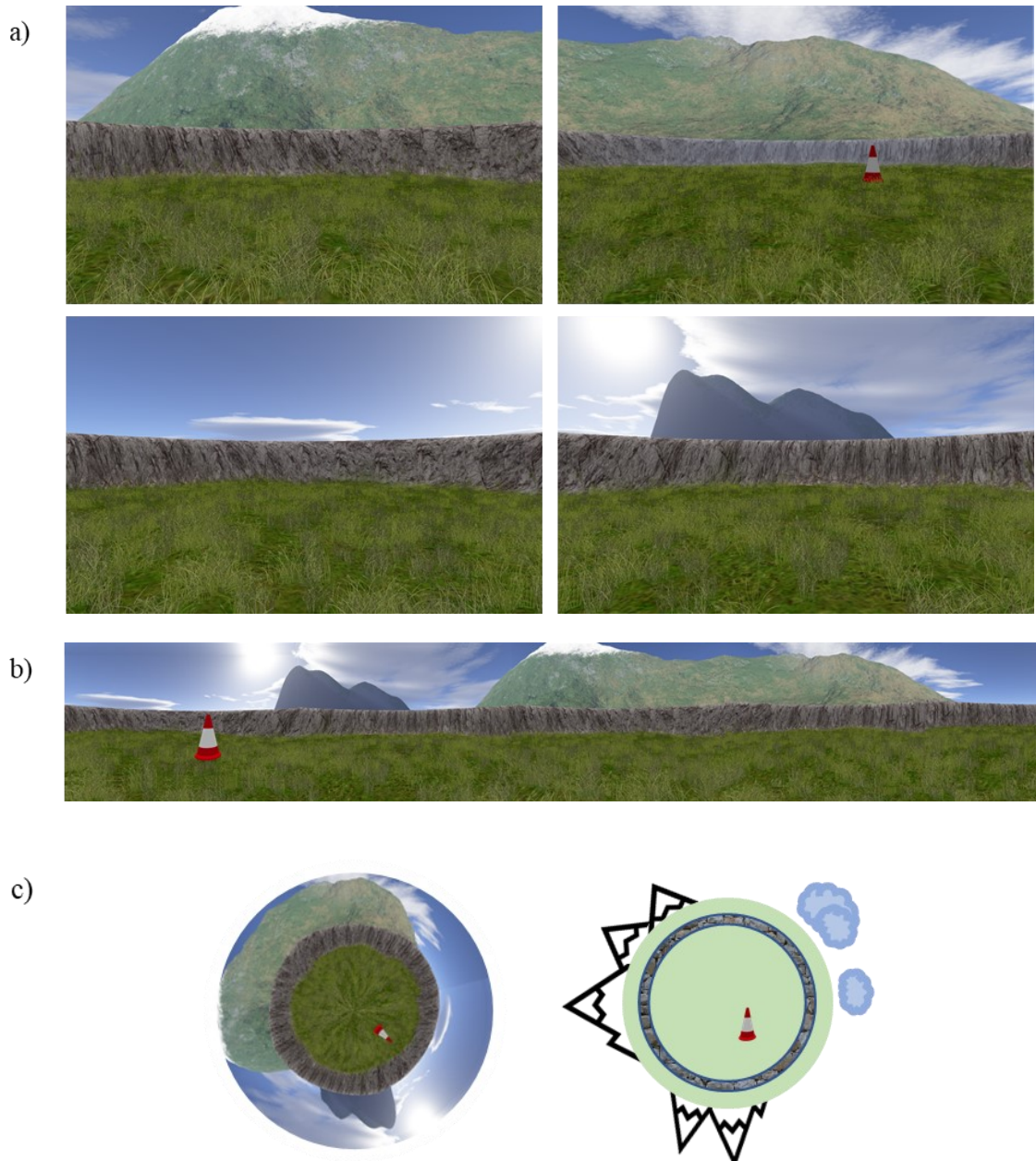


Abbildung 7: Ausschnitt aus der virtuellen Umgebung der Navigationsaufgabe mit den Hinweisreizen Verkehrspyron als proximale Landmarke und Grenzwall: (a) aus Sicht des Probanden; (b) Panoramaansicht der Arena; (c) Übersicht von oben und symbolisch vereinfachte Darstellung.

2.3.2 Variationen zwischen den Versuchsphasen

In der Familiarisierungsphase der ersten Sitzung werden zunächst acht Objekte an acht verschiedenen Positionen gelernt. In der Lernphase der zweiten Sitzung erlernen die Probanden wiederum acht Positionen von acht Objekten. Diese sind sowohl in Gestalt, als auch in Position unterschiedlich von denen der Familiarisierungsphase. Während der Abrufphase werden ausschließlich die Objektpositionen der Lernphase abgefragt. Als Objekte dienten bei der ersten Sitzung ein Zylinderhut, ein Basketball, eine Gummi-Ente, eine Blumenvase, ein Schmetterling, ein Eimer, ein Kerzenständer und ein Ventilator (vgl. Abbildung 8). Bei der zweiten Sitzung wurden stattdessen eine Aktentasche, ein Paar Holzschuhe, ein Globus, eine Babyflasche, ein Büroheftgerät, ein Computer, ein Wecker und ein Akkordeon als Objekte verwendet (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 8: Objekte Sitzung 1



Abbildung 9: Objekte Sitzung 2

Während der zweiten Sitzung wurden die Objekte mit jeweils einem der beiden Hinweisreize (Landmarke und Grenzwall) präsentiert. Die Zuweisung der Objekte zu Grenzwall oder Landmarke wurde während der Lernphase variiert und in zwei Gruppen über die Versuchspersonen hinweg balanciert. In der Abrufphase ist für jedes Objekt der gegenteilige Hinweisreiz zur Lernphase zugegen. Um den Probanden in der Landmarkenbedingung keinen Anhaltspunkt über die ursprüngliche Lage des Grenzwalls zu geben, ist der Bewegungsspielraum weitläufiger und beträgt 120 cm.

2.3.3 Durchgangszyklen während der Navigationsaufgabe

Die Navigationsaufgabe umfasst vier unterschiedlichen Durchgangszyklen (,trials‘), die die Probanden durchlaufen: Erkundungsdurchgang, Aneignungsdurchgänge (,acquisition trials‘), Rückmeldungsdurchgänge (,feedback trials‘) und Prüfdurchgänge

(,test trials‘). Die Familiarisierungsphase in der ersten Sitzung, sowie die Lernphase in der zweiten Sitzung umfassen die ersten drei Durchgangszyklen. Die Abrufphase in der zweiten Sitzung umfasst dahingegen ausschließlich Prüfdurchgänge.

Erkundungsdurchgang

Vor dem Beginn der eigentlichen Aufgabe hatten alle Probanden die Möglichkeit sich mit der Umgebung und der Navigation darin vertraut zu machen, indem sie mit den Pfeiltasten einer handelsüblichen Computertastatur (rechts, links, geradeaus) navigieren und damit in der Umgebung umherlaufen können. In dieser Erkundungszeit sind noch keine Objekte dargestellt. Die Probanden wurden aufgefordert die Versuchsaufgabe selbstständig zu starten (F1 Taste) sobald sie sich sicher in der Umgebung fühlten.

Aneignungsdurchgänge (aquisition trials)

Sowohl die Familiarisierungsphase, als auch die Lernphase begannen nun mit Aneignungsdurchgängen, in denen den Probanden die acht Objekte nacheinander einzeln in der Umgebung präsentiert wurden. Die Probanden waren instruiert sich die Position des Objekts in der virtuellen Umgebung möglichst genau einzuprägen. Es bestand kein Zeitlimit. Ein Aneignungsdurchgang endete, sobald die Probanden aktiv über das aktuelle Objekt steuerten und es damit ,einsammelten‘. Im Anschluss daran startete der nächste Aneignungsdurchgang bis alle acht Objekte einmalig gezeigt wurden. In der Familiarisierungsphase sind stets beide Hinweisreize (Landmarke und Grenzwall) sichtbar, in der Lernphase dahingegen ist die Hälfte der Objekte mit der Landmarke gepaart, die andere mit dem Grenzwall. Das Prinzip der Aneignungsdurchgänge für die Familiarisierungsphase ist in Abbildung 10a dargestellt, für die Lernphase in Abbildung 11a.

Rückmeldungsdurchgänge (feedback trials)

Sobald sich die Probanden die Positionen aller acht Objekte initial angeeignet hatten, wurden diese in den Rückmeldungsdurchgängen gefestigt. Jeder Rückmeldungsdurchgang begann zunächst mit der Präsentation eines der acht Objekte zentral auf grauem Hintergrund. Anschließend wurden die Probanden in die virtuelle Arena gesetzt, ohne dass das Zielobjekt sichtbar war. Die Probanden waren instruiert, frei zu der Stelle innerhalb der virtuellen Arena zu navigieren, an der sie die richtige Position vermuteten und dort die Leertaste zum Ablegen des Objekts zu drücken. Die

Zeit hierfür war auf 45 Sekunden limitiert. Nach Ablage des Objekts gab es eine Rückmeldung der korrekten Position als erneute Lernmöglichkeit. Das Zielobjekt wurde nun an seiner richtigen Stelle dargestellt und die Genauigkeit der Ablage wurde durch Anzeige eines Punktestandes vermittelt. Die Probanden wurden aufgefordert das Objekt erneut an seiner korrekten Position einzusammeln und sich diese zu verinnerlichen. Für diesen Teil bestand wiederum keine zeitliche Begrenzung. Der nächste Rückmeldungsdurchgang begann erst wenn sich die Probanden über das aktuelle Zielobjekt an der korrekten Position bewegten. Es fanden insgesamt sechs Blöcke statt, in denen jeweils ein Rückmeldungsdurchgang für jedes Objekt durchlaufen wurde. Die Reihenfolge der acht Objekte wurde über die Blöcke variiert. Die Probanden konnten in Abhängigkeit von der Genauigkeit ihrer Ablage (Distanz zwischen erinnerter und korrekter Position) bei jedem Durchgang zwischen null und drei Punkte erreichen (≤ 5 vm = 3 Punkte, 6-10 vm = 2 Punkte, 11-15 vm = 1 Punkt, ≥ 16 vm = 0 Punkte). Die Punkte des aktuellen Durchgangs sowie die bis dahin erreichte Gesamtpunktzahl wurden bei jedem Durchgang als objektive Rückmeldung angezeigt. Es konnten maximal 144 Punkte in den 48 Durchgängen (6 x 8 Objekte) erreicht werden. Aus der Gesamtpunktzahl berechnete sich zum Schluss die prozentuale Erfolgsprämie von bis zu 10 € pro Sitzung, die die Probanden zur Motivation ergänzend erreichen konnten.

Das Prinzip der Rückmeldungsdurchgänge für die Familiarisierungsphase ist in Abbildung 10b und für die Lernphase in Abbildung 11b veranschaulicht. Nachdem die sechs Blöcke mit je allen acht Objekten durchlaufen wurden, ist die Navigationsaufgabe in der ersten Sitzung beendet.

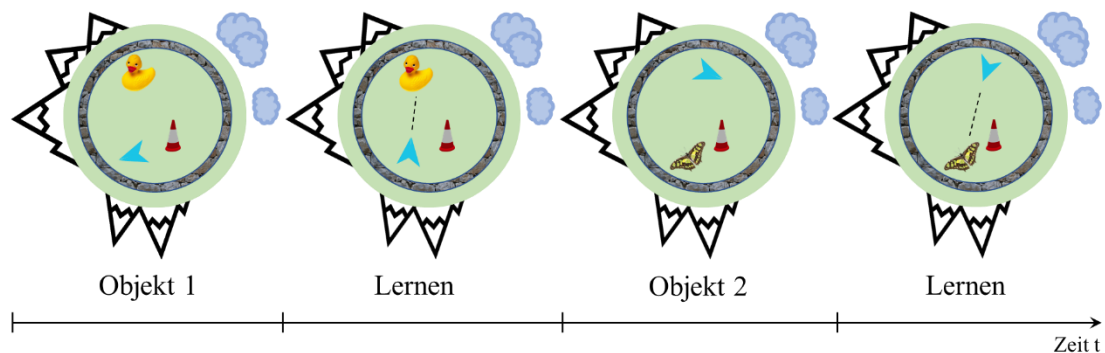
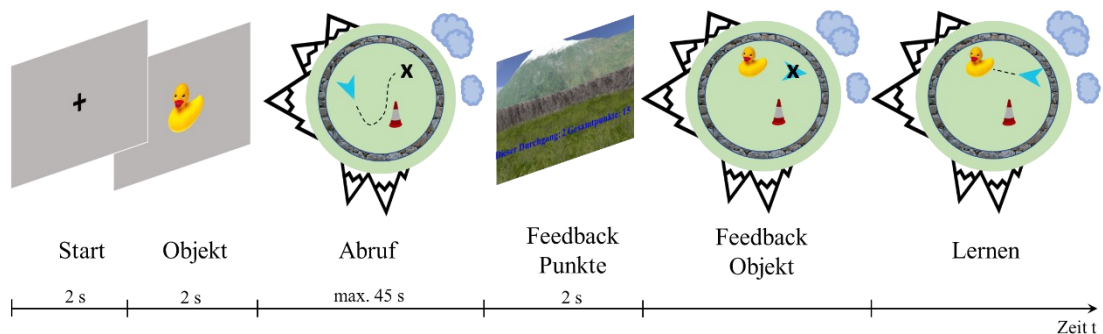
a) *Familiarisierungsphase Aneignungsdurchgang*b) *Familiarisierungsphase Rückmeldungsdurchgang*

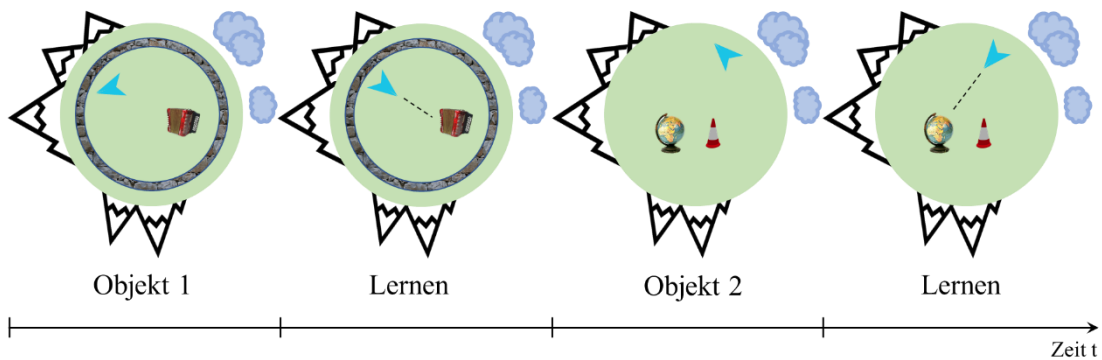
Abbildung 10: Überblick Prinzipien der verschiedenen Durchgangszyklen in der Familiarisierungsphase bei Sitzung 1: (a) Aneignungsdurchgang (b) Rückmeldungsdurchgang.

Prüfdurchgänge (test trials)

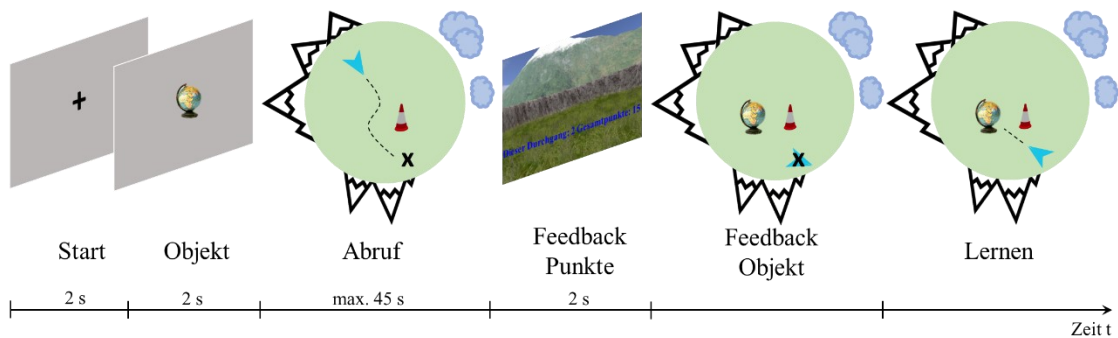
Prüfdurchgänge werden ausschließlich in der Abrufphase der zweiten Sitzung absolviert. Die zuvor in der Lernphase gelernten acht Objekte werden in vier Blöcken von acht Prüfdurchgängen abgerufen. Die Objekte werden zunächst wieder auf grauem Hintergrund präsentiert bevor die Probanden in der virtuellen Arena frei platziert werden, um an die erinnerte Position des Zielobjekts zu navigieren und es dort durch die Leertaste abzulegen. Als Besonderheit wird in den Prüfdurchgängen der zugeordnete Hinweisreiz gewechselt. Objekte die während der Lernphase mit dem Grenzwall gelernt wurden, werden in der Abrufphase demnach zusammen mit der Landmarke präsentiert und umgekehrt werden Objekte die mit der Landmarke präsentiert werden nun in Bezug auf den Grenzwall geprüft. Über den Wechsel der Objekt-Hinweisreiz Zuordnung wurden die Probanden erst unmittelbar vor der Abrufphase informiert, um ihnen keine Gelegenheit zu geben sich schon während der Lernphase auf den Wechsel

vorzubereiten. Die Prüfdurchgänge der Abrufphase enden mit der Ablage des jeweiligen Objektes. Es erfolgt keine Rückmeldung über die Leistung der Probanden in Form eines Punktestandes oder der korrekten Position. Nach dem Ablegen des Objekts erscheint direkt das nächste um keine neue Lerngelegenheit nach dem Hinweisreizwechsel zu bieten. Das Prinzip der Prüfdurchgänge für die Abrufphase ist in Abbildung 11c dargestellt.

a) *Lernphase Aneignungsdurchgang*



b) *Lernphase Rückmeldungs-durchgang*



c) *Abrufphase Prüfdurchgang*

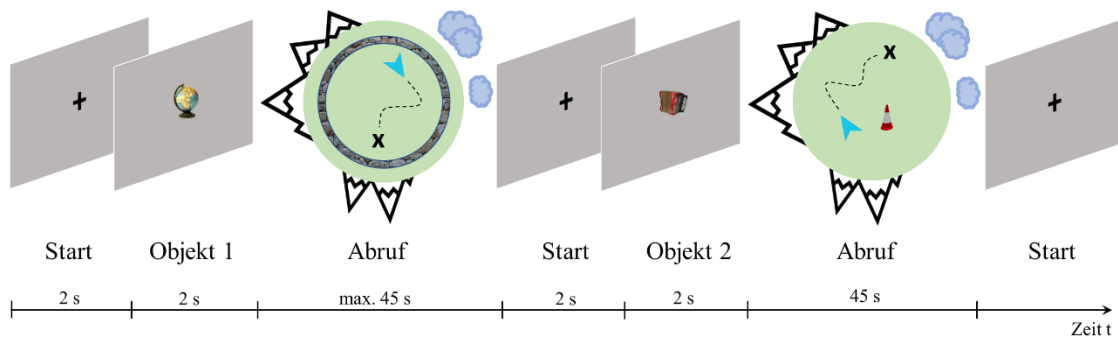


Abbildung 11: Überblick Prinzipien der verschiedenen Durchgangszyklen bei Sitzung 2: (a) Aneignungsdurchgang der Lernphase; (b) Rückmeldungs-durchgang der Lernphase; (c) Prüfdurchgang der Abrufphase.

2.3.4 Übungsaufgabe

Zur Veranschaulichung und Gewöhnung an die Funktionsweise der Navigationsaufgabe und der Steuerung, gibt es in der ersten Sitzung vor der eigentlichen Navigationsaufgabe zunächst eine Übungsaufgabe. Diese folgt dem Prinzip der Hauptaufgabe, stellt jedoch eine optisch andere Umgebung dar, um landschaftsbezogene Lerneffekte zu vermeiden (vgl. Abbildung 12). Es handelt sich bei der Übungsumgebung um eine Wüstenlandschaft, statt der späteren alpinen Landschaft. Als Landmarke dient eine grüne Buschpflanze und es gibt ebenfalls einen felsigen Grenzwall, dieser ist hier allerdings rechteckig, nicht kreisförmig. Der Untergrund ist sandig, felsig und im entfernten Hintergrund sind ringsum Berge zu sehen. Zur Vereinfachung wurden in der Übungsrunde nur drei verschiedene Objekte gelernt und es folgte nur Block mit je einem Rückmeldungsdurchgang pro Objekt.

Die Probanden konnten die Übungsaufgabe wiederholen bis sie sich im Umgang sicher fühlten und wurden explizit aufgefordert Fragen zu stellen, wenn Unklarheiten auftraten. Erst dann begann die eigentliche Navigationsaufgabe, bestehend aus acht neuen Objekten mit sechs Wiederholungsdurchgängen.

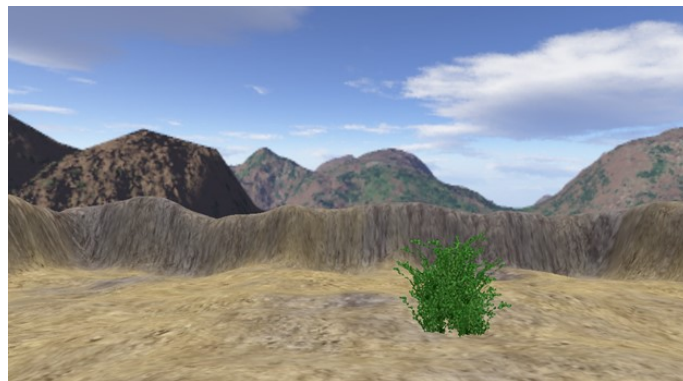


Abbildung 12: Ausschnitt aus der Übungsumgebung mit Buschpflanze als Landmarke und Grenzwall.

2.3.5 Versuchsaufbau der Navigationsaufgabe

Die erste Sitzung fand in einem Raum des Instituts für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie Tübingen mit drei Computerarbeitsplätzen statt. Die Arbeitsplätze waren durch Trennwände voneinander abgeschirmt, so dass Sitzungen mit bis zu drei Probanden gleichzeitig stattfinden konnten. Die Navigationsaufgabe wurde

auf 24 Zoll Computerbildschirmen angezeigt und konnte mit der rechten Hand über die Pfeiltasten der Tastatur navigiert werden. Die Leertaste diente zum Ablegen der Objekte.

Die Lern- und die Abrufphase der zweiten Sitzung fanden in einem 3 Tesla MRT (Siemens Magnetom Prisma syngo 3 Tesla; Siemens, Erlangen) am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik Tübingen in Einzelsitzungen statt. Die Probanden lagen auf dem Rücken im MRT und konnten über eine Spiegelkonstruktion vor ihren Augen auf eine Mattscheibe blicken, die sich ca. 60 Zentimeter hinter ihnen am Ende des Scannertunnels befand. Auf diese Mattscheibe wurde die Navigationsaufgabe seitenverkehrt gespiegelt projiziert, so dass die Seitenverhältnisse der Umgebung für die Probanden wie in der ersten Sitzung dargestellt wurden. Die Navigation erfolgte hier über eine Handkonsole, die auf dem rechten Oberschenkel der Probanden platziert wurde und mit Zeige-, Mittel-, und Ringfinger der rechten Hand bedient werden konnte.

2.4 Versuchsablauf

Der Versuch bestand für die Probanden, wie in Abbildung 13 dargestellt ist, aus zwei Terminen im Abstand von zwei Tagen. Die erste Sitzung umfasste die Familiarisierungsphase und fand in den Räumen des Instituts für medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie statt. Am Ende des Termins wurde den Probanden ihre Gruppenzugehörigkeit offengelegt und es folgte die Experimentalnacht, in der die Probanden entweder wach unter Aufsicht im Institut blieben oder mit einem mobilen Polysomnographen ausgerüstet zuhause schliefen. Die darauffolgende Nacht verbrachten Probanden beider Bedingungen schlafend zuhause. Die zweite Sitzung umfasste die Lern- und Abrufphase und fand 47-51 Stunden nach Beginn des ersten in den Räumlichkeiten des Max-Planck-Instituts für biologische Kybernetik statt.

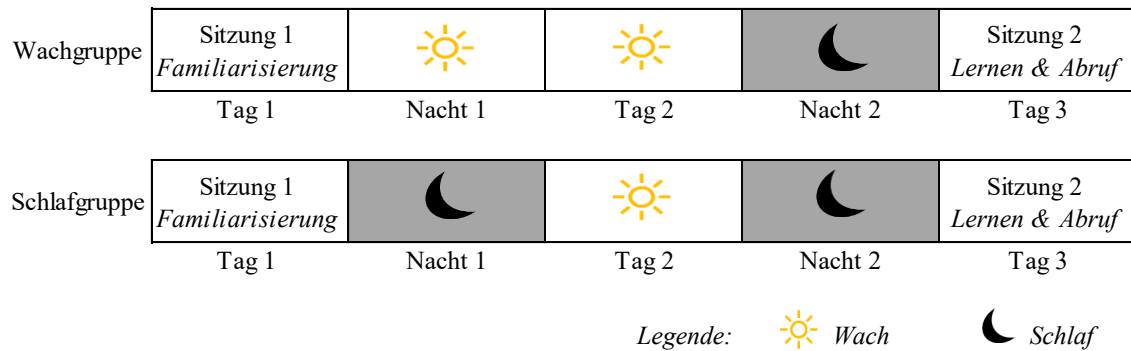


Abbildung 13: Überblick Versuchsablauf

2.4.1 Ablauf Sitzung 1

Der erste Termin begann um 19 Uhr und fand in Gruppen von maximal drei Probanden gleichzeitig statt. Die Probanden eines Termins gehörten alle der gleichen Gruppe an. Eine Übersicht über den Ablauf der ersten Sitzung ist in Tabelle 1 dargestellt. Zunächst wurden die Probanden über den Ablauf der Studie, den Datenschutz, die Risiken und die Freiwilligkeit ihrer Teilnahme aufgeklärt und unterschrieben eine Einverständniserklärung (Aufklärungsbogen; s. Anhang 8.1). Anschließend wurde der erste Teil von Fragebögen bearbeitet. Dieser begann mit der Erhebung von persönlichen Probandendaten (Case Report Form; s. Anhang 0), es folgten die Stanford Schläfrigkeitsskala (SSS; s. Abschnitt 2.5.1, Anhang 8.3), der Positive and Negative Affect Schedule (PANAS; s. Abschnitt 2.5.2, Anhang 8.4) zur emotionalen Befindlichkeit, sowie das Santa Barbara Sense of Direction Formular (SBSOD, s. Abschnitt 2.5.9, Anhang 8.5) zur Selbsteinschätzung der räumlichen Orientierung. Es schlossen sich zwei Fragebögen zur räumlichen Ängstlichkeit sowie der bevorzugten räumlichen Strategie (Lawton 1 + 2, s. Abschnitt 2.5.7 und 2.5.8, sowie Anhang 8.6 und 8.7) an, ein Formular zum aktuellen physischem und psychischem Zustand (Fragen zum aktuellen Zustand; s. Abschnitt 2.5.3, Anhang 8.8) und der Edinburgh Händigkeitfragebogen (EHI; s. Abschnitt 2.5.4, Anhang 8.9). Im nächsten Schritt wurde die Vigilanz (Psychomotor Vigilance Task; PVT; s. Abschnitt 2.5.11) sowie die Abrufgeschwindigkeit aus dem semantischen Gedächtnis (Regensburger Wortflüssigkeitstest; RWT; s. Abschnitt 2.5.10, Anhang 8.10) geprüft.

Nach Beendigung der Tests folgte die Instruktion der Navigationsaufgabe mit Hilfe einer PowerPoint Präsentation und im Anschluss die Übungsaufgabe (s. Abschnitt

2.3.4). Erst dann wurde die eigentliche Navigationsaufgabe mit der Familiarisierungsphase gestartet.

Nach Beendigung der Aufgabe, wurde den Probanden mitgeteilt welcher Gruppe sie angehörten. Im Falle einer Schlafgruppe erfolgte danach das Anlegen der Elektroden für die Polysomnographie, beginnend mit einem Probanden. Währenddessen bekamen die anderen den zweiten Teil an Fragebögen: den Bem Sex-Role-Inventory (BSRI)¹ zur Erhebung der Geschlechtsrollenidentität, zwei Versionen des State-Trait-Anxiety-Inventory (STAI X1 + X2; s. Abschnitt 2.5.5, Anhang 8.12), die Rosenberg-Skala¹ zur Erfassung des Selbstwerts und Teil eins eines postexperimentellen Fragebogens¹, in dem die Probanden Gelegenheit hatten ihre eigene Leistung in der Navigationsaufgabe einzuschätzen, über eventuelle Schwierigkeiten zu berichten und darlegen sollten ob sie einer bestimmten Strategie gefolgt sind. Abschließend folgte der Operation Span Task (OSPAN; s. Abschnitt 2.5.13) zur Ermittlung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und der Tunnel Test¹ zur Untersuchung des präferierten räumlichen Referenzsystems. Da bis zu drei Probanden gleichzeitig anwesend waren, variierte in den Schlafgruppen die Reihenfolge nach der Navigationsaufgabe, in welcher die Fragebögen sowie die beiden Tests am Computer absolviert wurden und das Anlegen der Elektroden erfolgte. In den Wachgruppen absolvierten alle Probanden die Fragebögen und Tests zur gleichen Zeit nach Offenlegen der Gruppenzugehörigkeit.

Bevor die erste Sitzung um ca. 22 Uhr beendet war, erhielten die Probanden noch einen Aktimeter (Actiwatch, Philips, Respironics; s. Abschnitt 2.5.14) und wurden instruiert diese bis zum zweiten Termin zu tragen. Zudem gaben sie eine Speichelprobe¹ ab und erhielten zwei weitere Sputum-Röhrchen, die sie zuhause in festgelegten Zeiträumen füllen sollten, sowie drei Schlaffragebögen (SF-A/R; s. Abschnitt 2.5.6, Anhang 8.13) zur Beschreibung des Schlafes in den drei Nächten während der Studie. Die Probanden der Schlafgruppen gingen anschließend nach Hause, während die Probanden der Wachgruppen die Nacht unter Aufsicht gemeinsam in einem Gemeinschaftsraum des Instituts wach verbrachten.

¹ Die Daten wurden im Rahmen einer größeren Studie erhoben und werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt.

Tabelle 1: Übersicht Ablauf Sitzung 1

Uhrzeit	Tätigkeit	Uhrzeit	Tätigkeit
19:00	Einführung Aufklärung Ablauf, Freiwilligkeit, Risiken Einverständniserklärung	20:35	Bekanntgabe der Gruppenzugehörigkeit Schlafgruppe: Beginn Anlegen der PSG
19:15	Fragebögen Teil 1 Case Report Form SSS PANAS SBSOD LAWTON 1 + 2 Fragen zum aktuellen Zustand Händigkeitsfragebogen EHI	20:40	Fragebögen Teil 2 BSRI STAI X1 + X2 Rosenberg Postexperimenteller Fragebogen
19:35	Tests Teil 1 PVT RWT	21:00	Tests Teil 2 OSPAN Tunnel Test
19:50	Navigationsaufgabe Übungsumgebung Hauptaufgabe <i>Familiarisierungsphase</i>	21:20	Abschluss Anlegen der Aktimeter Mitgabe der Sputumröhrchen Mitgabe SFAR Fragebögen Schlafgruppe: Erläuterung Handhabung PSG
		21:30	Wachgruppe: Wechsel in Gemeinschaftsraum
		22:00	Schlafgruppe: Verabschiedung

2.4.2 Ablauf Sitzung 2

Die zweite Sitzung fand 47-51 Stunden nach Beginn des ersten statt und war als Einzelsitzung mit einem Probanden gestaltet, die um 18, 20 oder 22 Uhr begann. Im Laufe der Sitzung fanden zwei fMRT-Messungen statt, während derer der Proband die Phasen der Navigationsaufgabe durchlief. Zwischen den beiden Messungen gab es eine Pause. Eine Übersicht über den Ablauf der zweiten Sitzung ist in Tabelle 2 dargestellt.

Vor der ersten Messung wurde der Proband noch einmal über den Ablauf und die Sicherheitsregeln im MRT aufgeklärt (s. Anhang 8.14) und bearbeitete Fragebögen zur Schläfrigkeit (SSS; s. Abschnitt 2.5.1), zur emotionalen Befindlichkeit (PANAS; s. Abschnitt 2.5.2), zur State Ängstlichkeit (STAI X1; s. Abschnitt 2.5.5), sowie Fragen zum aktuellen Zustand (s. Abschnitt 2.5.3). Anschließend wurde der Proband im Scanner platziert und eine Localizer-Aufnahme, sowie eine BOLD-Ruhezustandsmessung durchgeführt. Danach begann die Lernphase der Navigationsaufgabe.

In der Pause zwischen den beiden Messungen absolvierte der Proband erneut den Psychomotor Vigilance Task (s. Abschnitt 2.5.11) und den Regensburger Wortflüssigkeitstest (s. Abschnitt 2.5.10), sowie zwei Versionen des Trailmaking Test

(s. Abschnitt 2.5.11) als objektives Maß der Aufmerksamkeit. In der zweiten Messrunde erfolgte dann die Abrufphase und anatomische Aufnahmen.

Abschließend sollte der Proband in einem postexperimentellen Fragebogen¹ bestehend aus Teil 1 und 2, erneut eine Selbsteinschätzung abgeben, über Schwierigkeiten und Strategien berichten und darstellen wie er mit der Änderung der Umgebung zurechtgekommen ist.

Tabelle 2: Übersicht Sitzung 2: Beginn der zweiten Sitzung um 18/ 20/ 22 Uhr in Einzelsitzungen. In dieser Tabelle ist ein beispielhafter zeitlicher Ablauf für den Beginn um 18 Uhr dargestellt.

Uhrzeit	Tätigkeit	Uhrzeit	Tätigkeit
18:00	Einführung Aufklärung Ablauf, Verhaltensregeln MRT, Risiken, Einverständniserklärung	19:05	Tests PVT RWT Trailmaking A + B
18:10	Fragebögen Teil 1 SSS PANAS STAI X1 Fragen zum aktuellen Zustand	19:15	fMRT Teil 2 Platzierung Proband im MRT Navigationsaufgabe <i>Abrufphase</i> Anatomische Aufnahmen
18:15	fMRT Teil 1 Platzierung Proband im MRT Localizer Resting State Navigationsaufgabe <i>Lernphase</i>	19:55	Fragebögen Teil 2 Postexperimenteller Fragebogen
		20:00	Ende

2.4.3 Schlaf-/ Wachmanipulation

Die Schlaf-/ Wachmanipulation fand nach der ersten Sitzung statt. Die Probanden wurden randomisiert nach der Reihenfolge ihrer Anmeldung und terminlicher Verfügbarkeit einer der beiden Gruppen Schlaf oder Wach zugewiesen. Die Gruppenzugehörigkeit wurde erst nach der Navigationsaufgabe am Ende der ersten Sitzung aufgedeckt. Alle Probanden wurden mit einem Aktimeter an ihrem linken Handgelenk ausgestattet, der Beschleunigung und Lichtreize bis zum Ende des Experiments aufzeichnet, um zusätzliche Informationen über die Schlaf-Wach-Aktivität der Probanden zu erhalten. Probanden der Schlafgruppe wurden zusätzlich bis zum nächsten Morgen mit einem mobilen Polysomnographen (PSG+, Somnomedics GmbH,

Randersacker) ausgerüstet, gebetet vor 24 Uhr zu Bett zu gehen und ausreichend zu schlafen.

Die Probanden der Wachgruppe blieben an die erste Sitzung anschließend gemeinsam im Institut unter Aufsicht bis zum nächsten Morgen um 7.30 Uhr wach. In dieser Zeit wurden sie mit Tierdokumentationen (Planet Erde, 2009) und kurzen Spaziergängen beschäftigt und mit Brezeln und Obst als Imbiss versorgt. Anschließend durften sie zu Hause ihrer täglichen Routine nachgehen, wurden aber gebeten erst ab 20 Uhr wieder schlafen zu gehen.

Alle Probanden wurden angehalten, während der gesamten Zeit des Experiments keinen Alkohol, Koffein oder Nikotin zu sich zu nehmen.

2.5 Kontrollvariablen

Die Fragebögen und Tests dienen der Akquisition von Probandendaten und der Sicherstellung der Vergleichbarkeit der beiden Gruppen bezüglich verschiedener Aspekte. Alle Fragebögen und Tests, die in Papierform durchgeführt wurden sind vollständig im Anhang (s. Abschnitt 8) abgebildet.

2.5.1 Standfordschläfrigkeitsskala (SSS)

Die Stanford Schläfrigkeitsskala nach Hoddes et al. (1973) dient der subjektiven, introspektiven Einschätzung der aktuellen Schläfrigkeit oder Wachheit. Dazu kann der Proband aus einer Liste mit acht Aussagen zur Schläfrigkeit, von 1 („Ich fühle mich aktiv, lebhaft, aufmerksam oder sehr wach“) bis 8 („Ich schlafe“) diejenige auswählen, die seinen aktuellen Zustand am zutreffendsten beschreibt.

2.5.2 Positive and Negative Affect Schedule (PANAS)

Der Fragebogen nach Watson et al. (1988) listet insgesamt 20 Adjektive, von denen 10 positive und 10 negative Empfindungen beschreiben (bspw. „aktiv“, „bekümmert“). Der Proband wird aufgefordert, zu jeder Empfindung eine Selbsteinschätzung auf einer fünfstufigen Skala von „gar nicht“ bis „äußerst“ anzugeben. Für die beiden Dimensionen positiver Affekt (PA) und negativer Affekt (NA) werden die Mittelwerte aus den jeweiligen Items errechnet. Höhere Werte repräsentieren ein größeres Ausmaß

positiven bzw. negativen Affekts. Dies dient einer Einschätzung der aktuellen emotionalen Befindlichkeit des Probanden.

2.5.3 Fragen zum aktuellen Zustand

Mit acht Fragen wird die aktuelle physische und psychische Verfassung des Probanden abgefragt und damit eventuelle Einflüsse auf die Teilnahme am Experiment erfasst.

Die Fragen richten sich nach aktueller Wachheit, Dauer und Qualität des Schlafes der letzten Nacht, Einnahme von Medikamenten, Drogen und Alkohol in den letzten 24 Stunden, Zeitpunkt der letzten Mahlzeit, sowie des letzten koffeinhaltigen Getränkes, Nikotinkonsum in den letzten sechs Wochen und außergewöhnlichen Stresssituationen in den letzten 24 Stunden.

2.5.4 Edinburgh Händigkeitfragebogen

Der Edinburgh Händigkeitfragebogen nach Oldfield (1971) wurde zur Feststellung der dominanten Hand der Probanden verwendet. Er beinhaltet 10 Fragen dazu, mit welcher Hand unterschiedliche alltägliche Tätigkeiten ausgeführt werden. Wurden mindestens sieben davon mit „rechte Hand“ beantwortet, galt der Proband als Rechtshänder und damit als geeignet für die Studie.

2.5.5 State-Trait-Anxiety-Inventory (STAI X1 + X2)

Der State-Trait-Anxiety-Inventory ermöglicht eine Einschätzung der Ängstlichkeit einer Person. Dabei findet eine Unterscheidung in Ängstlichkeit als vorübergehender Zustand (State-Anxiety) und Ängstlichkeit als Persönlichkeitseigenschaft (Trait-Anxiety) statt. Der Fragebogen beinhaltet je 20 Aussagen zu beiden Kategorien, die auf einer Skala von 1 „überhaupt nicht zutreffend“ bis 4 „sehr zutreffend“ bewertet werden. Der Abschnitt zur State-Anxiety wurde in beiden Sitzungen, der zur Trait-Anxiety nur in der ersten Sitzung ausgefüllt. Er wurde eingesetzt, um einen möglichen Unterschied in der State-Anxiety zwischen den beiden Gruppen, bedingt durch die Schlafdeprivation, feststellen zu können.

2.5.6 Schlaffragebogen (SF-A-R)

Der Schlaffragebogen A (Görtelmeyer, 2011) ergänzt durch Fragen zur Schlafqualität, Dauer und Unterbrechungen einerseits die Daten der Polysomnographie der

Schlafgruppe und gibt andererseits Informationen über die Erholbarkeit der vorangegangenen Nacht an den beiden Versuchstagen bei allen Probanden. Die Qualität wurde anhand einer Skala von 0-4 entsprechend ‚sehr gut‘ bis ‚nicht gut‘ erfasst. Probanden der Wachgruppe füllten ihn zwei Mal aus, zur Nacht auf den ersten Versuchstag und zur Nacht von Tag zwei auf Tag drei. Probanden der Schlafgruppe füllten zusätzlich einen dritten zur Versuchsnacht von Tag eins auf Tag zwei, in der sie schlafen durften, aus. Die Probanden wurden gebeten, die Fragebögen morgens unmittelbar nach dem Aufstehen auszufüllen, um eine möglichst gute Erinnerung zu gewährleisten.

2.5.7 Lawton 1 (Ängstlichkeit)

Die Spatial Anxiety Scale nach Lawton (1994) ist eine Skala zur Einschätzung der subjektiven räumlichen Ängstlichkeit anhand von acht fiktiven Situationen. Jeder Punkt beschreibt eine herausfordernde Situation, in der der Proband seine persönliche Ängstlichkeit auf einer Skala von 1-5 (1 = überhaupt nicht; 5 = sehr stark) einschätzen soll. Beispielsweise, sich in einem großen unbekanntem Kaufhaus zurechtzufinden.

2.5.8 Lawton 2 (Strategie)

Die Spatial Strategy Scale nach Lawton (1994) erfragt in 14 Sätzen ob in einer geschilderten Situation eine Routen- oder eine Orientierungsstrategie präferiert wird. Die Sätze sollen auf einer Skala von 1-5 (1 = überhaupt nicht typisch; 5 = sehr typisch) bewertet werden. Beispielsweise „Ich merke mir die Landmarken, wie Bauten oder natürliche Objekte, an denen ich vorbei gehe.“ Zur Auswertung werden die Fragen 1-9 der Orientierungsstrategie (allozentriert A) und die Fragen 9-14 der Routenstrategie (egozentriert E) zugeordnet. Es wird jeweils an einem Median geschieden zu welcher Strategie der Proband tendiert. Der Median beträgt 2,78 für die Orientierungsstrategie (< E; > A) und 2,4 für die Routenstrategie (< A; > E). Wird bei Orientierungsstrategiefragen ein hoher Wert erreicht, lässt dies auf eine allozentrierte Herangehensweise schließen, umgekehrt kann durch einen niedrigen Wert jedoch nicht auf eine egozentrierte Strategie geschlossen werden. Dieser einseitige Schluss gilt ebenso für die Routenstrategiefragen.

2.5.9 Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD)

Die Santa Barbara Sense of Direction Scale nach Hegarty et al. (2002) ist ein Fragebogen, um eine Selbsteinschätzung des Probanden über seine räumlichen Orientierungsfähigkeiten zu erhalten. Er besteht aus 15 Fragen, die auf einer Skala von 1 bis 7 (1 = starke Übereinstimmung; 7 = starke Ablehnung) beantwortet werden. Zur Auswertung werden die Angaben der positiv formulierten Items (1, 3, 4, 5, 7, 9, 14) umgekehrt, alle Angaben aufsummiert und über den Probanden gemittelt. Es entsteht eine Zahl zwischen 1 und 7, je höher der Wert, desto besser schätzt der Proband seine eigene Orientierungsfähigkeit ein.

2.5.10 Regensburger Wortflüssigkeitstest (RWT)

Der Regensburger Wortflüssigkeitstest nach Aschenbrenner et al. (2000) wird eingesetzt, um mit Hilfe der Wortflüssigkeit auf die Fähigkeit zu divergentem Denken und Problemlösung eines Probanden rückschließen zu können. Es sollen möglichst viele Lösungswege in begrenzter Zeit generiert werden, dies erfordert neben kognitiver Leistungsfähigkeit auch Kreativität und Motivation.

In zwei Minuten sollten von den Probanden möglichst viele Wörter mit einem vorher bekannt gegebenen Anfangsbuchstaben aufgelistet werden. Als Vorgabe durfte ein Wort nicht mehrmals notiert werden, ebenso ein Wortstamm nur einmal verwendet werden und keine Eigennamen genannt werden. Der Test kam in beiden Sitzungen zur Anwendung. Dafür wurde er in zwei Versionen mit verschiedenen Anfangsbuchstaben (P und M) durchgeführt, so dass jeder Proband am Ende beide Versionen absolviert hatte. Die Reihenfolge des Anfangsbuchstaben wurde dabei randomisiert. Die Anzahl der korrekt generierten Wörter wurde als abhängige Variable genutzt.

2.5.11 Psychomotor Vigilance Task (PVT)

Der PVT nach Dinges and Powell (1985) ist ein einfacher digitaler Reaktionszeittest. Probanden sollen wiederholt am Bildschirm so schnell wie möglich mittels eines Tastenklicks auf den Start eines ablaufenden Millisekundenzählers reagieren. Als abhängige Variable wurde die mittlere Reaktionszeit genutzt.

2.5.12 Trailmaking Test

Aufgabe beim Trailmaking Test nach Reitan (1992) ist es in Version A die Zahlen 1 bis 25, die scheinbar willkürlich auf einem DIN-A4-Blatt verteilt sind, möglichst schnell in aufsteigender Reihenfolge mit einer Linie zu verbinden. In Version B sollen die Zahlen 1 bis 13 und Buchstaben A bis L abwechselnd und in der natürlichen Reihenfolge (1-A-2-B etc.) möglichst schnell verbunden werden. Der Test dient als Maß für die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie die kognitive Flexibilität und lässt Aussagen über Konzentrationsdefizite zu. Als abhängige Variablen dienen sowohl die Dauer in Sekunden, die die Probanden benötigten, um alle Elemente richtig zu verbinden, als auch die Anzahl der gemachten Fehler.

2.5.13 Operation Span Task (OSPAN)

Der Operation Span Task wurde in einer automatisierten Version nach Unsworth et al. (2005) verwendet. Er dient der Messung der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses. Der Test wird am Computer durchgeführt. Aufgabe ist es, sich nacheinander präsentierte Buchstabenfolgen zu merken. Nach jedem Buchstaben erscheint eine mathematische Gleichung, die als richtig oder falsch bewertet werden soll und als Ablenkreiz fungiert. Am Ende jedes Durchganges sollen die Buchstaben in korrekter Reihenfolge wiedergegeben werden. Die Länge der Buchstabenfolge variiert mit jedem Durchgang zwischen 3 und 7 Buchstaben. Von jeder Buchstabenanzahl wurden drei Durchgänge in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Zur Auswertung wurde sowohl die Summe aller korrekt erinnerten Buchstaben, die in der richtigen Reihenfolge wiedergegeben wurden (OSPAN Absolute Score; oAS), als auch die Summe aller korrekt erinnerten Buchstaben unabhängig von der Reihenfolge (OSPAN Partial Load Score; oPLS), als abhängige Variablen benutzt.

2.5.14 Aktimeter

Die Probanden wurden mit einem Aktimeter an ihrem linken Handgelenk ausgestattet. Er wurde nach Abschluss der ersten Sitzung angelegt und bis zum Beginn der zweiten getragen. Die Probanden wurden instruiert den Aktimeter nur zum Duschen abzulegen und vor dem Einschlafen, sowie nach dem Aufwachen den seitlichen Knopf einmal zu betätigen. Damit wird ein Signal gesetzt, dass bei der späteren Auswertung der Schlafenszeit behilflich ist. Die Aktivität der Probanden wurde zusätzlich durch

Aufzeichnung von Beschleunigung und Lichtreizen mit 32 Hz erfasst. Der Aktimeter diente zur Kontrolle der Schlafenszeit aller Probanden und der Überprüfung ob Probanden der Wachgruppe tatsächlich den auf die Experimentalnacht folgenden Tag bis 20 Uhr wach geblieben sind. Auf einem Blatt konnten sie vermerken, zu welchen Zeiten sie den Knopf gedrückt haben und wann und aus welchem Grund sie den Aktimeter abgelegt haben.

2.5.15 Polysomnographie

Zur Aufzeichnung des Schlafes der Probanden der Schlafgruppe zuhause wurde ein mobiler Polysomnograph (PSG+, Somnomedics GmbH, Randersacker) eingesetzt. Die Polysomnographie umfasste Elektroenzephalogramm (EEG), Elektrookulogramm (EOG) und Elektromyogramm (EMG) und wurde im modifizierten Standardverfahren nach Rechtschaffen and Kales (1968) mit Silber-Silberchlorid-Elektroden durchgeführt. Das Elektroenzephalogramm wurde mittels zweier Elektroden an den Positionen C3 und C4 des 10-20-Systems unipolar abgeleitet. Eine Referenzelektrode (REF) wurde auf der rechten Seite der Nasenwurzel angebracht. Zur Ableitung des Elektrookulogramms wurde eine Elektrode etwa einen Zentimeter oberhalb des lateralen rechten Augenwinkels und eine Elektrode etwa einen Zentimeter unterhalb des lateralen linken Augenwinkels positioniert. Das Elektromyogramm wurde im Bereich des Musculus mentalis rechts und links zur bipolaren Messung abgeleitet. Eine Erdungselektrode (GRND) wurde mittig auf der Stirn platziert. Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Verteilung der Elektroden.

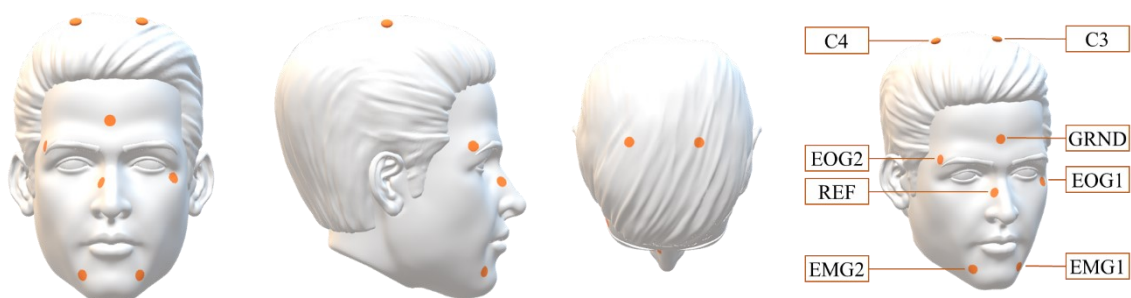


Abbildung 14: Polysomnographie, Verteilung der Elektroden. C3, C4: Elektroenzephalogramm-Elektroden nach dem 10-20-System; GRND: Erdungselektrode; EOG 1, 2: Elektrookulogramm-Elektroden; REF: Referenzelektrode; EMG 1, 2: Elektromyogramm-Elektroden.

Um den Hautwiderstand für die Ableitung möglichst gering zu halten, wurden alle Bereiche an denen Elektroden platziert wurden zunächst mit Octenisept (Schülke &

Mayr GmbH) gereinigt und entfettet und die Haut anschließend mit einer Peeling-Paste (Everi, Spes Medica) leicht aufgeraut. Zur Verringerung des Widerstandes zwischen Haut und Elektrode und damit möglichst geringen Spannungsverlusten, wurde eine Kontaktpaste (EC2 Genuine Grass Electrode Cream, Grass Technologies) auf die Elektroden aufgebracht. Diese sorgt zusätzlich für einen guten Halt der Elektroden. Zur weiteren Sicherung der Position der EEG-Elektroden wurden Mullkompressen (Medicomp, Hartmann) mittels der Kontaktpaste mit den Elektroden verklebt und anschließend ein elastischer Netzschlauchverband (Stülpa, Hartmann) wie eine Mütze zur Fixierung verwendet. Die Elektroden im Gesicht wurden mit Pflastern fixiert.

2.6 Statistische Analyse

Die statistische Datenauswertung erfolgte mit R 4.0.2 (R-Core Team, 2013), implementiert in RStudio für Windows. Die Daten der Kontrolltests (Schlafdauer, Schlafqualität, SSS, Schlafstadien, PANAS, STAI X1 + X2, RWT, Trailmaking, PVT, OSPAN) wurden mittels t-Tests für abhängige Stichproben untersucht. Varianzanalysen der Verhaltensdaten wurden mit ezANOVA (ez 4.4-0; Lawrence, 2016) durchgeführt. Die Freiheitsgrade wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert. Für die Hauptanalyse wurde ein Vier-Faktoren-Modell mit der Gruppenzugehörigkeit (Schlaf/Wach) als Variablen zwischen den Probanden und dem räumlichen Hinweisreiz (Landmarke/Grenzwall) und Lernen/ Abruf als Variablen innerhalb der Probanden verwendet. Für die Analyse der Lern- und Abrufleistung wurde ‚Blöcke‘ als Variable innerhalb der Versuchspersonen mit einbezogen. Untersucht wurden die zwei abhängigen Variablen Navigationsgenauigkeit und Navigationszeit. Die Navigationsgenauigkeit bemaß die Entfernung in virtuellen Metern zwischen der Position, an der die Probanden ein Objekt platzierten, und seiner korrekten Position. Die Navigationszeit stellt die Zeit in Sekunden dar, die benötigt wurde, um ein Objekt zu platzieren. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha < 0,05$ festgelegt.

Um die linearen Trends über Blöcke hinweg zu untersuchen nutzen wir gemischte Modelle, in die Blöcke sowie die Gruppenzugehörigkeit (Schlaf / Wach) als feste Effekte und die Versuchspersonen als zufälliger Effekt mit lmer (lme4; Bates et al., 2015) modelliert wurden. Die resultierenden b-Gewichte wurden mittels des lmerTest-

Packages auf ihre statistische Bedeutsamkeit hin untersucht (Imer Test; Kuznetsova et al., 2017).

Um den Einfluss verschiedener Kontrollmaße, wie Vigilanz, räumlichem Selbstkonzept, räumlicher Präferenz und Ängstlichkeit, sowie verschiedener Schlafparameter auf die Navigationsgenauigkeit und die Navigationszeit bzw. deren Modulation durch den experimentellen Zeitpunkt oder die Gruppenzugehörigkeit zu untersuchen, führten wir Kovarianzanalysen in SPSS (IBM Corp., 2020) durch.

3 Ergebnisse

3.1 Verhaltensdaten

Bei der Auswertung der Verhaltensdaten erwarteten wir die Ergebnisse eines positiven Effekts von Schlaf auf die Integration vorhergehender räumlicher Erfahrungen von Noack et al. (2021) zu replizieren. Wir nahmen demnach an, dass die landmarken- und grenzbasierten Repräsentationen der Familiarisierungsumgebung während des Schlafs integriert werden und später einen flexiblen Umgang mit den einzelnen Hinweisreizen erlauben. Während der Lernphase eigneten sich die Teilnehmer zunächst Objektlokalisationen in Bezug auf den lokalen Grenzwall oder die proximale Landmarke an. Die Verfügbarkeit einer integrierten Gedächtnisrepräsentation wurde anschließend durch eine Abfrage der Lokalisation bei gleichzeitigem Austausch des Hinweisreizes untersucht. Unter der Annahme, dass die Transformation der räumlichen Repräsentation von Landmarken- zu Grenzbezug nur möglich ist, wenn ein integrierter Repräsentationsrahmen zur Verfügung steht, sollten die Kosten des Wechsels in der Schlafgruppe geringer sein als in der Wachgruppe. Hierzu wurden die Daten in Bezug auf die verschiedenen Parameter Navigationsgenauigkeit und Navigationszeit hin ausgewertet.

3.1.1 Navigationsgenauigkeit

Zunächst wurde die mittlere Abrufgenauigkeit während des Endes der Lernphase (Block > 4) und während der Abrufphase gebildet. Der Wechsel der Hinweisreize führte zu einer starken Abnahme der Navigationsgenauigkeit, $F(1,51) = 154.60$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.45$, der sich jedoch nicht zwischen den experimentellen Gruppen (Schlaf / Wach) unterschied, $F(1,51) < 1$ (Abbildung 15 a).

Zur genaueren Untersuchung erfolgte eine Aufschlüsselung nach der Richtung des Hinweisreizwechsels. In Übereinstimmung mit Noack et al. (2021) fanden wir einen stärkeren Abfall der Navigationsgenauigkeit bei einem Wechsel von Grenzwall zu Landmarke als bei einem Wechsel von Landmarke zu Grenzwall, $F(1,51) = 38.11$, $p <$

0.001, $\eta^2 = 0.07$. Auch dieser Befund war jedoch unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit (Schlaf / Wach), $F(1,51) < 1$, siehe Abbildung 15 b.

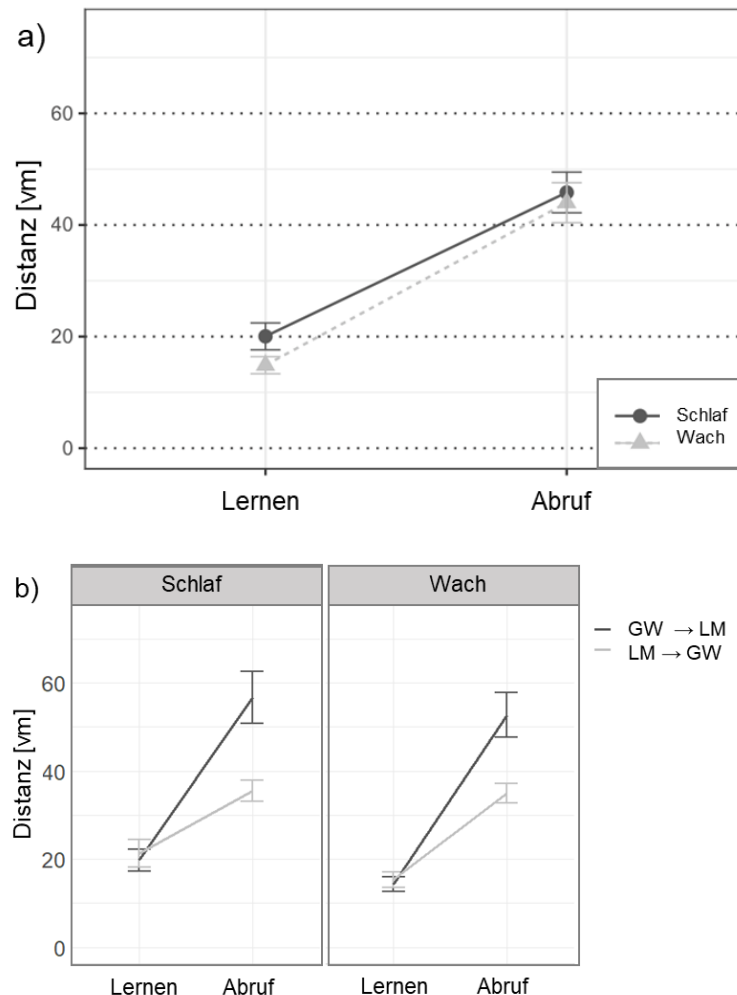


Abbildung 15: a) Interaktion mittlere Navigationsgenauigkeit (\pm SEM) in der Lernphase (Block > 4) und der Abrufphase für Schlaf- und Wachgruppe. b) Getrennte Betrachtung nach Richtung des Hinweisreizwechsels (Grenzwall zu Landmarke/ Landmarke zu Grenzwall) für Schlaf- und Wachgruppe.

Um die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen vor der Experimentalnacht zu bestimmen, wurde die Leistung der Teilnehmer in den sechs Rückmeldungsblöcken der Familiarisierungsphase anhand der Navigationsgenauigkeit ausgewertet. Beide Gruppen zeigten einen deutlichen Lerneffekt im Sinne einer kontinuierlichen Verbesserung der Navigationsgenauigkeit über die sechs Blöcke hinweg, $F(2.96,154.08) = 32.94$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.13$; $b_{Block} = -3.21$, $t(253) = -7.62$, $p > 0.001$. Dabei wiesen die Teilnehmer der Schlafgruppe jedoch von Beginn an insgesamt eine signifikant schlechtere Leistung

auf als die Teilnehmer der Wachgruppe, $F(1,52) = 6.04$, $p = 0.02$, $\eta^2 = 0.08$, die sich auch im Lernverlauf nicht änderte $F(2.96,154.08) = 1.04$, $p = 0.38$, $\eta^2 = 0.005$. Die Werte der Familiarisierungsphase sind in Abbildung 16a veranschaulicht. Ebenso verhielt es sich in der Lernphase nach der Experimentalnacht, als die Objekte jeweils in Bezug zu nur einem Hinweisreiz gelernt und abgerufen wurden. Verglichen mit der Wachgruppe zeigte sich die Schlafgruppe auch hier im Mittel weniger genau, $F(1,52) = 4.93$, $p = 0.03$, $\eta^2 = 0.064$, (Abbildung 16 b). Beide Gruppen verbesserten sich über die Blöcke hinweg, $F(3.37, 175.25) = 53.13$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.223$; $b_{Block} = -5.27$, $t(568) = -12.58$, $p > 0.001$, jedoch ohne einen Einfluss der Schlaf- / Wachgruppe zu offenbaren, $F(3.37,175.25) = 1.08$, $p = 0.36$, $\eta^2 = 0.006$. Die zugehörigen Werte für die Lernphase sind in Abbildung 16b dargestellt.

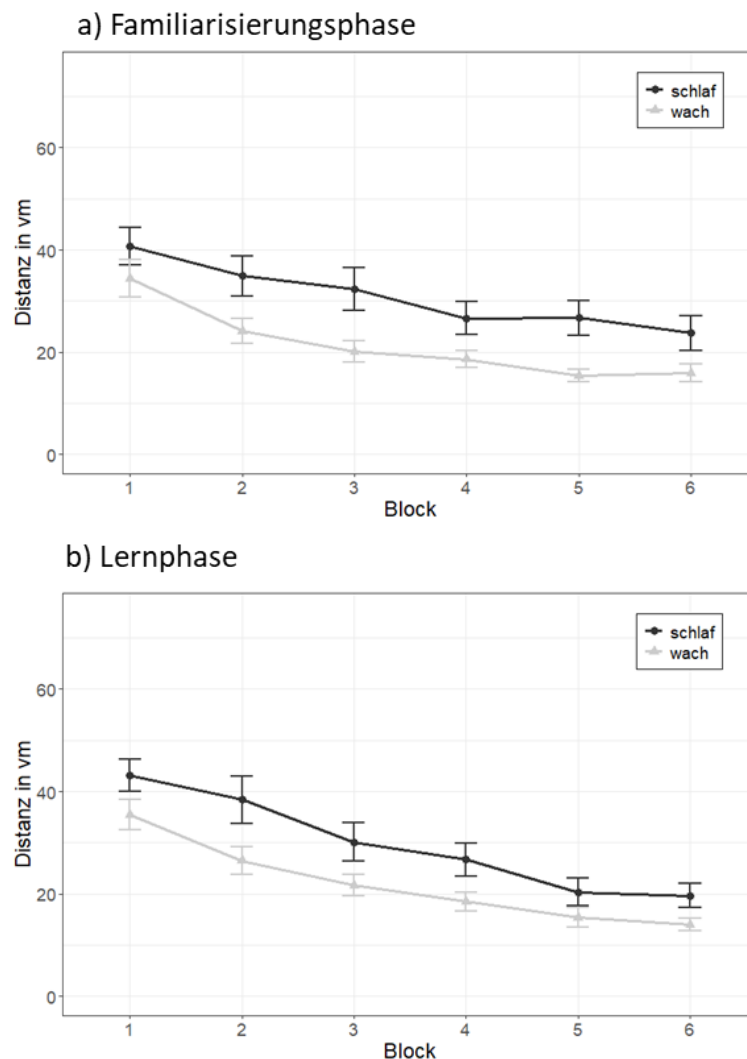


Abbildung 16: Mittlere Navigationsgenauigkeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die sechs Rückmeldungsdurchgänge der a) Familiarisierungsphase und b) Lernphase.

Dieser Unterschied zwischen den Gruppen hob sich in der Abrufphase, nach dem Wechsel der Hinweisreize, auf, wobei jedoch die Interaktion zwischen Phase (Lernphase, Abrufphase) und Gruppe (Schlaf, Wach) nicht signifikant war (siehe oben). Es war kein signifikanter Unterschied mehr zwischen der Schlaf- und der Wachgruppe festzustellen (alle $F_s < 1$). Ebenfalls zeigte sich keine Leistungsverbesserung über die Blöcke hinweg, da es nun keine Lernmöglichkeit zwischen den Blöcken mehr gab ($b_{Block} = 0.63$, $t(362) = 0.55$, $p = 0.59$). Der Verlauf der mittleren Navigationsgenauigkeit der beiden Gruppen in der Abrufphase ist in Abbildung 17 dargestellt.

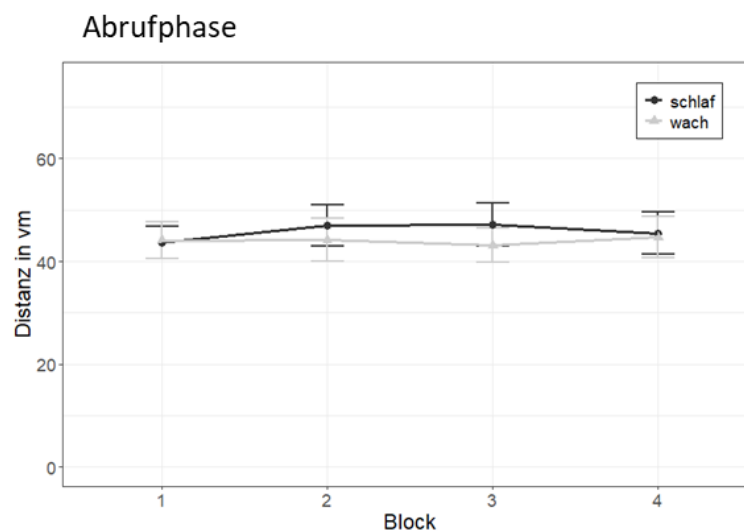


Abbildung 17: Mittlere Navigationsgenauigkeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die vier Prüfdurchgänge der Abrufphase.

3.1.2 Navigationszeit

Zusätzlich zur Navigationsgenauigkeit, erfolgte eine Auswertung der Navigationszeit, die die Probanden benötigten, um die einzelnen Objekte abzulegen. Erneut zeigten beide Gruppen in der Familiarisierungsphase einen Lerneffekt durch eine Steigerung der Ablagegeschwindigkeit über die Blöcke hinweg $F(3.11,161.58) = 13.05$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.059$, $b_{Block} = -0.61$, $t(253) = -6.02$, $p < 0.001$. Dabei war die Schlafgruppe von Beginn an schneller als die Wachgruppe, der Unterschied ist jedoch nicht signifikant $F(1,52) = 1.00$, $p = 0.32$, $\eta^2 = 0.014$. Dies änderte sich auch nicht über die Blöcke hinweg $F(3.11,161.58) = 0.67$, $p = 0.58$, $\eta^2 = 0.003$. Der Verlauf der Navigationszeit über die Blöcke hinweg ist für die Familiarisierungsphase in Abbildung 18a dargestellt.

Auch in Bezug auf die Navigationszeit verhielt es sich in der Lernphase ähnlich wie in der Familiarisierungsphase. Verglichen mit der Schlafgruppe benötigte die Wachgruppe mehr Zeit zum Ablegen der Objekte, jedoch ohne signifikanten Unterschied $F(1,52) = 3.62, p = 0.06, \eta^2 = 0.052$. Beide Gruppen verschnellerten sich über die Blöcke hinweg $F(3.47,180.46) = 24.34, p < 0.01, \eta^2 = 0.085, b_{Block} = -0.68, t(568) = -7.46, p < 0.001$, ohne einen Einfluss der Schlaf-/ Wachgruppe zu zeigen $F(3.47,180.46) = 1.07, p = 0.37, \eta^2 = 0.004$, siehe Abbildung 18b.

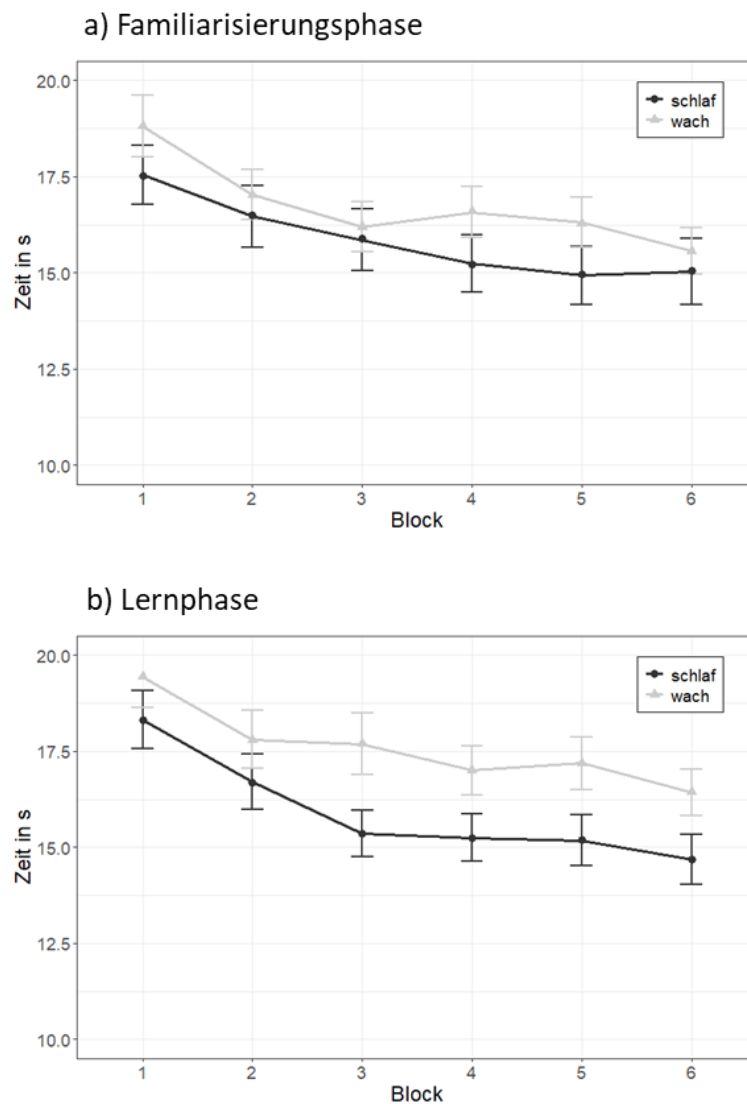


Abbildung 18: Mittlere Navigationszeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die sechs Rückmeldungsdurchgänge der a) Familiarisierungsphase und b) Lernphase.

Im Unterschied zur Navigationsgenauigkeit, hob sich der zeitliche Unterschied zwischen den Gruppen in der Abrufphase nicht auf, die Schlafgruppe war signifikant

schneller als die Wachgruppe $F(1,51) = 4.84, p = 0.03, \eta^2 = 0.073$. Es war nach wie vor eine Verschnellerung über die Blöcke hinweg erkennbar $F(2.48,126.35) = 6.72, p < 0.01, \eta^2 = 0.021, b_{Block} = -0.32, t(362) = -1.94, p = 0.05$, jedoch erneut ohne einen Einfluss der Gruppenzugehörigkeit zu zeigen $F(2.48,126.35) = 2.07, p = 0.12, \eta^2 = 0.007$. Der Verlauf für die Abrufphase ist in Abbildung 19 dargestellt.

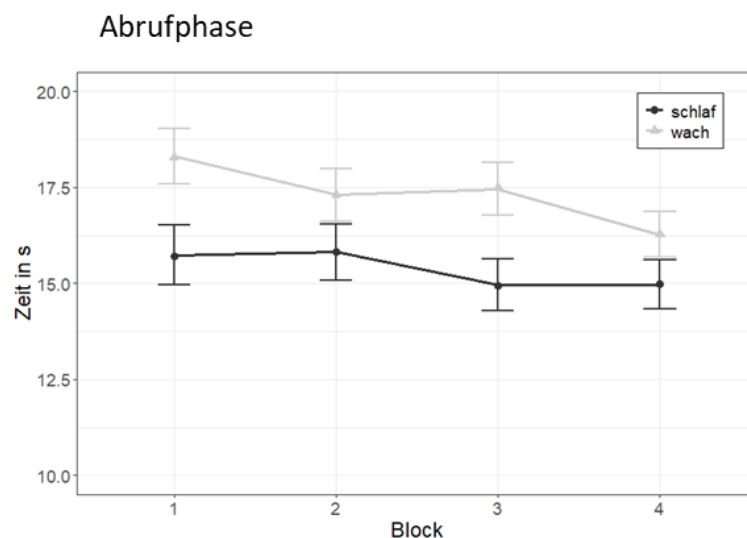


Abbildung 19: Mittlere Navigationszeit (\pm SEM) der Schlaf- und Wachgruppe über die vier Prüfdurchgänge der Abrufphase.

3.1.3 Kontrollanalysen

Um mögliche Ursachen für die Baselineunterschiede in der Navigationsgenauigkeit zu explorieren, führten wir einige Kovarianzanalysen durch in denen interindividuelle Unterschiede in Vigilanz, räumlicher Kompetenz und räumlichem Selbstkonzept und Ängstlichkeit berücksichtigt werden sollten. Dabei standen einerseits der allgemeine Einfluss der Kovariaten auf die Navigationsgenauigkeit, sowie die oben bereits beschriebenen zentralen Interaktionen von Schlafgruppe und Phase, Schlafgruppe und Umgebung, sowie Schlaf, Phase und Umgebung sowohl für die Navigationsgenauigkeit als auch für die Navigationszeit im Zentrum des Interesses. Zunächst nahmen wir die Navigationsgenauigkeit während der Familiarisierung in ein gemischtes lineares Modell zur Prüfung von Phase (Lernen vs. Abruf) und Umgebung (Landmarke vs. Grenzwall). Wie erwartet, zeigte sich ein reliabler Zusammenhang mit der Genauigkeit während Lern- und Abrufphase ($F(1,49) = 5.20, p = 0.027, \eta^2 = 0.096$), es zeigte sich jedoch keine Interaktion mit weiteren Modelltermen. Die zentralen Interaktionen zwischen

Schlafgruppe und Phase, Schlafgruppe und Umgebung, sowie Schlafgruppe, Phase und Umgebung blieben ebenfalls qualitativ unverändert ($F_s < 1$). Die Betrachtung interindividueller Unterschiede in der Navigationszeit während der Familiarisierung und der Vigilanz (PVT) während der experimentellen Sitzung zeigten ebenso keinen allgemeinen Einfluss auf die Navigationsgenauigkeit während Lern- und Abrufphase ($F_s < 1$). Gleichmaßen zeigte die Betrachtung des räumlichen Selbstkonzepts (SBSOD) keinen signifikanten Einfluss und erklärte nicht die Gruppenunterschiede zwischen Schlaf und Wach. Die statistische Kontrolle interindividueller Unterschiede räumlicher Ängstlichkeit (Lawton 1) und räumlicher Präferenz (Lawton 2) zeigten einen Zusammenhang mit der Navigationsgenauigkeit während der Lern- und Abrufphase (Lawton 1: $F(1,49) = 7.03, p = 0.01, \eta^2 = 0.125$; Lawton 2: $F(1,49) = 4.88, p = 0.03, \eta^2 = 0.091$), jedoch ergab sich auch hier keine Interaktion mit weiteren Modellthermen wie der Interaktionen zwischen Schlafgruppe und Phase, Schlafgruppe und Umgebung, sowie Schlafgruppe, Phase und Umgebung ($F_s < 1$).

Ergänzend führten wir Kovarianzanalysen durch um den allgemeinen Einfluss der Kovariaten auf die Navigationszeit während der Lern- und Abrufphase, sowie die Interaktionen von Schlafgruppe und Phase, Schlafgruppe und Umgebung und Schlaf, Phase und Umgebung auf die Navigationszeit zu untersuchen. Hier ergab sich keinerlei signifikanter Einfluss von der Navigationszeit während der Familiarisierung, der Vigilanz (PVT), des räumlichen Selbstkonzepts (SBSOD), der räumlichen Ängstlichkeit (Lawton 1) und der räumlichen Präferenz (Lawton 2) auf die Navigationszeit ($F_s < 1$). Somit konnte auch hier keine Ursache für die Baseline-Unterschiede zwischen der Schlaf- und der Wachgruppe gefunden werden.

Darüber hinaus untersuchten wir die Korrelationen der verschiedenen Schlafparameter mit den Differenzen der Navigationsgenauigkeit (dNavi_m), bzw. Navigationszeit (dNavi_d) zwischen Lernen und Abruf. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Es zeigte sich lediglich eine negative Korrelation zwischen der Navigationszeitdifferenz und der Gesamtschlafdauer der EEG-Auswertung. Ferner zeigt sich eine Korrelation zwischen der Gesamtschlafdauer anhand der Aktimeterdaten und der EEG-Daten. Diese Übereinstimmung der beiden Erhebungsmaßnahmen spricht für eine verlässliche Handhabung der Aktimeter durch die Probanden. Darüber hinaus ergaben sich keine relevanten Korrelationen.

Tabelle 3: Korrelationen der Schlafparameter mit den Navigationsdifferenzen (Differenz zwischen Lernen und Abruf). DNav_i_m: Navigationsdifferenz bzgl. Navigationsgenauigkeit; dNav_i_d: Navigationsdifferenz bzgl. Navigationszeit; ActiN2min: Gesamtschlafdauer in Minuten nach Aktimeterauswertung; EEGDauermin: Gesamtschlafdauer in Minuten nach EEG-Auswertung; S3/ S4: Zeit in Schlafstadium 3/ 4 in Minuten.

		ActiN2min	S3min	S4min	dNav_i_m	dNav_i_d	EEGDauermin
ActiN2min	Pearson-Korrelation	1	,383	-,600**	,219	-,136	,555*
	Sig. (2-seitig)		,106	,007	,303	,525	,014
	N	24	19	19	24	24	19
S3min	Pearson-Korrelation	,383	1	,059	-,221	-,135	,353
	Sig. (2-seitig)	,106		,801	,336	,560	,117
	N	19	21	21	21	21	21
S4min	Pearson-Korrelation	-,600**	,059	1	-,210	,034	-,323
	Sig. (2-seitig)	,007	,801		,360	,882	,153
	N	19	21	21	21	21	21
dNav_i_m	Pearson-Korrelation	,219	-,221	-,210	1	-,077	-,192
	Sig. (2-seitig)	,303	,336	,360		,709	,404
	N	24	21	21	26	26	21
dNav_i_d	Pearson-Korrelation	-,136	-,135	,034	-,077	1	-,436*
	Sig. (2-seitig)	,525	,560	,882	,709		,048
	N	24	21	21	26	26	21
EEGDauermin	Pearson-Korrelation	,555*	,353	-,323	-,192	-,436*	1
	Sig. (2-seitig)	,014	,117	,153	,404	,048	
	N	19	21	21	21	21	21

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

3.2 Kontrolltests

Kontrolltests wurden zu mehreren Zeitpunkten während der Datenerhebung durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen bezüglich verschiedener Aspekte sicherzustellen. Im Folgenden sind die Ergebnisse der verschiedenen Tests und Fragebögen dargelegt.

3.2.1 Schlaf

Informationen zum Schlaf der Probanden wurden zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst. Um einen Vergleich der Ausgangsbedingungen zu ermöglichen, füllten alle Probanden zu Beginn der ersten Sitzung den SF-A-R zur vorhergehenden Nacht aus, sowie die Standfordschläfrigkeitsskala. Die Auswertung zeigte, dass sich die beiden Gruppen (schlaf/ wach) weder in der durchschnittlichen Schlafdauer noch in der subjektiv

erfahrenen Schlafqualität noch der aktuellen Schläfrigkeit signifikant unterschieden. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Überblick und Gruppenvergleich über die durchschnittliche Schlafdauer und Schlafqualität der Probanden in der Nacht vor der ersten Sitzung, sowie die Angaben zur aktuellen Schläfrigkeit anhand der Standfordschläfrigkeitsskala in der ersten Sitzung (SSS 1).

	Dauer SF-A-R (M ± SD in min)	Qualität (M ± SD)	SSS 1 (M ± SD)
Schlafgruppe	466.52 ± 73.05	1.08 ± 0.83	2.33 ± 0.67
Wachgruppe	489.17 ± 50.08	0.89 ± 0.99	2.44 ± 0.99
t-Test	t(45) = -1.22, p = 0.23	t(51) = 0.73, p = 0.47	t(52) = -0.47, p = 0.64

In der Experimentalnacht wurde für die Schlafgruppe die Schlafdauer anhand der Aktimeter und der Polysomnographie erfasst, sowie eine subjektive Angabe zur Schlafqualität im Rahmen des SF-A-R aufgenommen. Die Probanden schliefen durchschnittlich 466.23 ± 76.60 min laut Aktimeter und 416.50 ± 54.86 min laut PSG. Die Schlafqualität wurde im Mittel mit 1.93 ± 1.09 angegeben, wobei die Probanden von einer Skala von 0 - 4 („sehr gut“ bis „nicht gut“) auswählen konnten. Die erfassten Werte sind in Tabelle 5 dargestellt. Es besteht eine positive Korrelation zwischen den Werten der Schlafdauer anhand der Aktimeter und anhand der PSG. Die zugehörigen Auswertungen sind in Tabelle 3 abgebildet.

Tabelle 5: Schlafdauer und Schlafqualität der Schlafgruppe in der Experimentalnacht.

	Dauer Actimeter (M ± SD in min)	Dauer PSG (M ± SD in min)	Qualität (M ± SD)
Schlafgruppe	466.23 ± 76.60	416.50 ± 54.86	1.93 ± 1.09

Darüber hinaus zeigt Tabelle 6 den durchschnittlichen Anteil der einzelnen Schlafphasen an der Gesamtschlafdauer während der Experimentalnacht. Von den 27 Teilnehmern der Schlafgruppe konnten die PSG von 5 Teilnehmern nicht ausgewertet werden. Von weiteren 12 Teilnehmern war das EMG nur eingeschränkt auswertbar,

bedingt durch die schlechte Haftung der Elektroden am Bart der Teilnehmer, diese wurden in die Auswertung mit aufgenommen.

Tabelle 6: Anteile der einzelnen Schlafphasen an der Gesamtschlafdauer während der Experimentalnacht in Minuten und Prozent.

	S1	S2	S3	S4	REM	Wach	Bewegung
min	44.66 ± 21.15	187.84 ± 41.41	49.48 ± 19.79	23.82 ± 19.01	88.91 ± 25.24	18.86 ± 20.61	2.93 ± 2.53
%	10.55 ± 4.79	44.87 ± 6.66	11.96 ± 4.76	6.11 ± 5.30	21.13 ± 4.42	4.67 ± 5.25	0.71 ± 0.59

In der Erholungsnacht wurde für beide Gruppen die Schlafdauer anhand der Aktimeter erfasst. Dabei schlief die Wachgruppe mit $M = 672.03 \pm 102.13$ min signifikant länger als die Schlafgruppe mit $M = 488.61 \pm 63.71$ min, $t(49) = -7.43$, $p < 0.01$. Bezüglich der Schlafqualität und der subjektiven Schläfrigkeit zur zweiten Sitzung zeigten sich dahingegen keine signifikanten Unterschiede (s. Tabelle 7)

Tabelle 7: Überblick und Gruppenvergleich über Schlafdauer und -qualität in der Erholungsnacht, sowie subjektive Schläfrigkeit nach der Standfordschläfrigkeitsskala in der zweiten Sitzung (SSS 2).

	Dauer Actimeter (M ± SD in min)	Qualität (M ± SD)	SSS 2 (M ± SD)
Schlafgruppe	488.61 ± 63.71	0.93 ± 0.77	2.56 ± 1.03
Wachgruppe	672.03 ± 102.13	1.19 ± 0.86	2.78 ± 0.87
t-Test	$t(49) = -7.43, p < 0.01$	$t(52) = -1.15, p = 0.26$	$t(52) = -0.84, p = 0.41$

3.2.2 PANAS

Der PANAS wurde in beiden Sitzungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt. Sowohl in Sitzung 1, als auch in Sitzung 2 zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Müdigkeit oder Motivation der beiden Gruppen. Beide Gruppen erzielten in beiden Sitzungen höhere Mittelwerte bei den positiven Affekten als bei den negativen Affekten, wobei sich auch hier kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen darstellte.

Tabelle 8: Ergebnisse des PANAS in der ersten Sitzung. PA: Positive Affekte; NA: Negative Affekte.

	Müdigkeit (M ± SD)	Motivation (M ± SD)	PA (M ± SD)	NA (M ± SD)
Schlaf	3.11 ± 0.74	2.85 ± 0.59	30.22 ± 6.06	22.26 ± 4.81
Wach	3.41 ± 0.68	3.00 ± 0.67	30.48 ± 5.74	22.19 ± 3.99
t-Test	t(52) = -1.51, p = 0.14	t(52) = -0.85, p = 0.40	t(52) = -0.16, p = 0.87	t(52) = 0.06, p = 0.95

Tabelle 9: Ergebnisse des PANAS in der zweiten Sitzung. PA: Positive Affekte; NA: Negative Affekte.

	Müdigkeit (M ± SD)	Motivation (M ± SD)	PA (M ± SD)	NA (M ± SD)
Schlaf	3.07 ± 0.72	2.89 ± 0.63	30.07 ± 5.01	21.63 ± 3.70
Wach	2.78 ± 0.63	2.85 ± 0.80	30.56 ± 6.34	20.74 ± 3.37
t-Test	t(52) = 1.59, p = 0.12	t(52) = 0.19, p = 0.85	t(52) = -0.30, p = 0.76	t(52) = 0.90, p = 0.37

3.2.3 Fragen zum aktuellen Zustand

Die Fragen zum aktuellen Zustand wurden zu Beginn beider Sitzungen erhoben, um die aktuelle physische und psychische Verfassung des Probanden abzufragen und damit eventuelle Einflüsse auf die Teilnahme am Experiment zu erfassen.

In der ersten Sitzung gaben 24 Probanden der Schlafgruppe an, dass sie sich fit fühlten, 3 dass sie sich nicht fit fühlten („müde“, „Sport“, „momentan generell“). Bei der Wachgruppe gab ein Proband von 27 an, dass er sich nicht fit fühle. Bei der Frage nach Medikamenten, Drogen oder Alkohol gaben 5 Probanden der Schlaf- und 3 Probanden der Wachgruppe an in den letzten 48h Alkohol konsumiert zu haben, jedoch keiner am Tag des Experiments. Alle Probanden hatten am Tag des Experiments schon gegessen, wobei die letzte Mahlzeit im Mittel zwei Stunden zurück lag.

3.2.4 Edinburgh Händigkeitstestbogen

Beim Edinburgh Händigkeitstestbogen beantworteten alle Probanden mindestens 7 der 10 Fragen mit „rechte Hand“. Somit galten alle Probanden als Rechtshänder und damit als geeignet für die Studie.

3.2.5 STAI X1 + X2

Der Fragebogen zur Trait-Anxiety wurde nur in der ersten Sitzung durchgeführt. Dabei erreichte die Schlafgruppe im Mittel einen Wert von 39.48 ± 6.61 , die Wachgruppe 36.52 ± 9.88 . Damit stellte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen dar ($t(52) = 1.27, p = 0.21$). Der Fragebogen zur State-Anxiety wurde in beiden Sitzungen aufgenommen (STAI-State 1 und 2). In der ersten Sitzung zeigte sich mit einem Mittelwert von 37.70 ± 6.86 bei der Schlafgruppe und 34.96 ± 6.27 bei der Wachgruppe ebenso kein signifikanter Gruppenunterschied ($t(52) = 1.50, p = 0.14$). In der zweiten Sitzung zeigte die Schlafgruppe mit 38.33 ± 6.17 höhere State-Angstwerte als die Wachgruppe mit 34.85 ± 4.58 ($t(52) = 2.31, p = 0.02$). Die Werte erreichen zwar statistische Signifikanz, die Mittelwerte zwischen den beiden Sitzungen bleiben jedoch relativ konstant, so dass zu schließen ist, dass die Signifikanz hauptsächlich durch eine Verkleinerung der Varianz in der zweiten Sitzung zustande kommt und keinen Effekt durch Schlaf bzw. Schlafmangel zeigt. Die Ergebnisse der State- und Trait-Anxiety sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Gruppenvergleich der Trait-Anxiety, sowie der State Anxiety in Sitzung 1 (STAI-State 1) und Sitzung 2 (STAI-State 2).

	STAI-Trait (M \pm SD)	STAI-State 1 (M \pm SD)	STAI-State 2 (M \pm SD)
Schlaf	39.48 ± 6.61	37.70 ± 6.86	38.33 ± 6.17
Wach	36.52 ± 9.88	34.96 ± 6.27	34.85 ± 4.58
t-Test	$t(52) = 1.27, p = 0.21$	$t(52) = 1.50, p = 0.14$	$t(52) = 2.31, p = 0.02$

3.2.6 Lawton 1

Der Lawton 1 Fragebogen wurde nur in der ersten Sitzung ausgefüllt. Dabei zeigte die Schlafgruppe im Mittel signifikant höhere Werte räumlicher Ängstlichkeit als die Wachgruppe ($t(52) = 1.78, p = 0.08$). Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Gruppenvergleich der räumlichen Ängstlichkeit nach dem Lawton 1 Fragebogen.

	Lawton 1 Mean (M ± SD)	Lawton 1 Median (M ± SD)
Schlaf	1.82 ± 0.45	1.74 ± 0.57
Wach	1.58 ± 0.51	1.35 ± 0.51
t-Test	t(52) = 1.78, p = 0.08	t(52) = 2.61, p = 0.01

3.2.7 Lawton 2

Der Lawton 2 Fragebogen zur Nutzung von Navigationsstrategien wurde ebenfalls nur in der ersten Sitzung erhoben. Innerhalb des Frageblocks zur Orientierungsstrategie wiesen 9 Probanden der Schlafgruppe und 21 Probanden der Wachgruppe einen Wert über 2,78 auf und wurden damit als allozentriert eingestuft. Die verbliebenen 18 bzw. 6 Probanden wurden als nicht allozentriert eingestuft, wodurch jedoch nicht auf eine egozentrierte Verhaltensweise geschlossen werden kann. Innerhalb des Frageblocks zur Routenstrategie wurden 9 Probanden der Schlafgruppe und 11 Probanden der Wachgruppe mit einem Wert über 2,4 als egozentriert eingestuft. Die 18 bzw. 16 Probanden mit einem Wert unter 2,4 wurden als nicht egozentriert eingestuft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Gruppenvergleich des Lawton 2 Fragebogens zur Nutzung von Navigationsstrategien.

	Orientierungsstrategie		Routenstrategie	
	A > 2,78	¬ A < 2,78	E > 2,4	¬ E < 2,4
Schlaf	9	18	9	18
Wach	21	6	11	16

3.2.8 SBSOD

Die Santa Barbara Sense of Direction Scale zur Selbsteinschätzung der Probanden über ihre räumlichen Orientierungsfähigkeiten wurde in der ersten Sitzung absolviert. Die Probanden der Wachgruppe schätzen ihre Orientierungsfähigkeiten mit einem mittleren Punktwert von 5.26 ± 0.84 dabei signifikant als besser ein als die Probanden der

Schlafgruppe mit 4.69 ± 0.83 Punkten ($t(52) = -2.46, p = 0.02$). Die Werte sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Gruppenvergleich der Santa Barbara Sense of Direction Scale zur räumlichen Orientierungsfähigkeit

	SBSOD Mean (M \pm SD)	SBSOD Median (M \pm SD)
Schlaf	4.69 \pm 0.83	4.19 \pm 1.44
Wach	5.26 \pm 0.84	5.19 \pm 1.56
t-Test	$t(52) = -2.46, p = 0.02$	$t(52) = -2.40, p = 0.02$

3.2.9 RWT

Der Regensburger Wortflüssigkeitstest wurde von den Probanden in beiden Sitzungen absolviert. In der ersten Sitzung generierte die Schlafgruppe durchschnittlich 15.74 ± 4.55 Wörter, die Wachgruppe 16.59 ± 3.94 , damit stellte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen dar, $t(52) = 0.72, p = 0.47$. In der zweiten Sitzung schnitt die Wachgruppe mit durchschnittlich 19.11 ± 4.19 Wörtern dahingegen signifikant besser ab als die Schlafgruppe mit 16.00 ± 4.73 Wörtern, $t(52) = -2.51, p = 0.02$. Einen Überblick gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Gruppenvergleich der korrekt generierten Wörter im Regensburger Wortflüssigkeitstest in der ersten (RWT 1) und zweiten (RWT 2) Sitzung.

	RWT 1 (M \pm SD)	RWT 2 (M \pm SD)
Schlaf	15.74 \pm 4.55	16.00 \pm 4.73
Wach	16.59 \pm 3.94	19.11 \pm 4.19
t-Test	$t(52) = 0.72, p = 0.47$	$t(52) = -2.51, p = 0.02$

3.2.10 Trailmaking

Der Trailmaking Test wurde von beiden Gruppen in der zweiten Sitzung in der Pause zwischen den beiden fMRT-Messungen in zwei Versionen durchgeführt (Trailmaking A und Trailmaking B). Bei beiden Versionen stellte sich kein signifikanter Unterschied in der Dauer dar, die die Probanden der Gruppen benötigten: Trailmaking A $t(52) = 0.77, p$

= 0.45, Trailmaking B $t(52) = 0.79, p = 0.43$. Die Fehleranzahl war insgesamt sehr gering und unterschied sich ebenfalls nicht zwischen den beiden Gruppen. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Gruppenvergleich der benötigten Dauer zur korrekten Absolvierung des Trailmaking Test in Version A und B

	Trailmaking A (M ± SD in s)	Trailmaking B (M ± SD in s)
Schlaf	20.06 ± 6.46	39.91 ± 8.54
Wach	18.37 ± 4.32	36.91 ± 17.43
t-Test	$t(52) = 0.77, p = 0.45$	$t(52) = 0.79, p = 0.43$

3.2.11 PVT

Der Psychomotor Vigilance Task wurde von allen Probanden in beiden Sitzungen absolviert (PVT 1 und PVT 2). Als abhängige Variable wurde die mittlere Reaktionszeit in Millisekunden genutzt. In beiden Sitzungen ergab sich kein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit der beiden Gruppen: PVT 1 $t(52) = 0.77, p = 0.45$, PVT 2 $t(52) = -0.26, p = 0.79$. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Gruppenvergleich der mittleren Reaktionszeit beim Psychomotor Vigilance Test 1 und 2 in Millisekunden.

	PVT 1 (M ± SD in ms)	PVT 2 (M ± SD in ms)
Schlaf	305.22 ± 26.34	290.30 ± 31.18
Wach	300.22 ± 20.17	292.33 ± 24.65
t-Test	$t(52) = 0.77, p = 0.45$	$t(52) = -0.26, p = 0.79$

3.2.12 OSPAN

Der OSPAN wurde in der ersten Sitzung von allen Probanden zum Vergleich der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses absolviert. Zur Auswertung wurden der oAS (Summe aller korrekt erinnerten Buchstaben in der richtigen Reihenfolge) und der oPLS (Summe aller korrekt erinnerten Buchstaben unabhängig von der Reihenfolge)

herangezogen. Bei beiden Variablen zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen: oAS $t(52) = -0.89$, $p = 0.38$, oPLS $t(52) = -1.21$, $p = 0.23$. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Gruppenvergleich der Ergebnisse des OSPAN Absolute Score (oAS) und Partial Load Score (oPLS).

	oAS (M ± SD)	oPLS (M ± SD)
Schlaf	39.19 ± 15.84	57.19 ± 11.18
Wach	43.11 ± 15.96	60.63 ± 9.28
t-Test	$t(52) = -0.89, p = 0.38$	$t(52) = -1.21, p = 0.23$

4 Diskussion

In der vorliegenden Studie untersuchten wir, ob eine Integration striataler und hippocampaler räumlicher Repräsentationen durch den Schlaf gestärkt wird. Dafür wurden Probanden zufällig einer Schlaf- oder Wachgruppe zugewiesen und lernten Objektlokalisationen in einer virtuellen Umgebung die zwei Hinweisreize enthielt, eine lokale, proximale Landmarke zur Stimulation der striatalen Routenstrategie und einen Grenzwall zur Stimulation der hippocampalen Orientierungsstrategie. Nach einer Experimentalnacht, in der die eine Gruppe schlief, die andere jedoch im Labor wach blieb, sowie einer nachfolgenden Erholungsnacht, wurden die Teilnehmer mit neuen Umgebungen konfrontiert, die nun entweder die proximale Landmarke oder den Grenzwall enthielt. Um zu prüfen, ob die Teilnehmer das Verhältnis zwischen den Landmarken gelernt hatten und für die Verarbeitung der Informationen nutzen konnten, wurden schließlich Objekte, die die Teilnehmer in der Gegenwart der proximalen Landmarke gelernt hatten, nun in Gegenwart des Grenzwalls getestet und umgekehrt. Wir stellten die Hypothese, dass dies der Schlafgruppe genauer und schneller gelingen sollte, wenn durch den Schlaf eine Integration in ein übergeordnetes Schema stattgefunden hat, das implizit beide Hinweisreize enthält und dadurch den Wechsel zwischen den beiden Hinweisreiz-Bedingungen (proximale Landmarke vs. Grenzwall) erleichtert.

Entgegen unserer Erwartungen zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Abrufgenauigkeit nach dem Wechsel zwischen der Schlaf- und der Wachgruppe. In den Ausgangssituationen - der Familiarisierungs- und Lernphase - war die Wachgruppe dahingegen signifikant besser als die Schlafgruppe, es bestand somit ein Baselineunterschied bezüglich der Navigationsgenauigkeit zwischen den beiden Gruppen zugunsten der Wachgruppe. Dieser Unterschied zeigte sich bezüglich der Navigationszeit nur sehr gering, die Schlafgruppe war in der Familiarisierungs- und Lernphase etwas schneller als die Wachgruppe, jedoch nicht signifikant. Ein deutlicher Gruppenunterschied stellte sich hier erst in der Abrufphase heraus, in der die Schlafgruppe signifikant schneller die Objekte ablegte. Des Weiteren fanden wir in der Schlafgruppe keinen Zusammenhang zwischen der Schlafdauer oder verbrachter Zeit im

S3/ S4 Schlafstadium und der Differenz der Navigationsgenauigkeit zwischen Lernen und Abruf.

Die schnellere Navigationszeit der Schlafgruppe bei der Abrufphase kann ein Hinweis auf ein entstandenes übergeordnetes Schema sein, auf welches der Zugriff leichter fällt und dadurch schneller vonstatten geht. Andere Studien (Ferrara et al., 2008; Wamsley et al., 2010) nutzten ebenfalls die reine Navigationszeit zum Ziel als abhängige Variable. Jedoch wird die Zeit zum Ziel nicht nur von der Genauigkeit der Route beeinflusst, sondern auch durch die Anzahl und Dauer von Denkpausen sowie Richtungskorrekturen. Probanden, die kein ausgeprägtes räumliches Vorstellungsvermögen von der Umgebung entwickelt haben, können dies beispielsweise dadurch kompensieren, dass sie sich schneller durch die Umgebung bewegen, während Probanden mit einer ausgeprägten kognitiven Karte auf dem Weg zum Ziel mehr Denkpausen einlegen um sich die genauen Relationen ins Gedächtnis zu rufen und ihre Route zu korrigieren (Nguyen et al., 2013). Dadurch ist eine Interpretation der Ergebnisse uneindeutig, solange sie rein auf der Navigationszeit basiert. Erst im Zusammenhang mit der Navigationsgenauigkeit können spezifischere Aussagen getroffen werden. Dies ist hier indes, bedingt durch den Baselineunterschied zwischen den Gruppen, schwierig.

Für die Abwesenheit der erwarteten Befunde in der Navigationsgenauigkeit kann es verschiedene Möglichkeiten geben, die einerseits in der Methodik der Studie begründet sein könnten. Dazu zählen der vorhandene Baselineunterschied, der Umgebungswechsel ins MRT zwischen der Familiarisierungs- und der Lern- und Abrufphase oder, dass die jeweiligen Hinweisreize in der virtuellen Umgebung nicht ausreichend waren um die erwartete hippocampale bzw. striatale Navigationsstrategie zu stimulieren. Andererseits können die Ergebnisse im Einklang mit früheren Studien stehen, die ebenfalls keinen positiven Verhaltenseffekt bei virtuellen Navigationsaufgaben von Schlaf auf die räumliche Gedächtniskonsolidierung feststellen konnten (Orban et al., 2006; Rauchs et al., 2008; Villemonteix et al., 2023).

Die sicherlich bedeutendste Problematik liegt im vorhandenen Baselineunterschied der beiden Gruppen. Baselineunterschiede machen es schwieriger, festzustellen, ob die Ergebnisse der Intervention oder den Unterschieden zwischen den Gruppen

zuzuschreiben sind. Die Interpretation der Ergebnisse wird erschwert und eventuell vorhandene Effekte können überlagert werden. Beispielsweise könnte die Nivellierung des zu Beginn vorhandenen Gruppenunterschieds bei der Abrufphase ebenfalls als positiver Schlafeffekt gedeutet werden, da die Schlafgruppe von einem niedrigeren Ausgangsniveau gestartet ist. Dies lässt sich jedoch nicht eindeutig belegen und wird hier daher außer Acht gelassen. Zur genaueren Untersuchung der Ursachen für die Baselineunterschiede in der Navigationsgenauigkeit führten wir einige Kovarianzanalysen durch in denen interindividuelle Unterschiede in Vigilanz, räumlicher Kompetenz, räumlichem Selbstkonzept und Ängstlichkeit berücksichtigt wurden, sowie Korrelationen zu den verschiedenen Schlafparametern. Doch auch hier ließen sich keine weiteren Zusammenhänge erkennen, die die Unterschiede erklären könnten. Der Baselineunterschied scheint zufällig durch die Probandenauswahl entstanden zu sein, obwohl die statistisch ermittelte Mindestgruppengröße eingehalten wurde und die Probanden den Gruppen randomisiert zugeteilt wurden. In einer zukünftigen Studie wäre daher zu überlegen, die Probandenanzahl weiter zu erhöhen oder die Studie doppelt zu verblinden. Eine Verblindung der Versuchsleiter war hier aus organisatorischen Gründen nicht möglich.

Einen weiteren Einfluss auf die Performance der Probanden kann der Umgebungswechsel zwischen den beiden Sitzungen darstellen. Während die Familiarisierungsphase an einem normalen Computerarbeitsplatz in einem Institutsraum stattfand, wurden die Lern- und Abrufphase in einer liegenden Position im MRT absolviert. Die veränderten propriozeptiven, sowie auch akustischen und visuellen Informationen können einen Einfluss auf die Leistung der Probanden gehabt haben. Gemäß dem Konzept der Kontextabhängigkeit des episodischen Gedächtnisses werden Inhalte leichter erinnert, wenn die äußeren Umstände beim Abruf mit denen bei der Enkodierung übereinstimmen (Godden and Baddeley, 1975; Isarida et al., 2012; Foudil et al., 2021; Staudigl and Hanslmayr, 2013). Die Umgebung im MRT kann sich zusätzlich durch die beengten Verhältnisse und die Lautstärke negativ auf die Konzentration der Probanden auswirken. Dies ist auch ein entscheidender Unterschied zur vorhergehenden Verhaltensstudie von Noack et al. (2021), bei der kein Wechsel der Räumlichkeiten stattfand. Dieser Aspekt betrifft jedoch beide Gruppen gleichermaßen.

Ein Ausschluss potenzieller Effekte durch den Umgebungswechsel wäre nur möglich, wenn die erste Sitzung ebenfalls im MRT stattfände.

Durch die Verwendung des MRT bereits in der ersten Sitzung wäre auch eine Aufzeichnung der Gehirnaktivität während der Familiarisierung möglich, um somit die Veränderung der Gehirnaktivität beim Abruf und Lernen im Vergleich zur Familiarisierung besser beurteilen zu können. Wir verwendeten die virtuelle Umgebung von Doeller et al. (2008), die in ihrer Studie zeigten, dass die Hinweisreize im fMRT zu einer ‚bottom-up‘ Aktivierung der respektiven hippocampalen beziehungsweise striatalen Gehirnareale führten und somit die erwarteten Strategien verwendet wurden. Eine Auswertung unserer Verhaltensdaten und Kontrolltests im Rahmen einer Unterstudie wirft jedoch Zweifel auf, ob die proximale Landmarke, bzw. der Grenzwall zur Aktivierung einer Routen-, bzw. Orientierungsstrategie ausreichend waren, da in beiden Bedingungen überwiegend eine Routenstrategie bevorzugt wurde (Sax, 2018).

Im Laufe der Zeit untersuchten verschiedene Studien die Einflussfaktoren auf die Nutzung von Navigationsstrategien sowie den Zusammenhang mit Schlaf und kamen zu teils unterschiedlichen Ergebnissen. Die Erforschung der Auswirkungen von Schlaf auf das räumliche Gedächtnis birgt dabei besondere Herausforderungen, dadurch, dass die verschiedenen Strategien der räumlichen Navigation von verschiedenen Gedächtnisarealen unterstützt werden, die sowohl kooperativ als auch konkurrierend arbeiten können um eine Navigationsleistung zu vollbringen (Doeller and Burgess, 2008; Hartley et al., 2014).

Doeller et al. (2008) beschreiben, dass die Aktivierung des rechten hinteren Hippocampus das Lernen und Erinnern von grenzenbezogenen Orten widerspiegelt, während eine Aktivierung des rechten dorsalen Striatums beim Lernen und Erinnern von landmarkenbezogenen Orten erfolgt. Die beiden Systeme scheinen das Verhalten ‚bottom-up‘ proportional zu ihrer Aktivierung zu beeinflussen. Eine ventromediale präfrontale Beteiligung findet statt, wenn beide Systeme gleichermaßen aktiv sind. Andere Studien zeigten, dass die Erfahrung während einer Aufgabe einen entscheidenden Einfluss auf die Wahl des Navigationssystems hat. Während zu Beginn hippocampale und striatale Systeme gleichermaßen aktiv sind, findet im Verlauf mit zunehmender Erfahrung ein Wechsel, hin zu einer vermehrten Nutzung von striatalen

Strategien, statt (Hartley et al., 2003; Iaria et al., 2003). Diese Verschiebung zu einer erhöhten striatalen Aktivierung kann durch Schlaf unterstützt werden, der zu einer globalen, qualitativen Umstrukturierung des Gedächtnisses führt (Orban et al., 2006; Rauchs et al., 2008). Obwohl Orban et al. (2006) und Rauchs et al. (2008) diese vermehrte Aktivierung des Striatum im fMRT nach Schlaf (im Gegensatz zu Schlafdeprivation) nachweisen konnten, fanden sie auf der Verhaltensebene keinen positiven Effekt von Schlaf auf die Navigationsleistung der Probanden. Während bei Orban et al. keine Änderung der Navigationsstrategie zwischen der Lern- und Abrufbedingung vorgegeben wurde, versuchten Rauchs et al. die Probanden beim Abruf (nicht aber beim Lernen) zu der Verwendung einer bestimmten Strategie zu zwingen (hippocampale Orientierungsstrategie in der ‚impoverished‘ und ‚alternate‘ Bedingung, bzw. Anregung des kontextuellen Gedächtnisses anhand von lokalen Landmarken in der ‚recognition‘ Bedingung, offen lassen der Strategiewahl in der ‚natural‘ Bedingung). Sie konnten jedoch ebenso in keiner der Bedingungen einen schlafabhängigen Verhaltenseffekt feststellen. Einen positiven Schlafeffekt auf die räumliche Navigation fanden dahingegen Ferrara et al., sowohl in einer 3D virtuellen Realität (Ferrara et al., 2008), als auch in einer realen Stadt (Ferrara et al., 2006). Ebenso zeigten Wamsley et al. (2010), dass Schlaf die Navigationsleistung in einem 3D Labyrinth verbesserte und stellten eine Korrelation zum deltareichen Schlafstadium II her. In einem Experiment von Nguyen et al. (2013) kamen die Wissenschaftler zu dem Ergebnis, dass Schlaf vor allem zur Konsolidierung von hippocampusabhängigen räumlichen Informationen beiträgt. Probanden der Schlafgruppe zeigten eine bessere Performance, indem sie akkurater durch ein Labyrinth navigierten als Probanden der Wachgruppe. Sie schlossen, dass der Schlaf zu einer besseren Vorstellung über die räumliche Anordnung des Labyrinths geführt hat. Simon et al. (2022) entwickelten eine Aufgabe um das räumliche Gedächtnis besser von der räumlichen Navigation unterscheiden zu können. Sie definierten das räumliche Gedächtnis als die metrische Genauigkeit, mit der Objekte in einer Umgebung lokalisiert werden können, also dem Verständnis von räumlichen Beziehungen in einer kognitiven Karte. Räumliche Navigation dahingegen als den Prozess der Bewegung hin zu den Objektlokalisationen. Sie fanden einen positiven Schlafeffekt auf das räumliche Gedächtnis, jedoch keine spezifische Rolle des Schlafes bei der Navigation. Ihre Ergebnisse stimmen mit der Hypothese überein, dass Schlaf die

hippocampusabhängigen Aspekte des räumlichen Gedächtnisses durch den Aufbau einer kognitiven Karte unterstützt. Simon et al. argumentieren, dass die unterschiedlichen vorhergehenden Ergebnisse anderer Studien durch die Schwierigkeit entstanden, räumliche Navigation und das räumliche Gedächtnis experimentell getrennt zu untersuchen. Villemonteix et al. (2023) untersuchten den schlafbezogenen Umbau von Gedächtnisstrukturen nach einer Navigationsaufgabe mit Hilfe der Diffusions-Tensor-Bildgebung auf zellulärer Ebene. Sie stellten einen schlafabhängigen Umbau von Gliazellen und Neuriten im Nucleus caudatus und Hippocampus fest. Diese Neuroplastizität ist ein erforderliches zelluläres Korrelat der Reorganisation bei Lern- und Gedächtnisprozessen. Übereinstimmend mit Orban et al. (2006) und Rauchs et al. (2008) fanden sie jedoch auch keinen schlafabhängigen Effekt auf die Navigationsleistung auf der Verhaltensebene.

Im Einklang mit Orban et al. (2006), Rauchs et al. (2008) und Villemonteix et al. (2023) konnten wir auf der Verhaltensebene ebenfalls keinen förderlichen Schlafeffekt auf die Navigationsleistung feststellen, die Daten sind jedoch durch den vorliegenden Baseline-Effekt deutlich geschwächt. Im Gegensatz zu den Studien von Orban et al. (2006); Rauchs et al. (2008) und Villemonteix et al. (2023) erwarteten wir zudem keine verbesserte Navigationsleistung per se, sondern eine Überlegenheit der Schlafgruppe erst, wenn sie zu einem flexiblen Umschalten zwischen den verschiedenen Strategien beim Abruf gezwungen wird, als implizites Zeichen der Integration in eine kognitive Karte während des Schlafes. Für ein endgültiges Ergebnis bleibt die Auswertung der MRT-Daten abzuwarten, in denen sich etwaige Unterschiede in der Aktivierung der Gedächtnisareale zwischen den beiden Gruppen trotz fehlender Verhaltensunterschiede zeigen könnten. Darüber hinaus bleibt es zukünftigen Studien vorbehalten, den richtungsweisenden Hinweisen für die Rolle des Schlafes bei der Erstellung räumlicher Schemata nachzugehen.

5 Zusammenfassung

Die räumliche Navigation wird als Modellmechanismus genutzt um den Einfluss von Schlaf auf die Gedächtnisbildung zu untersuchen. Die bisherigen Erkenntnisse über den genauen Beitrag von Schlaf zum räumlichen Gedächtnis und der räumlichen Navigation sind jedoch uneinheitlich. Diese Abweichungen zwischen den Studien werden unter anderem dadurch gefördert, dass das räumliche Gedächtnis auf einem komplexen Schema beruht, das verschiedene Gedächtnissysteme und deren Koordination untereinander beinhaltet. In der vorliegenden Studie haben wir versucht diese Gedächtnissysteme durch das Aufgabendesign in einer virtuellen Realität zu trennen und damit die Interaktion zwischen den Systemen besser beurteilen zu können. Unser Augenmerk richtete sich dabei auf die Hypothese, dass durch Schlaf eine Integration striataler und hippocampaler räumlicher Repräsentationen gestärkt wird. Dafür wurden Probanden zufällig einer Schlaf- oder Wachgruppe zugewiesen und lernten Objektlokalisationen in einer virtuellen Umgebung die zwei Hinweisreize enthält, eine lokale, proximale Landmarke zur Stimulation einer striatalen Routenstrategie und einen Grenzwall zur Stimulation einer hippocampalen Orientierungsstrategie. Nach zwei Nächten Schlaf oder einer wachen Nacht gefolgt von einer Nacht Erholungsschlaf lernten sie erneut Objektlokalisationen in der bekannten Umgebung die nun entweder die Landmarke oder den Grenzwall enthielt („Lernen“) und sollten nach einer kurzen Pause die Objekte, die sie relativ zur Landmarke gelernt haben in der Grenzwallumgebung lokalisieren und umgekehrt („Abruf“). Wir stellten die Hypothese, dass dies der Schlafgruppe beim Abruf genauer und schneller gelingen sollte, wenn durch den Schlaf eine Integration in ein übergeordnetes Schema stattgefunden hat, das implizit beide Hinweisreize enthält und dadurch den Wechsel erleichtert. Die Schlafgruppe wurde in der Experimentalnacht zusätzlich mit Polysomnographen überwacht um Zusammenhänge zwischen Schlafparametern und der Navigationsleistung feststellen zu können. Es zeigte sich, dass die Schlafgruppe zwar beim Abruf signifikant schneller war als die Wachgruppe, sich die Gruppen jedoch in Bezug auf die Navigationsgenauigkeit nicht unterschieden. Wir führen dieses Ergebnis hauptsächlich auf einen vorhandenen Baselineunterschied zwischen den Gruppen

zurück, der die Interpretation der Ergebnisse erschwert. Wir konnten keine weiteren relevanten Zusammenhänge zwischen der Navigationsgenauigkeit und Kontrollparametern wie der Vigilanz, räumlicher Kompetenz, räumlichem Selbstkonzept und Ängstlichkeit feststellen. Ebenso zeigten sich in der Schlafgruppe keine Korrelationen zwischen den Schlafstadien S3 und S4, beziehungsweise der Gesamtschlafdauer und der Navigationsleistung beim Abruf. Für eine abschließende Beurteilung bleibt die Auswertung der fMRT-Daten abzuwarten, in denen sich etwaige Unterschiede in der Aktivierung der Gedächtnisareale zwischen den beiden Gruppen trotz fehlender Verhaltensunterschiede zeigen könnten.

6 Literaturverzeichnis

- ALEXANDER, A. S. & NITZ, D. A. 2015. Retrosplenial cortex maps the conjunction of internal and external spaces. *Nat Neurosci*, 18, 1143-51.
- ASCHENBRENNER, S., TUCHA, O. & LANGE, K. W. 2000. *Regensburger Wortflüssigkeits-Test RWT*, Göttingen Bern Toronto Seattle, Hogrefe Verl. für Psychologie.
- BARKOWSKY, T., KNAUFF, M., LIGOZAT, G., & MONTELLO, D. R. 2007. *Spatial Cognition V: Reasoning, Action, Interaction.*, Heidelberg, Springer.
- BARRY, C., LEVER, C., HAYMAN, R., HARTLEY, T., BURTON, S., O'KEEFE, J., JEFFERY, K. & BURGESS, N. 2006. The boundary vector cell model of place cell firing and spatial memory. *Rev Neurosci*, 17, 71-97.
- BATES, D., MÄCHLER, M., BOLKER, B. & WALKER, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1 - 48.
- BIRD, C. M., CAPPONI, C., KING, J. A., DOELLER, C. F. & BURGESS, N. 2010. Establishing the Boundaries: The Hippocampal Contribution to Imagining Scenes. *The Journal of Neuroscience*, 30, 11688.
- BOCCARA, C. N., SARGOLINI, F., THORESEN, V. H., SOLSTAD, T., WITTER, M. P., MOSER, E. I. & MOSER, M. B. 2010. Grid cells in pre- and parasubiculum. *Nat Neurosci*, 13, 987-94.
- BOONE, A. P., GONG, X. & HEGARTY, M. 2018. Sex differences in navigation strategy and efficiency. *Mem Cognit*, 46, 909-922.
- BORN, J., RASCH, B. & GAIS, S. 2006. Sleep to remember. *Neuroscientist*, 12, 410-24.
- BRODT, S., INOSTROZA, M., NIETHARD, N. & BORN, J. 2023. Sleep-A brain-state serving systems memory consolidation. *Neuron*, 111, 1050-1075.
- BURGESS, N. 2006. Spatial memory: how egocentric and allocentric combine. *Trends Cogn Sci*, 10, 551-7.
- BYRNE, P., BECKER, S. & BURGESS, N. 2007. Remembering the past and imagining the future: a neural model of spatial memory and imagery. *Psychological review*, 114, 340-75.

- CARLEY, D. W. & FARABI, S. S. 2016. Physiology of Sleep. *Diabetes Spectrum : A Publication of the American Diabetes Association*, 29, 5 - 9.
- COUTANCHE, M. N., GIANESSI, C. A., CHANALES, A. J. H., WILLISON, K. W. & THOMPSON-SCHILL, S. L. 2013. The role of sleep in forming a memory representation of a two-dimensional space. *Hippocampus*, 23, 1189-1197.
- DIEKELMANN, S. & BORN, J. 2010. The memory function of sleep. *Nat Rev Neurosci*, 11, 114-26.
- DINGES, D. F. & POWELL, J. W. 1985. Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 17, 652-655.
- DOELLER, C. F. & BURGESS, N. 2008. Distinct error-correcting and incidental learning of location relative to landmarks and boundaries. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 105, 5909-14.
- DOELLER, C. F., KING, J. A. & BURGESS, N. 2008. Parallel striatal and hippocampal systems for landmarks and boundaries in spatial memory. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 105, 5915-20.
- EKSTROM, A. D., KAHANA, M. J., CAPLAN, J. B., FIELDS, T. A., ISHAM, E. A., NEWMAN, E. L. & FRIED, I. 2003. Cellular networks underlying human spatial navigation. *Nature*, 425, 184-8.
- ELLENBOGEN, J. M., HU, P. T., PAYNE, J. D., TITONE, D. & WALKER, M. P. 2007. Human relational memory requires time and sleep. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 7723-7728.
- ELLENBOGEN, J. M., PAYNE, J. D. & STICKGOLD, R. 2006. The role of sleep in declarative memory consolidation: passive, permissive, active or none? *Curr Opin Neurobiol*, 16, 716-22.
- EUSTON, D. R., TATSUNO, M. & MCNAUGHTON, B. L. 2007. Fast-forward playback of recent memory sequences in prefrontal cortex during sleep. *Science*, 318, 1147-50.
- FERRARA, M., IARIA, G., DE GENNARO, L., GUARIGLIA, C., CURCIO, G., TEMPESTA, D. & BERTINI, M. 2006. The role of sleep in the consolidation of route learning in humans: a behavioural study. *Brain Res Bull*, 71, 4-9.
- FERRARA, M., IARIA, G., TEMPESTA, D., CURCIO, G., MORONI, F., MARZANO, C., DE GENNARO, L. & PACITTI, C. 2008. Sleep to find your

- way: The role of sleep in the consolidation of memory for navigation in humans. *Hippocampus*, 18, 844-51.
- FISCHER, S., DROSOPOULOS, S., TSEN, J. & BORN, J. 2006. Implicit learning -- explicit knowing: a role for sleep in memory system interaction. *J Cogn Neurosci*, 18, 311-9.
- FISCHER, S., HALLSCHMID, M., ELSNER, A. L. & BORN, J. 2002. Sleep forms memory for finger skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 11987-11991.
- FOUDIL, S. A., PLECHE, C. & MACALUSO, E. 2021. Memory for spatio-temporal contextual details during the retrieval of naturalistic episodes. *Sci Rep*, 11, 14577.
- FUHS, M. C. & TOURETZKY, D. S. 2006. A Spin Glass Model of Path Integration in Rat Medial Entorhinal Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 26, 4266.
- GODDEN, D. R. & BADDELEY, A. D. 1975. Context-dependent memory in two natural environments: on land and underwater. *British Journal of Psychology*, 66, 325-331.
- GRAMANN, K., MULLER, H. J., EICK, E. M. & SCHÖNEBECK, B. 2005. Evidence of separable spatial representations in a virtual navigation task. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 31, 1199-1223.
- HAFTING, T., FYHN, M., MOLDEN, S., MOSER, M. B. & MOSER, E. I. 2005. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436, 801-6.
- HARTLEY, T., BURGESS, N., LEVER, C., CACUCCI, F. & O'KEEFE, J. 2000. Modeling place fields in terms of the cortical inputs to the hippocampus. *Hippocampus*, 10, 369-79.
- HARTLEY, T., LEVER, C., BURGESS, N. & O'KEEFE, J. 2014. Space in the brain: how the hippocampal formation supports spatial cognition. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 369, 20120510.
- HARTLEY, T., MAGUIRE, E. A., SPIERS, H. J. & BURGESS, N. 2003. The Well-Worn Route and the Path Less Traveled: Distinct Neural Bases of Route Following and Wayfinding in Humans. *Neuron*, 37, 877-888.
- HEGARTY, M., RICHARDSON, A. E., MONTELLO, D. R., LOVELACE, K. & SUBBIAH, I. 2002. Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30, 425-448.

- HODDES, E., ZARCONI, V., SMYTHE, H., PHILLIPS, R. & DEMENT, W. C. 1973. Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology*, 10, 431-6.
- HORNE, M. R., IORDANOVA, M. D. & PEARCE, J. M. 2010. Spatial learning based on boundaries in rats is hippocampus-dependent and prone to overshadowing. *Behav Neurosci*, 124, 623-32.
- HULL, C. L. 1943. *Principles of behavior: an introduction to behavior theory*, Oxford, England, Appleton-Century.
- IARIA, G., PETRIDES, M., DAGHER, A., PIKE, B. & BOHBOT, V. D. 2003. Cognitive strategies dependent on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: variability and change with practice. *J Neurosci*, 23, 5945-52.
- IBER, C., ANCOLI-ISRAEL, S., CHESSON, A. & QUAN, S. 2007. *The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events : Rules, Terminology and Technical Specification*, Westchester, IL, American Academy of Sleep Medicine.
- INSAUSTI, R. & AMARAL, D. 2004. Hippocampal Formation.
- ISARIDA, T., ISARIDA, T. K. & SAKAI, T. 2012. Effects of study time and meaningfulness on environmental context-dependent recognition. *Mem Cognit*, 40, 1225-35.
- JAVADI, A. H., TOLAT, A. & SPIERS, H. J. 2015. Sleep enhances a spatially mediated generalization of learned values. *Learn Mem*, 22, 532-6.
- JELLINGER, K. A. 2000. Wayfinding Behavior, Cognitive Mapping and Other Spatial Processes Reginald G. Golledge, ed. The Johns Hopkins University Press, Baltimore & London, 1999. 428 pp., ISBN 0-8010-5993-X. *European Journal of Neurology*, 7, 590-591.
- JJ, D. & WILSON, M. 2007. Coordinated memory replay in the visual cortex and hippocampus during sleep. *Nature neuroscience*, 10, 100-7.
- KLATZKY, R. L. Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. *Spatial cognition*, 1998. Springer, 1-17.
- KOIKE, B. D. V., FARIAS, K. S., BILLWILLER, F., ALMEIDA-FILHO, D., LIBOUREL, P. A., TIRAN-CAPPELLO, A., PARMENTIER, R., BLANCO, W., RIBEIRO, S., LUPPI, P. H. & QUEIROZ, C. M. 2017. Electrophysiological Evidence That the Retrosplenial Cortex Displays a Strong and Specific

- Activation Phased with Hippocampal Theta during Paradoxical (REM) Sleep. *J Neurosci*, 37, 8003-8013.
- KRUPIC, J., BAUZA, M., BURTON, S., LEVER, C. & O'KEEFE, J. 2014. How environment geometry affects grid cell symmetry and what we can learn from it. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 369, 20130188.
- KUZNETSOVA, A., BROCKHOFF, P. B. & CHRISTENSEN, R. H. B. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1 - 26.
- LAWTON, C. A. 1994. Gender differences in way-finding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, 30, 765-779.
- LAWTON, C. A. & KALLAI, J. 2002. Gender Differences in Wayfinding Strategies and Anxiety About Wayfinding: A Cross-Cultural Comparison. *Sex Roles*, 47, 389-401.
- LEVER, C., BURTON, S., JEEWAJEE, A., O'KEEFE, J. & BURGESS, N. 2009. Boundary vector cells in the subiculum of the hippocampal formation. *J Neurosci*, 29, 9771-7.
- LEVER, C., WILLS, T., CACUCCI, F., BURGESS, N. & O'KEEFE, J. 2002. Long-term plasticity in hippocampal place-cell representation of environmental geometry. *Nature*, 416, 90-4.
- LEVY, L. J., ASTUR, R. S. & FRICK, K. M. 2005. Men and women differ in object memory but not performance of a virtual radial maze. *Behav Neurosci*, 119, 853-62.
- MACFADDEN, A., ELIAS, L. & SAUCIER, D. 2003. Males and females scan maps similarly, but give directions differently. *Brain Cogn*, 53, 297-300.
- MAIER, P. H. 1999. *Räumliches Vorstellungsvermögen. Ein theoretischer Abriss des Phänomens räumliches Vorstellungsvermögen.*, Donauwörth: Auer.
- MARCHETTE, S. A., VASS, L. K., RYAN, J. & EPSTEIN, R. A. 2015. "Anchoring the neural compass: Coding of local spatial reference frames in human medial parietal lobe": Corrigendum. *Nature Neuroscience*, 18, 926-926.
- MAURER, R. & DERIVAZ, V. 2000. Rats in a transparent morris water maze use elemental and configural geometry of landmarks as well as distance to the pool wall. *Spatial Cognition and Computation*, 2, 135-156.

- MORRIS, R. G. M., GARRUD, P., RAWLINS, J. N. P. & O'KEEFE, J. 1982. Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature*, 297, 681-683.
- MOSER, E. I., KROPFF, E. & MOSER, M. B. 2008. Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system. *Annu Rev Neurosci*, 31, 69-89.
- NGUYEN, N. D., TUCKER, M. A., STICKGOLD, R. & WAMSLEY, E. J. 2013. Overnight Sleep Enhances Hippocampus-Dependent Aspects of Spatial Memory. *Sleep*, 36, 1051-1057.
- NOACK, H., DOELLER, C. F. & BORN, J. 2021. Sleep strengthens integration of spatial memory systems. *Learn Mem*, 28, 162-170.
- NOACK, H., SCHICK, W., MALLOT, H. & BORN, J. 2017. Sleep enhances knowledge of routes and regions in spatial environments. *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)*, 24, 140-144.
- O'KEEFE, J. 1976. Place units in the hippocampus of the freely moving rat. *Exp Neurol*, 51, 78-109.
- O'KEEFE, J. & BURGESS, N. 1996. Geometric determinants of the place fields of hippocampal neurons. *Nature*, 381, 425-8.
- O'KEEFE, J. & DOSTROVSKY, J. 1971. The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Res*, 34, 171-5.
- O'KEEFE, J. & NADEL, L. 1978. *The Hippocampus as a Cognitive Map*, Oxford: Clarendon Press.
- OLDFIELD, R. C. 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- ORBAN, P., RAUCHS, G., BALTEAU, E., DEGUELDRE, C., LUXEN, A., MAQUET, P. & PEIGNEUX, P. 2006. Sleep after spatial learning promotes covert reorganization of brain activity. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103, 7124-9.
- PACKARD, M. G. 1999. Glutamate infused posttraining into the hippocampus or caudate-putamen differentially strengthens place and response learning. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 96, 12881-6.
- PACKARD, M. G. & KNOWLTON, B. J. 2002. Learning and memory functions of the Basal Ganglia. *Annu Rev Neurosci*, 25, 563-93.

- PACKARD, M. G. & MCGAUGH, J. L. 1996. Inactivation of hippocampus or caudate nucleus with lidocaine differentially affects expression of place and response learning. *Neurobiol Learn Mem*, 65, 65-72.
- PEARCE, J. M., ROBERTS, A. D. & GOOD, M. 1998. Hippocampal lesions disrupt navigation based on cognitive maps but not heading vectors. *Nature*, 396, 75-7.
- PEIGNEUX, P., LAUREYS, S., FUCHS, S., COLLETTE, F., PERRIN, F., REGGERS, J., PHILLIPS, C., DEGUELDRE, C., DEL FIORE, G., AERTS, J., LUXEN, A. & MAQUET, P. 2004. Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron*, 44, 535-45.
- PERUCH, P. & LAPIN, E. A. 1993. Route knowledge in different spatial frames of reference. *Acta Psychol (Amst)*, 84, 253-69.
- PEYRACHE, A., KHAMASSI, M., BENCHENANE, K., WIENER, S. I. & BATTAGLIA, F. P. 2009. Replay of rule-learning related neural patterns in the prefrontal cortex during sleep. *Nat Neurosci*, 12, 919-26.
- PLIHAL, W. & BORN, J. 1997. Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *J Cogn Neurosci*, 9, 534-47.
- PRESTON, A. R. & EICHENBAUM, H. 2013. Interplay of hippocampus and prefrontal cortex in memory. *Curr Biol*, 23, R764-73.
- RAGOZZINO, M. E., DETRICK, S. & KESNER, R. P. 1999. Involvement of the prelimbic-infralimbic areas of the rodent prefrontal cortex in behavioral flexibility for place and response learning. *J Neurosci*, 19, 4585-94.
- RASCH, B. & BORN, J. 2013. About sleep's role in memory. *Physiol Rev*, 93, 681-766.
- RAUCHS, G., ORBAN, P., SCHMIDT, C., ALBOUY, G., BALTEAU, E., DEGUELDRE, C., SCHNACKERS, C., STERPENICH, V., TINGUELY, G., LUXEN, A., MAQUET, P. & PEIGNEUX, P. 2008. Sleep modulates the neural substrates of both spatial and contextual memory consolidation. *PLoS One*, 3, e2949.
- RECHTSCHAFFEN, A. & KALES, A. 1968. A manual for standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages in human subjects. *N. I. H. Publication*, No. 204.
- REITAN, R. M. 1992. Trail Making Test: Manual for administration and scoring. South Tuscon: AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.

- RICH, E. L. & SHAPIRO, M. 2009. Rat prefrontal cortical neurons selectively code strategy switches. *J Neurosci*, 29, 7208-19.
- RUDDLE, R. A., PAYNE, S. J. & JONES, D. M. 1997. Navigating buildings in "desktop" virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3, 143-159.
- SARGOLINI, F., FYHN, M., HAFTING, T., MCNAUGHTON, B. L., WITTER, M. P., MOSER, M. B. & MOSER, E. I. 2006. Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex. *Science*, 312, 758-62.
- SAUCIER, D. M., GREEN, S. M., LEASON, J., MACFADDEN, A., BELL, S. & ELIAS, L. J. 2002. Are sex differences in navigation caused by sexually dimorphic strategies or by differences in the ability to use the strategies? *Behav Neurosci*, 116, 403-10.
- SAVELLI, F., YOGANARASIMHA, D. & KNIERIM, J. J. 2008. Influence of boundary removal on the spatial representations of the medial entorhinal cortex. *Hippocampus*, 18, 1270-82.
- SAX, C. 2018. Strategien räumlicher Orientierung. *Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Eberhard Karls Universität Tübingen.*
- SHELTON, A. L. & GABRIELI, J. D. 2002. Neural correlates of encoding space from route and survey perspectives. *J Neurosci*, 22, 2711-7.
- SIEGEL, A. W. & WHITE, S. H. 1975. The development of spatial representations of large-scale environments. *Adv Child Dev Behav*, 10, 9-55.
- SIEGEL, J. M. 2003. Why we sleep. *Sci Am*, 289, 92-7.
- SIMON, K. C., CLEMENSON, G. D., ZHANG, J., SATTARI, N., SHUSTER, A. E., CLAYTON, B., ALZUETA, E., DULAI, T., DE ZAMBOTTI, M., STARK, C., BAKER, F. C. & MEDNICK, S. C. 2022. Sleep facilitates spatial memory but not navigation using the Minecraft Memory and Navigation task. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 119, e2202394119.
- SKAGGS, W. E. & MCNAUGHTON, B. L. 1996. Replay of neuronal firing sequences in rat hippocampus during sleep following spatial experience. *Science*, 271, 1870-3.
- SOLSTAD, T., BOCCARA, C. N., KROPFF, E., MOSER, M. B. & MOSER, E. I. 2008. Representation of geometric borders in the entorhinal cortex. *Science*, 322, 1865-8.

- SQUIRE, L. R., KNOWLTON, B. & MUSEN, G. 1993. The structure and organization of memory. *Annual Review of Psychology*, 44, 453-495.
- SQUIRE, L. R. & ZOLA-MORGAN, S. 1991. The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253, 1380-6.
- STAUDIGL, T. & HANSLMAYR, S. 2013. Theta oscillations at encoding mediate the context-dependent nature of human episodic memory. *Curr Biol*, 23, 1101-6.
- STERN, P. 2018. Synaptic downscaling during “up” states. *Science*, 360, 504.
- STEWART, S., JEEWAJEE, A., WILLS, T. J., BURGESS, N. & LEVER, C. 2014. Boundary coding in the rat subiculum. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 369, 20120514.
- STICKGOLD, R., WHIDBEE, D., SCHIRMER, B., PATEL, V. & HOBSON, J. A. 2000. Visual discrimination task improvement: A multi-step process occurring during sleep. *J Cogn Neurosci*, 12, 246-54.
- TAUBE, J. S. 2007. The head direction signal: origins and sensory-motor integration. *Annu Rev Neurosci*, 30, 181-207.
- TAUBE, J. S., MULLER, R. U. & RANCK, J. B., JR. 1990. Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis. *J Neurosci*, 10, 420-35.
- TOLMAN, E. C. 1948. Cognitive maps in rats and men. *Psychol Rev*, 55, 189-208.
- TOLMAN, E. C., RITCHIE, B. F. & KALISH, D. 1946. Studies in spatial learning. II. Place learning versus response learning. *Journal of Experimental Psychology*, 36, 221-229.
- TSE, D., TAKEUCHI, T., KAKEYAMA, M., KAJII, Y., OKUNO, H., TOHYAMA, C., BITO, H. & MORRIS, R. G. 2011. Schema-dependent gene activation and memory encoding in neocortex. *Science*, 333, 891-5.
- UNSWORTH, N., HEITZ, R. P., SCHROCK, J. C. & ENGLE, R. W. 2005. An automated version of the operation span task. *Behav Res Methods*, 37, 498-505.
- VAN BUUREN, M., KROES, M. C., WAGNER, I. C., GENZEL, L., MORRIS, R. G. & FERNANDEZ, G. 2014. Initial investigation of the effects of an experimentally learned schema on spatial associative memory in humans. *J Neurosci*, 34, 16662-70.

- VANN, S. D., AGGLETON, J. P. & MAGUIRE, E. A. 2009. What does the retrosplenial cortex do? *Nat Rev Neurosci*, 10, 792-802.
- VARGA, A. W., DUCCA, E. L., KISHI, A., FISCHER, E., PAREKH, A., KOUSHYK, V., YAU, P. L., GUMB, T., LEIBERT, D. P., WOHLLEBER, M. E., BURSCHTIN, O. E., CONVIT, A., RAPOPORT, D. M., OSORIO, R. S. & AYAPPA, I. 2016. Effects of aging on slow-wave sleep dynamics and human spatial navigational memory consolidation. *Neurobiology of aging*, 42, 142-149.
- VILLEMONTAIX, T., GUERRERI, M., DEANTONI, M., BALTEAU, E., SCHMIDT, C., STEE, W., ZHANG, H. & PEIGNEUX, P. 2023. Sleep-dependent structural neuroplasticity after a spatial navigation task: A diffusion imaging study. *J Neurosci Res*, 101, 1031-1043.
- WAGNER, U., GAIS, S., HAIDER, H., VERLEGER, R. & BORN, J. 2004. Sleep inspires insight. *Nature*, 427, 352-355.
- WAMSLEY, E. J., TUCKER, M. A., PAYNE, J. D. & STICKGOLD, R. 2010. A brief nap is beneficial for human route-learning: The role of navigation experience and EEG spectral power. *Learn Mem*, 17, 332-6.
- WATSON, D., CLARK, L. A. & TELLEGEN, A. 1988. Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *J Pers Soc Psychol*, 54, 1063-70.
- WEGMAN, J., TYBOROWSKA, A. & JANZEN, G. 2014. Encoding and retrieval of landmark-related spatial cues during navigation: an fMRI study. *Hippocampus*, 24, 853-68.
- WHITE, N. M. 1989. A functional hypothesis concerning the striatal matrix and patches: mediation of S-R memory and reward. *Life Sci*, 45, 1943-57.
- WILSON, M. A. & MCNAUGHTON, B. L. 1994. Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, 265, 676-9.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde am Institut für medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie der Universität Tübingen unter Betreuung von Prof. Dr. Jan Born und Dr. Hannes Noack durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Dr. Hannes Noack.

Die Versuche (Probandenakquise, Terminplanung, Termin 1, ggf. inkl. Wachnächten, Termin 2) wurden bei 43 von den insgesamt 59 Probanden selbstständig von mir durchgeführt. Clara Sax übernahm die Versuchsdurchführung bei 16 Probanden. Unterstützt wurden wir bei der MRT-Supervision durch Dr. Hannes Noack und Ralf Veit.

Die statistische Auswertung erfolgte, nach Anleitung von Dr. Hannes Noack, durch mich.

Das Scoring der Polysomnografiedaten erfolgte durch Astrid Günther (Studienassistentin am Institut für medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie Tübingen).

Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den

Leonie Jessing

8 Anhang

8.1 Aufklärungsbogen

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



UNIVERSITÄTS
KLINIKUM
TÜBINGEN

Medizinische Fakultät
Medizinische Psychologie und
Verhaltensneurobiologie

Prof. Dr. Jan Born
Dr. Hannes Noack
Dr. Ralf Veit

Silcherstr. 5
72076 Tübingen

+49 7071 – 29 87030
hannes.noack@uni-tuebingen.de

Sehr geehrter Studieninteressent,

mit diesem Aufklärungsbogen möchten wir Sie über den Ablauf und die Hintergründe der Studie:

Physiologie der räumlichen Integration während des Schlafs (PSI)

informieren.

Die Untersuchung wird am Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie in Tübingen in Zusammenarbeit mit der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie des UK Tübingen sowie dem Donders Institut in Nijmegen durchgeführt. Bitte lesen Sie diese Aufklärung sorgfältig durch. Die enthaltene Information beschreibt die Voraussetzungen, um an der Studie teilzunehmen sowie Ihre Rechte als Proband. Jederzeit beantworten wir gerne Ihre Fragen. Wenn Sie auch nach der Studie Fragen haben, können Sie die zuständige Person unter dieser Telefonnummer und E-Mail Adresse kontaktieren:

Dr. Hannes Noack
Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie /
Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie
Tel.: 07071/29-87030, Email: hannes.noack@uni-tuebingen.de

Ziele der Untersuchung

Räumliche Navigation ist eine komplexe Aufgabe, bei deren Lösung wir verschiedene Kanäle nutzen können, um uns zu orientieren oder Richtungen und Distanzen abzuschätzen. Diese Vielfalt in der Informationsverarbeitung spiegelt sich auch in der parallelen Aktivierung mehrerer Hirnregionen (bspw. des Hippocampus und des Striatums) während der Navigation wider.

Mit zunehmender Erfahrung in einer Umgebung finden wir Wege immer selbstverständlicher und müheloser. Wir ändern unsere Navigationsstrategie und damit auch die Aktivitätsmuster im Gehirn. Dabei spielt auch der Schlaf eine Rolle.

In dieser Studie wollen wir untersuchen, was hinter dieser zunehmenden Vertrautheit steckt. Wir wollen untersuchen, wie sich das Wechselspiel zwischen den verschiedenen Hirnregionen (d.h. Hippocampus und Striatum) während der Navigation verändert und welche Rolle der Schlaf dabei spielt. Hierzu benötigen wir 60 männliche Probanden.

Um den Einfluss des Sexualhormons Testosteron auf die Navigationsleistung untersuchen zu können, werden wir dreimal eine Speichelprobe von Ihnen nehmen, um Ihren aktuellen Testosteronstatus messen zu können.

Anhang B

Durchführung der Untersuchung

Insgesamt umfasst die Studie 2 Termine an 3 aufeinander folgenden Tagen. Der Zeitaufwand beträgt ca. 2-3h in der ersten und 2-3h in der zweiten Sitzung. Der 1. Termin findet in unserem Verhaltenslabor in der Silberstr. 5 statt. Sie werden an einem Computer einige Navigationsaufgaben in einer virtuellen Umgebung lösen und einige Fragebögen bearbeiten.

Nach dem ersten Termin werden Sie der Schlaf- oder der Wachgruppe zugeteilt. Für alle Teilnehmer gilt jedoch, dass Sie während der 48 Stunden bitte auf den Konsum von Alkohol, Drogen oder koffeinhaltiger Getränke verzichten. Außerdem bekommen alle Teilnehmer einen Aktivimeter angelegt, der Ihre Bewegungs- und Schlafaktivität grob aufzeichnet.

Als Teilnehmer der Schlafgruppe legen wir Ihnen ein mobiles Gerät zur Aufzeichnung Ihrer Hirnströme (EEG) an, bevor Sie nach Hause gehen, um in der Nacht zu schlafen. Sie kommen am nächsten Morgen bitte wieder in unser Labor, damit wir das Gerät entfernen können. **Bitte gehen Sie an diesem Abend vor Mitternacht ins Bett und sorgen Sie dafür, dass Sie ausreichend Schlaf bekommen.**

Als Teilnehmer der Wachgruppe verbringen Sie die gesamte Nacht wachend in unserem Labor bevor Sie am nächsten Morgen nach Hause gehen. Bitte beachten Sie, dass Sie auch während des gesamten Tages bis abends um 20:00 Uhr nicht schlafen dürfen. Wir bitten Sie außerdem, auf koffeinhaltige Getränke zu verzichten. Da Schlafdeprivation zu Einschränkungen der Aufmerksamkeit führen kann, bitten wir Sie, sich für diesen Tag keine Tätigkeiten vorzunehmen, die Ihre ganze Aufmerksamkeit erfordern.

Der 2. Termin findet am Abend des dritten Tages am Magnetresonanztomographen (MRT) des MPI für Biologische Kybernetik in der Spemannstraße 41 statt. Nach der Aufklärung können Sie sich zunächst mit dem MRT oder „Scanner“ von außen vertraut machen. Sie werden auf dem Rücken liegend auf einem gepolsterten Tisch mit dem Kopf voraus in die Scannerröhre hineingefahren. Durch den Lautsprecher bleiben Sie während der Messung ständig mit den Untersuchern in Kontakt. Sollten Sie Beschwerden, Schmerzen, oder andere Störungen Ihres Wohlbefindens haben, können Sie sich jederzeit per Druck auf den Alarmball bemerkbar machen.

Sie werden insgesamt ca. 60 Minuten im Scanner liegen, teilweise mit Ruhephasen, teilweise mit einer virtuellen Navigationsaufgabe. In der Zeit werden sowohl funktionelle als auch anatomische Aufnahmen Ihres Gehirns gemacht. Die anatomischen Aufnahmen liefern Information über die Struktur Ihres Gehirns. Bei den funktionellen Aufnahmen hingegen wird die Aktivität des Gehirns während der Aufgabe abgebildet. Wichtig für die Bild-Qualität ist vor allem, dass Ihr Kopf während der Messung absolut still gehalten werden muss.

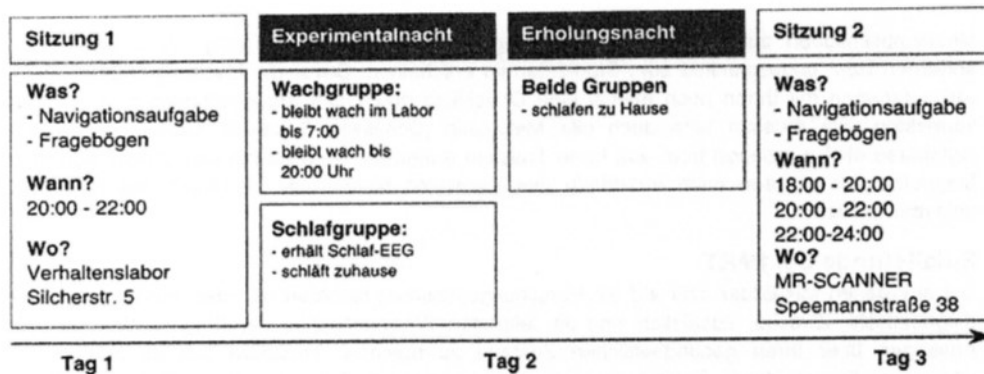


Abbildung 1: Beispielhafter Ablauf des Versuchs für Wach- und Schlafgruppe. Die genauen Zeiten der 2. Sitzung können zwischen 18:00-22:00 variieren.

Mögliche Risiken der Kernspintomographie

Sie werden in einem Kernspintomographen mit einer üblichen magnetischen Feldstärke von 3T liegen. Die Kernspintomographie ist ein nicht-invasives Verfahren, das nach derzeitigem Wissensstand keine schädigenden Wirkungen hat. Als mögliche Begleiterscheinungen während des Aufenthalts im Scanner können Nervenreizungen und dadurch ausgelöste Muskelzuckungen auftreten (v.a. beim Einfahren in die Röhre), diese sind jedoch unbedenklich. Vereinzelt kann auch eine Erwärmung des Körpers auftreten. Das Kernspingerät erzeugt kleine Bewegungen und laute Geräusche gegen die Sie Ohrstöpsel und/oder schalldämpfende Kopfhörer bekommen werden. In seltenen Fällen kann es zu einem Tinnitus kommen. Wenn Sie empfindliche Ohren haben, geben Sie uns bitte Bescheid, damit wir die Lärmbelästigung so gering wie möglich für Sie halten können. Da die Röhre des Geräts aus technischen Gründen relativ eng ist, sollten Sie nicht unter Platzangst leiden

Die funktionelle Kernspintomographie (fMRT) beruht auf der Erzeugung starker magnetischer Felder und hochfrequenter Radiowellen. Aus diesem Grund ist es wichtig zu wissen dass Sie keine ferromagnetischen Teile im oder am Körper haben.

Nicht hinein dürfen:

- Herzschrittmacher
- Cochlea-Implantate und nicht entfernbare Hörgeräte
- Granatsplitter
- Metallplatten
- feste Zahnspannen / Metall-Kronen o.ä.
- manche (vor allem ältere) Prothesen
- Metallclips oder Gefäßstents von einer Operation
- Kupferspiralen (zur Empfängnisverhütung)
- Piercings (falls Sie diese nicht entfernen können/wollen)
- manche Tätowierungen

Damit Sie sich und andere nicht gefährden, bitten wir Sie, uns zu sagen ob bei Ihnen mögliche unentfernbar Metallteile vorhanden sind. Wir bitten Sie weiterhin, bequeme, lange Kleidung ohne

Metallapplikationen zu tragen bzw. mitzubringen. Außerdem ist es nötig, dass Sie Makeup entfernen bzw. ungeschminkt zum Studientermin erscheinen. Bevor die Messung beginnt, gehen wir zusammen mit Ihnen noch einmal eine Checkliste durch, um Komplikationen zweifelsfrei zu vermeiden. Sie müssen bitte auch alle Metallteile (Schüssel, Schmuck, Uhren, Mobiltelefon, Geldbörse etc.) ausziehen bzw. aus Ihren Taschen entfernen. Kreditkarten und andere Karten mit Magnetstreifen müssen auch außerhalb des Kernspins bleiben, da sie durch das Magnetfeld unlesbar werden.

Zufallsfunde bei fMRT

Die erhobenen MR-Bilder sind auf ein Forschungsminimum reduziert und dadurch ungeeignet für diagnostische Zwecke. Zusätzlich sind die leitenden Wissenschaftler der Studie nicht berechtigt, Aussagen über Ihren gesundheitlichen Zustand zu machen. Trotzdem gibt es eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass wir durch die Untersuchung etwas Auffälliges an Ihrem Gehirn entdecken. Diese sogenannten Zufallsfunde sind häufig ohne Krankheitswert. Bei der Hirnforschung mit bildgebenden Verfahren finden sich jedoch in ca. 1-8% der Untersuchungen klinisch bedeutsame Funde^{1,2}.

Im Fall eines Fundes werden folgende Maßnahmen unternommen: die Bilder werden von einem Neuroradiologen beurteilt, der entscheidet, ob der Zufallsfund möglicherweise weiterer ärztlicher Diagnostik bedarf oder nicht. In diesem Fall werden Sie über Ihren Zufallsfund informiert und über das weitere Vorgehen beraten.

Widerruf der Einwilligung zur Teilnahme

Um an der Studie teilzunehmen, müssen Sie schriftlich bestätigen, dass Ihre Teilnahme freiwillig ist. Auch wenn Sie sich anfangs für eine Teilnahme entschieden haben, können Sie jederzeit und ohne Angabe von Gründen Ihre Einwilligung zurückziehen.

Gesetzliche und ethische Verpflichtungen

Die Durchführungsbestimmungen dieser Studie wurden von der unabhängigen Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen angesichts der ethischen und rechtlichen Aspekte des Forschungsvorhabens überprüft. Es wurde keine verschuldensunabhängige Versicherung für diese Studie abgeschlossen.

Aufwandsentschädigung

Für die Teilnahme erhalte ich eine Aufwandsentschädigung von mindestens 50,- Euro, wenn ich der Schlafgruppe angehöre, bzw. 115,- Euro, wenn ich in der Wachgruppe bin.

¹ Katzman et al. (1999) Incidental findings on brain magnetic resonance imaging from 1000 asymptomatic volunteers. JAMA, 282(1): 36-39.

² Illes et al. (2004) Ethical consideration of incidental findings on adult brain MRI in research. Neurology, 62(6): 888-890.

³ Heinemann et al. (2007). Zufallsbefunde bei bildgebenden Verfahren in der Hirnforschung Ethische Überlegungen und Lösungsvorschläge. Deutsches Ärzteblatt, 104(27): A1982-87.

Datenschutz

Die im Rahmen der Studie erhobenen Angaben unterliegen der Schweigepflicht und werden unter Wahrung der Bestimmungen des Datenschutzgesetzes gespeichert und wissenschaftlich ausgewertet. Die Weitergabe personenbezogener Daten an Dritte erfolgt nicht. Die Daten werden ausschließlich zu Forschungszwecken verwendet. Personenbezogene Kontaktdaten und Untersuchungsdaten werden getrennt voneinander gespeichert und streng vertraulich behandelt. Ich kann die Einwilligung zur Verwendung der erfassten Daten jederzeit mit Wirkung für die Zukunft widerrufen.

Ich, _____, geb.: _____
Name Geburtsdatum

wurde über den Inhalt und Ablauf sowie die Bedeutung der Studie: **PSI**

am _____ von _____
Datum Name des Wissenschaftlers

aufgeklärt und möchte an dieser Studie teilnehmen. Ich habe die Aufklärung verstanden und meine Fragen wurden ausreichend und vollständig beantwortet. Ich wurde über die Voraussetzungen und Risiken der Studienteilnahme aufgeklärt und habe sie verstanden.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Ich kann meine Einwilligung zur Teilnahme an dieser Studie jederzeit zurückziehen.

Ich erkläre mich hiermit einverstanden, an der oben genannten Studie teilzunehmen.

 Tübingen, den _____ Unterschrift des Probanden/der Probandin

 Tübingen, den _____ Unterschrift des aufklärenden Wissenschaftlers

Information über zukünftige Studien (optional)

- ja nein Ich bin unverbindlich daran interessiert, bis auf Widerruf wieder als Probanden für Projekte des Instituts für Medizinische Psychologie angefragt zu werden. Ich bin damit einverstanden, dass folgende Angaben zu meiner Person in einer Datenbank ausschließlich zum Zwecke der Gewinnung von Probanden und Probandinnen für Studien am genannten Institut gespeichert werden.

8.2 Case Report Form

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



UNIVERSITÄTS
KLINIKUM
TÜBINGEN

2017

Institut für Medizinische
Psychologie und
Verhaltensneurobiologie

CASE REPORT FORM

Eingangsuntersuchung für
PHYSIOLOGY OF SPATIAL INTEGRATION (PSI)

Eingang Proband ID: _____

Kontakt Studienleitung

Prof. Dr. Born, Jan

Universität Tübingen

Institut für Medizinische Psychologie und
Verhaltensneurobiologie

+49 (0) 7071 29 87028

jan.born@uni-tuebingen.de

Dr. Noack, Hannes

Universität Tübingen

Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie

+49 (0) 7071 29 87030

hannes.noack@uni-tuebingen.de

Case Report Form für Proband _____ am _____ und am _____

Allgemeine Informationen

Geburtsdatum | | Alter z.B. 32Früh geboren? ja nein Gestationswoche Geschlecht weiblich männlichKörpergröße cm z.B. 185 cmKörpergewicht kg z.B. 80 kg

Muttersprache _____ z.B. Deutsch

Händigkeit Rechtshänder LinkshänderSehen ~~Deifmal~~ trichromatisch

Beruf (ggf. Fach+ Sem) _____

Höchster Schulabschluss Studium Abi Real Haupt
 JahreTeilnahme an anderen Studie ja, am _____ nein

Wenn ja, bei wem? _____

Durchgeführte Tests Trail Making Test
Digit Symbol test
Digit Span

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Eingangsuntersuchung

Lifestyle

Sind Sie körperlich aktiv? ja Was? _____
 neinTrinken Sie Alkohol? ja Wie viel? _____
 nein z.B. 6 Biere pro Woche

Case Report Form für Proband _____ am _____ und am _____

Raucher ja nein **Wie viel?** _____
 nein
 nicht mehr: Wann haben Sie aufgehört?

Schlafverhalten

Gewöhnlicher Einschlafzeitpunkt []:[] z.B. 22:30
Gewöhnliche Schlafdauer _____ z.B. 8 Stunden
Schlaf tagsüber ja nein
 Wenn ja, wann []:[] z.B. 22:30
 wie viel _____ z.B. 8 Stunden
Schichtarbeit ja nein
Nacharbeit in den letzten 6 Wochen ja nein
Interkontinentalflüge (>4h Zeitunterschied) in den letzten 4 Wochen ja nein

Anamnese

Stat. Krankenhausaufenthalte? ja nein
 Wann? _____
 Warum? _____

Nehmen Sie Medikamente? ja nein
 Welche? _____

Akute Erkrankung oder Infektion während der letzten vier Wochen?

ja nein
 Welche und wann? _____

Kommentar

Bluthochdruck? ja nein _____

Hoher Cholesterinspiegel? ja nein _____

Case Report Form für Proband _____ am _____ und am _____

Anamnese

Diabetes?	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Hyperlipidämie?:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Blutungsneigung?:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Psychose (Manie, Halluzinationen etc)	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Andere psychische Störungen	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Haben Sie Allergien?	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Wirbelsäule/des Haltungs- und Bewegungsapparates	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Nervensystems	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Kopf und Hals	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Lunge/Atemwege	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Niere/Harnwege	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____

Familienvorgeschichte

			Kommentar
Bluthochdruck	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Herzerkrankungen	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Schlaganfall	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Herzinfarkt	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Angina pectoris	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Psychosen	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Neurologische Erkrankungen	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Sonstige Erkrankungen	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____

Case Report Form für Proband _____ am _____ und am _____

MRT-Safety-Check

Herzschrittmacher oder andere Geräte:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Implantate in Herz oder Blutgefäßen:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Orthopädische oder chirurgische Metallteile:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Irgendwelche Prothesen:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Andere Implantate:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Metallhaltige Teile anderer Art:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Platzangst:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Tätowierung:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein
Permanent Make-up:	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein

(ab hier bitte nicht weiter ausfüllen)

EinwilligungserklärungAlles ausgefüllt ja nein _____**Studienteilnahme möglich** (am Ende der Eingangsuntersuchung auszufüllen)Ausschlusskriterien geprüft ja neinEinschlusskriterien erfüllt ja nein

Wenn ja, Proband ID: _____

Durchführungsprotokoll Sitzung 1

Fragebögen:

SSS	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
SFAR	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
STAI	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
LAWTON 1 +2	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
SBSOD	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
PANAS	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Sex Roles	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Self-Esteem	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Aktueller Zustand	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____
Post-experimenteller Fragebogen	<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	_____

INTEGRATION RÄUMLICHER REPRÄSENTATIONEN (PSI)
INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE UND VERHALTENSNEUROBIOLOGIE

6

Case Report Form für Proband _____ am _____ und am _____

Tests:

- ~~Selbsttests durchgeführt~~ ja ~~nein~~ _____
 PVT durchgeführt ja nein _____
 OSpan durchgeführt ja nein _____
 Tunnel durchgeführt ja nein _____
 MWT durchgeführt ja nein _____
~~Trail Making A / B~~
~~durchgeführt~~ ja ~~nein~~ _____
 Navigationsaufgabe ja nein _____
 durchgeführt

Vorbereitung des Retentionsintervalls

- Instruktionen für die ja nein _____
 Nacht
 Actiwatch angelegt ja nein _____
 EEG angelegt ja nein _____
 SFAR mitgegeben ja nein _____
 Testosteron Röhrchen ja nein _____
 mitgegeben

Durchführungsprotokoll Sitzung 2

Fragebögen:

- SSS ja nein _____
 SFAR ja nein _____
 STAI ja nein _____
 PANAS ja nein _____
 Post-experimenteller ja nein _____
 Fragebogen

Tests:

- PVT durchgeführt ja nein _____
 MWT durchgeführt ja nein _____
 Navigationsaufgabe ja nein _____
 durchgeführt

Case Report Form für Proband _____ am _____ und am _____

Datenbackup**Sitzung 1**Navigationsdaten gesichert ja nein _____Tunneldaten gesichert ja nein _____PVT gesichert ja nein _____**Retentionsintervall**EEG-Daten heruntergeladen / gespeichert ja nein _____Actiwatchdaten heruntergeladen / gespeichert ja nein _____**Sitzung 2:**Navigationsdaten gesichert ja nein _____PVT Daten gesichert ja nein _____MR-Daten gesichert ja nein _____**Vollständigkeitserklärung**

Ich habe die Daten in diesem Erhebungsbogen überprüft und bestätige Ihre Richtigkeit, Vollständigkeit, Lesbarkeit und Aktualität.

Sitzung 1

Datum: _____

Unterschrift: _____

Sitzung 2

Datum: _____

Unterschrift: _____

8.3 Standfordschläfrigkeitsskala

ID: _____

Datum: _____

Stanford-Schläfrigkeits-Skala

Im Folgenden soll der Grad der Schläfrigkeit (wie wach fühlen Sie sich?) erhoben werden:

Kreuzen Sie bitte das entsprechende Kästchen an.

Schläfrigkeitsgrad	Punktwert
Ich fühle mich aktiv, lebhaft, aufmerksam oder sehr wach	1
Ich kann konzentriert arbeiten, habe aber kein Leistungshoch	2
Ich fühle mich wach, entspannt und aufnahmefähig aber nicht voll konzentriert	3
Ich fühle mich irgendwie träge	4
Ich fühle mich träge, verlangsamt, und könnte mich hinlegen	5
Ich fühle mich schläfrig, benebelt, kämpfe gegen die Müdigkeit und würde mich lieber hinlegen	6
Ich bin kurz vor dem Einschlafen und habe bereits Traumdeutungen	7
Ich schlafe	8

8.4 Positive and Negative Affect Schedule

ID: _____

Datum: _____

PANAS

Uhrzeit: _____

Dieser Fragebogen enthält eine Reihe von Wörtern, die unterschiedliche Gefühle und Empfindungen beschreiben. Lesen Sie jedes Wort und tragen dann in die Skala neben jedem Wort die **Intensität** ein. Sie haben die Möglichkeit zwischen fünf Abstufungen zu wählen.

Geben Sie bitte an, wie Sie sich **gerade jetzt** fühlen.

	Gar nicht	ein bisschen	einigermaßen	erheblich	äußerst
1. aktiv	1	2	3	4	5
2. bekümmert	1	2	3	4	5
3. interessiert	1	2	3	4	5
4. freudig erregt	1	2	3	4	5
5. verärgert	1	2	3	4	5
6. stark	1	2	3	4	5
7. schuldig	1	2	3	4	5
8. erschrocken	1	2	3	4	5
9. feindselig	1	2	3	4	5
10. angeregt	1	2	3	4	5
11. stolz	1	2	3	4	5
12. gereizt	1	2	3	4	5
13. begeistert	1	2	3	4	5
14. beschämt	1	2	3	4	5
15. wach	1	2	3	4	5
16. nervös	1	2	3	4	5
17. entschlossen	1	2	3	4	5
18. aufmerksam	1	2	3	4	5
19. durcheinander	1	2	3	4	5
20. ängstlich	1	2	3	4	5

Müdigkeit

Wie müde sind Sie?

Total müde
sehr müde
etwas müde
ein wenig müde
gar nicht müde

Motivation

Wie viel Lust haben Sie, die Aufgaben zu machen?

Gar keine Lust
wenig Lust
ein bisschen
viel Lust
große Lust

8.5 Santa Barbara Sense of Direction Scale

ID:

SANTA BARBARA SENSE-OF-DIRECTION SCALE

Sex: F M

Today's Date: _____

Age: _____ V. 2

Dieser Fragebogen besteht aus einigen Aussagen über Ihre räumlichen und Orientierungsfähigkeiten, Präferenzen und Erfahrungen. Bitte kreisen Sie eine Nummer nach jeder Aussage ein, dem Grad Ihrer Übereinstimmung entspricht. Kreisen Sie „1“ ein, wenn Sie sehr stark mit Ihnen übereinstimmen, „7“, wenn die Aussage überhaupt nicht mit Ihnen übereinstimmt oder irgendeine Nummer dazwischen, wenn Ihre Übereinstimmung irgendwo dazwischen liegt. Kreisen Sie „4“ ein, wenn Sie weder übereinstimmen oder nicht übereinstimmen.

1. Ich bin sehr gut darin, Wegbeschreibungen zu geben.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
2. Ich habe ein schlechtes Gedächtnis dafür, wo ich Dinge gelassen haben.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
3. Ich bin sehr gut darin, Entfernungen einzuschätzen.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
4. Mein Orientierungssinn ist sehr gut.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
5. Ich neige dazu, über meine Umgebung in Himmelsrichtungen nachzudenken (N, S, E, W).
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
6. Ich verirre mich sehr leicht in einer neuen Stadt.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
7. Es macht mir Spaß, Landkarten zu lesen.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
8. Es fällt mir schwer, Wegbeschreibungen zu verstehen.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
9. Ich bin sehr gut darin Landkarten zu lesen.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
10. Ich erinnere mich an Wege nicht gut, wenn ich als Beifahrer in einem Auto mitfahre.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
11. Ich mag es nicht, Wegbeschreibungen zu geben.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
12. Es ist nicht wichtig für mich, zu wissen, wo ich mich gerade befinde.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung
13. Ich lasse normalerweise andere die Streckenplanung für längere Reisen für mich machen.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung

ID:

14. Ich kann mich normalerweise gut an Strecken erinnern, die ich einmal gefahren bin.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung

15. Ich habe keine sehr gute "mentale Karte" meiner Umgebung.
starke Übereinstimmung 1 2 3 4 5 6 7 starke Abweichung

8.6 Lawton 1

ID: _____

Datum: _____

Spatial Anxiety Scale (Lawton, 1994) cronbach's alpha = 0.8:

Wie viel Angst haben Sie vor folgenden Situationen:

Einen Laden zu verlassen, den Sie zum ersten Mal besucht haben, um dann zu entscheiden, in welche Richtung Sie gehen;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
Ihren Weg aus einem komplexen Bürogebäude zu finden, in dem Sie zum ersten Mal waren;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
In einem fensterlosen Raum in die Richtung eines Orts zeigen, nach dem Sie jemand gefragt hat, um dahin zu gelangen;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
Ihr Auto auf einem sehr großen Parkplatz oder in einer Tiefgarage wiederfinden;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
Ohne die Vorteile einer Karte eine mögliche Abkürzung ausprobieren;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
Ihren Weg zurück in ein bekanntes Gebiet finden, nachdem Sie falsch abgebogen sind und sich verfahren haben;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
Sich in einem großen unbekanntem Kaufhaus zurecht zu finden;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark
Ihren Weg zu einer Verabredung in einer unbekanntem Stadt oder Gegend finden;	1	2	3	4	5
	überhaupt nicht				sehr stark

8.7 Lawton 2

ID: _____

Datum: _____

Spatial Strategy Scale (Lawton, 1994); cronbach's alpha route: =.65; orientation = .73

Stellen Sie sich vor, Sie sind in einer Stadt, in der Sie schon einmal waren, die Ihnen aber nicht gut vertraut ist. Sie sind auf dem Weg zu einer Adresse, die Sie noch nicht besucht haben. Bitte geben Sie auf einer Skala von 1 (überhaupt nicht typisch für mich) bis 5 (sehr typisch für mich) an, wie typisch die folgenden Strategien in dieser Situation für Sie wären.

Ich behalte im Auge, in welche Himmelsrichtung ich fahre.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Bevor ich losgefahren bin, habe ich nach den Himmelsrichtungen gefragt, nach denen ich mich an bestimmten Straßen oder Landmarken richten muss.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Ich behalte im Auge, wie ich mich in Beziehung zur Sonne (oder dem Mond) bewege.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Ich behalte im Auge, wie ich mich in Bezug auf das Stadtzentrum bewege.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Während des Fahrens merke ich mir an bestimmten Straßen, wie weit ich gefahren bin (in km).	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Bevor ich losgefahren bin, habe ich die Entfernungen bis zu bestimmten Straßen erfragt.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Ich behalte ständig die Beziehung zwischen meinem aktuellen Standpunkt und dem letzten wichtigen Wegpunkt im Auge.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Ich habe mir eine Karte oder einen Plan der Umgebung bildlich vorgestellt.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Ich habe eine veröffentlichte Straßenkarte benutzt.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Vor dem Losfahren habe ich erfragt, an welchen Kreuzungen oder Landmarken ich nach rechts oder nach links gehen soll.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Bevor ich losfahre, habe ich nach einer Wegbeschreibung gefragt, die mir genau sagt, wie viele Straßen zwischen zwei Abbiegungen liegt.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Während ich fuhr, habe ich die Straßen vor jedem Abbiegen gezählt.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Bevor ich losfahre, habe ich nach einer handgemalten Karte gefragt.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	
Ich merke mir die Landmarken, wie Bauten oder natürlichen Objekten, an denen ich vorbei gehe.	1	2	3	4	5
	Überhaupt nicht typisch			Sehr typisch	

8.8 Fragen zum aktuellen Zustand

ID: _____

Datum: _____

Fragen zum aktuellen Zustand

1. Fühlen Sie sich ausgeruht und fit?	o ja o nein (Warum?)
2. Haben Sie in den letzten 48 Stunden Medikamente, Drogen oder Alkohol konsumiert?	o ja (Was?, Wie viel?) o nein
3. Wann haben Sie zuletzt gegessen?	vor ___ Stunden oder Uhrzeit _____
4. Wie viel haben Sie in den letzten 6 Wochen geraucht?	
5. Hatten Sie in den letzten 24 Stunden außergewöhnlichen Stress?	o ja (Welche Art?): o nein (Warum?)
6. Wann haben Sie zuletzt ein koffeinhaltiges Getränk zu sich genommen?	o nie o vor ___ Stunden, ___ Tagen
7. Wie viele Stunden haben Sie in der letzten Nacht geschlafen?	ca. ___ Stunden
8. Wie war die Qualität Ihres Schlafes?	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 sehr schlecht sehr gut

8.9 Edinburgh Händigkeitstfragebogen

ID: _____

Datum: _____

Händigkeitstfragebogen (Edinburgh Handedness Inventory, 1971)

Instruktion: „Bitte nennen Sie mir die Hand, mit der Sie folgende Tätigkeiten ausführen.“

Tätigkeit	rechts	links	mix
1. Etwas schreiben			
2. etwas zeichnen			
3. etwas werfen			
4. eine Schere benutzen			
5. Zähne putzen			
6. Ein Messer halten			
7. einen Löffel halten			
8. einen Besen halten (obere Hand)			
9. ein Streichholz anzünden			
10. den Deckel einer Schachtel öffnen			

8.10 Regensburger Wortflüssigkeitstest

RWT _____ Untertest: _____ Wörter _____

Probanden-Code: _____

Datum: _____

Uhrzeit: _____

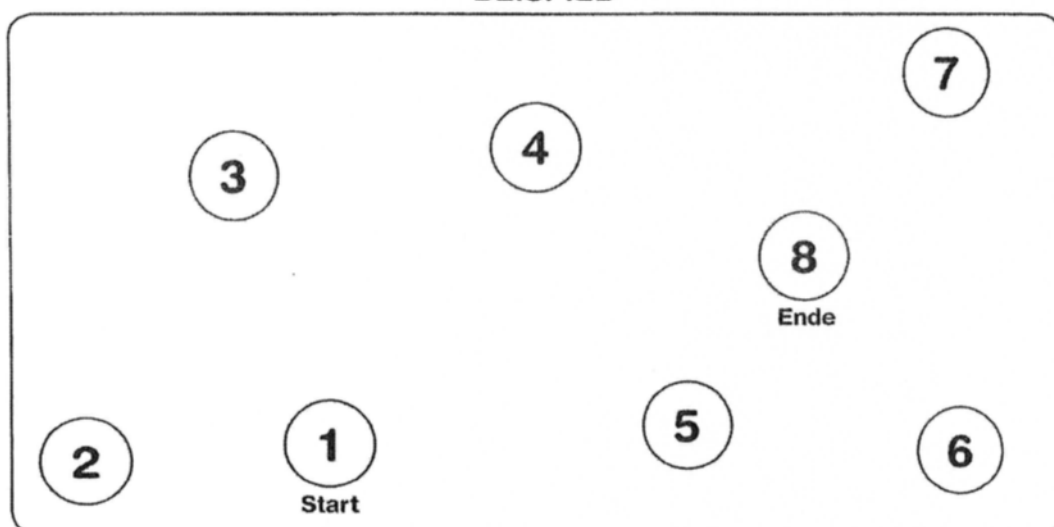
Bei dieser Aufgabe sollen Sie innerhalb von 2 Minuten möglichst viele verschiedene Wörter mit einem bestimmten Anfangsbuchstaben aufschreiben, den Ihnen der Versuchsleiter nennen wird. Dabei dürfen Sie keine Wörter mehrfach nennen, keine Eigennamen benutzen (z.B. Paris oder Peter wäre falsch) und die Wörter dürfen nicht mit dem gleichen Wortstamm anfangen (z.B. Sport, Sportplatz, Sportschuhe wäre falsch). Bitte versuchen Sie möglichst schnell viele verschiedene Wörter aufzuschreiben.

8.11 Trailmaking Test A und B

TRAIL MAKING

Part A

BEISPIEL



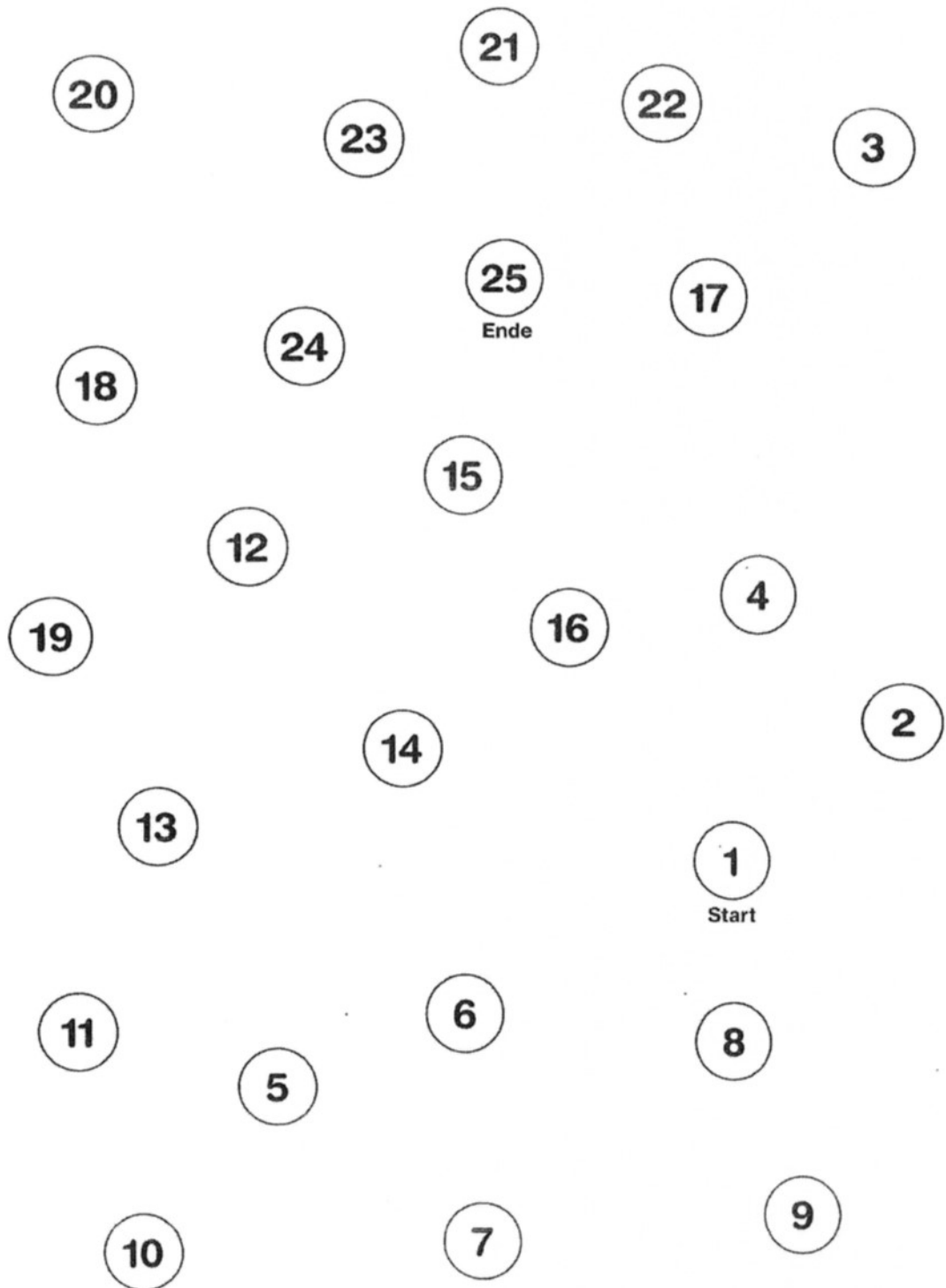
Alter		20 bis 39	40 bis 49	50 bis 59	60 bis 69	70 bis 79
Prozentrang	90	21	22	25	29	38
	75	26	28	29	35	54
	50	32	34	35	48	80
	25	42	45	49	67	105
	10	50	59	67	104	168

Name:

Alter:

Datum:

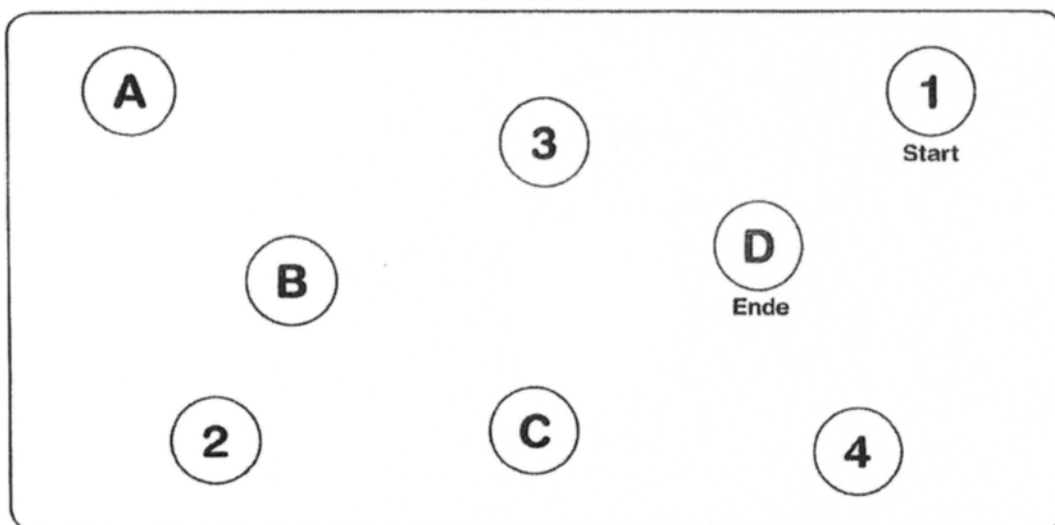
Geschlecht:



TRAIL MAKING

Part B

BEISPIEL



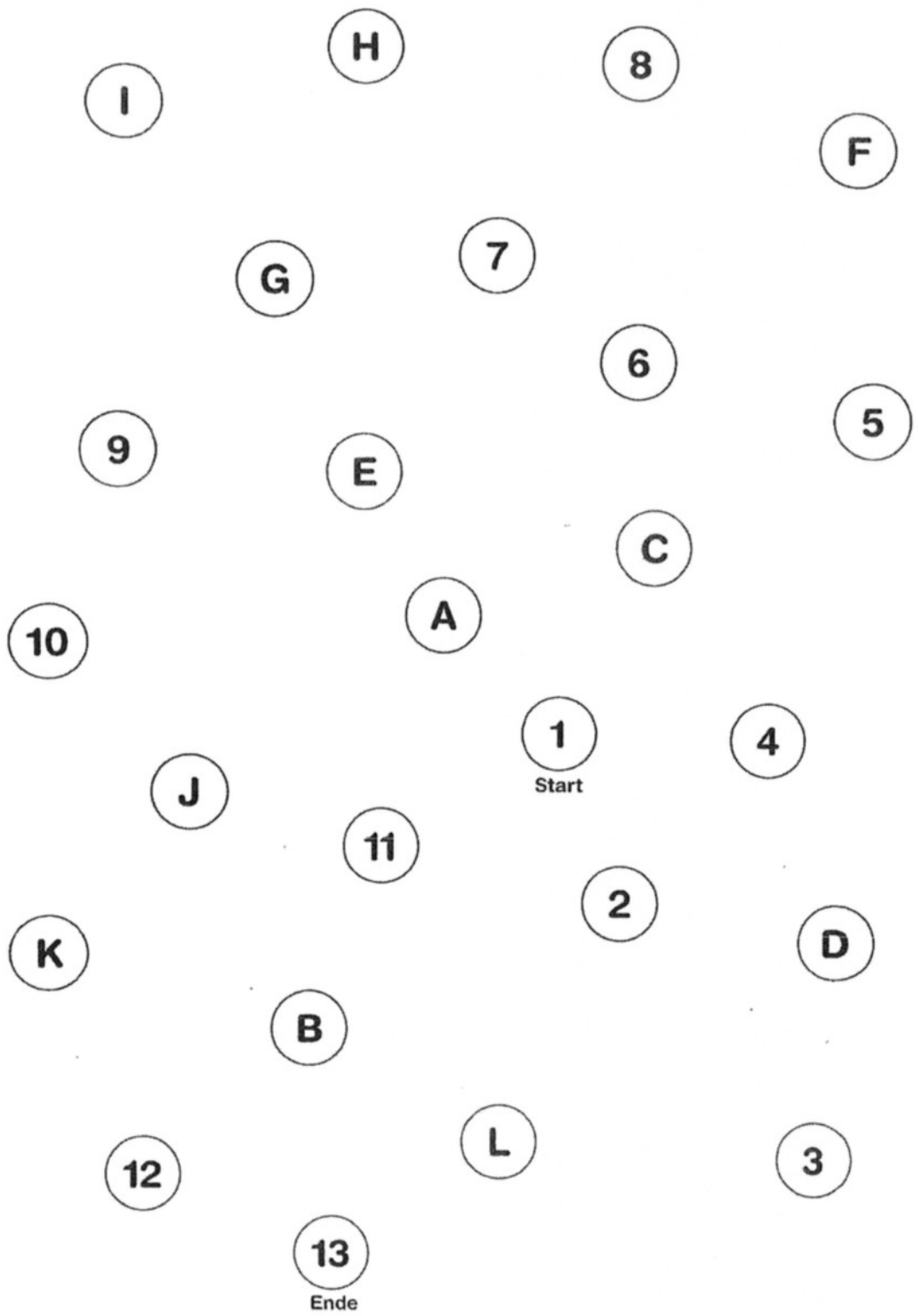
Alter		20 bis 39	40 bis 49	50 bis 59	60 bis 69	70 bis 79
Prozentrang	90	45	49	55	64	79
	75	55	57	75	89	132
	50	69	78	98	119	196
	25	94	100	135	172	292
	10	129	151	177	282	450

Name:

Alter:

Datum:

Geschlecht:



8.12 State-Trait-Anxiety-Inventory X1 und X2

Fragebogen zur Selbstbeschreibung

STAI-G Form X 1

Name _____ Mädchenname _____
 Vorname _____ Geburtsdatum _____ Alter _____ Jahre
 Beruf _____ Geschlecht m/w
 Datum _____ Institution _____
 Uhrzeit _____

Anleitung: Im folgenden Fragebogen finden Sie eine Reihe von Feststellungen, mit denen man sich selbst beschreiben kann. Bitte lesen Sie jede Feststellung durch und wählen Sie aus den vier Antworten diejenige aus, die angibt, wie Sie sich jetzt , d. h. in diesem Moment , fühlen. Kreuzen Sie bitte bei jeder Feststellung die Zahl unter der von Ihnen gewählten Antwort an. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten. Überlegen Sie bitte nicht lange und denken Sie daran, diejenige Antwort auszuwählen, die Ihren augenblicklichen Gefühlszustand am besten beschreibt.				
	ÜBERHAUPT NICHT	EIN WENIG	ZIEMLICH	SEHR
1. Ich bin ruhig	1	2	3	4
2. Ich fühle mich geborgen	1	2	3	4
3. Ich fühle mich angespannt	1	2	3	4
4. Ich bin bekümmert	1	2	3	4
5. Ich bin gelöst	1	2	3	4
6. Ich bin aufgeregt	1	2	3	4
7. Ich bin besorgt, daß etwas schiefgehen könnte	1	2	3	4
8. Ich fühle mich ausgeruht	1	2	3	4
9. Ich bin beunruhigt	1	2	3	4
10. Ich fühle mich wohl	1	2	3	4
11. Ich fühle mich selbstsicher	1	2	3	4
12. Ich bin nervös	1	2	3	4
13. Ich bin zappelig	1	2	3	4
14. Ich bin verkrampft	1	2	3	4
15. Ich bin entspannt	1	2	3	4
16. Ich bin zufrieden	1	2	3	4
17. Ich bin besorgt	1	2	3	4
18. Ich bin überreizt	1	2	3	4
19. Ich bin froh	1	2	3	4
20. Ich bin vergnügt	1	2	3	4

Fragebogen zur Selbstbeschreibung**STAI-G Form X 2**

Name _____ Mädchenname _____
 Vorname _____ Geburtsdatum _____ Alter _____ Jahre
 Beruf _____ Geschlecht m/w
 Datum _____ Institution _____
 Uhrzeit _____

Anleitung: Im folgenden Fragebogen finden Sie eine Reihe von Feststellungen, mit denen man sich selbst beschreiben kann. Bitte lesen Sie jede Feststellung durch und wählen Sie aus den vier Antworten diejenige aus, die angibt, wie Sie sich im allgemeinen fühlen. Kreuzen Sie bitte bei jeder Feststellung die Zahl unter der von Ihnen gewählten Antwort an. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten. Überlegen Sie bitte nicht lange und denken Sie daran, diejenige Antwort auszuwählen, die am besten beschreibt, wie Sie sich im allgemeinen fühlen.				
	FAST NIE	MANCHMAL	OFT	FAST IMMER
21. Ich bin vergnügt	1	2	3	4
22. Ich werde schnell müde	1	2	3	4
23. Mir ist zum Weinen zumute	1	2	3	4
24. Ich glaube, mir geht es schlechter als anderen Leuten	1	2	3	4
25. Ich verpasse günstige Gelegenheiten, weil ich mich nicht schnell genug entscheiden kann	1	2	3	4
26. Ich fühle mich ausgeruht	1	2	3	4
27. Ich bin ruhig und gelassen	1	2	3	4
28. Ich glaube, daß mir meine Schwierigkeiten über den Kopf wachsen	1	2	3	4
29. Ich mache mir zuviel Gedanken über unwichtige Dinge	1	2	3	4
30. Ich bin glücklich	1	2	3	4
31. Ich neige dazu, alles schwer zu nehmen	1	2	3	4
32. Mir fehlt es an Selbstvertrauen	1	2	3	4
33. Ich fühle mich geborgen	1	2	3	4
34. Ich mache mir Sorgen über mögliches Mißgeschick	1	2	3	4
35. Ich fühle mich niedergeschlagen	1	2	3	4
36. Ich bin zufrieden	1	2	3	4
37. Unwichtige Gedanken gehen mir durch den Kopf und bedrücken mich	1	2	3	4
38. Enttäuschungen nehme ich so schwer, daß ich sie nicht vergessen kann	1	2	3	4
39. Ich bin ausgeglichen	1	2	3	4
40. Ich werde nervös und unruhig, wenn ich an meine derzeitigen Angelegenheiten denke	1	2	3	4

8.13 Schlafragebogen (SF-A-R)

Code: _____

Fragebogen zur Schlafqualität (SF-A-R)

Datum: _____

Ankunft: _____ Uhr

Licht aus: _____ Uhr

Eingeschlafen: _____ Uhr

Licht an/Aufgewacht: _____ Uhr

Anleitung:

Die folgenden Fragen beziehen sich darauf, wie Sie in der letzten Nacht geschlafen haben. Kreuzen Sie bitte die Antworten an, die für Sie am ehesten zutreffen. Gehen Sie bei der Beantwortung der Fragen zügig voran und lassen Sie keine Frage aus. Bitte sofort nach dem Aufwachen morgens ausfüllen!

1.) Konnten Sie, nachdem Sie sich schlafen gelegt hatten, gleich einschlafen?

Ja.	
Nein, erst nach 10 min.	
Nein, erst nach 20 min.	
Nein, erst nach 40 min.	
Nein, erst nach 1 Stunde.	
Nein, erst nach mehr als 1 Stunde.	
Ich konnte überhaupt nicht schlafen.	

1.a) Falls Nein, welches waren die Gründe? (Mehrfachnennungen möglich)

Persönliche / berufliche Probleme	
Geräusche im Zimmer oder von draußen	
Beschäftigung mit Tagesereignissen	
Ungewohnte Schlafumgebung	
Sonstige:	

2.) In der Einschlafphase hat man hin und wieder plötzlich deutliche Bildeindrücke. War dies gestern Abend bei Ihnen so?

Nein	Bin nicht sicher	Ja, sehr deutlich

3.) Hatten Sie während der Einschlafphase Muskelzuckungen in den Armen oder Beinen?

Nein	Leicht	Stark

Code: _____

4.) Sind Sie gestern nach dem Einschlafen nachts wieder aufgewacht?

Nein	1x	2x	3x	>3x

4.a) Falls Ja, welches waren die Gründe? (Mehrfachnennungen möglich)

Persönliche / berufliche Probleme	
Geräusche im Zimmer oder von draußen	
Ich musste zur Toilette	
Ich hatte schlecht geträumt	
Sonstige:	

4.b) Falls Ja, wie lange waren Sie ungefähr wach? (Schätzen Sie bitte.)

1. Aufwachen	Dauer (min):	
2. Aufwachen	Dauer (min):	
3. Aufwachen	Dauer (min):	
4. Aufwachen	Dauer (min):	

5.) Können Sie sich erinnern, ob Sie heute Nacht geträumt haben?

Nein, ich kann mich nicht erinnern geträumt zu haben	
Ja, ich habe geträumt, kann mich aber nicht mehr an den Trauminhalt erinnern.	
Ja, ich habe geträumt und kann mich an den Trauminhalt erinnern.	

5a.) Falls ja, welche Gefühle hatten Sie während des Träumens (Mehrfachnennungen möglich)

Angenehm	Neutral	Unangenehm

5b) Falls ja, was war (grob) der Inhalt der Träume

6.) Haben Sie in der letzten Nacht geschwitzt?

Nein	Leicht	Stark

Code: _____

7.) Haben Sie heute Morgen Kopfschmerzen?

Nein	Leicht	Stark

8.) War der gestrige Tag für Sie anstrengend?

Nein	Ein wenig	Sehr

Anleitung:

Auf dieser Seite finden Sie einige Wörter, mit denen Sie beschreiben können, wie Sie sich gestern Abend fühlten, wie Sie heute Nacht geschlafen haben und wie Sie sich heute Morgen fühlen. Kreuzen Sie hinter jedem Wort an, in welchem Ausmaß es für Sie zutrifft. Bitte antworten Sie zügig und lassen Sie keine Zeile aus!

9.) Wie haben Sie letzte Nacht geschlafen?

	Sehr	Ziemlich	Mittel	Wenig	Nicht
a) gleichmäßig					
b) tief					
c) gut					
d) entspannt					
e) ungestört					
f) ruhig					
g) ausgiebig					

10.) Wie fühlten Sie sich gestern vor dem Schlafengehen?

	Sehr	Ziemlich	Mittel	Wenig	Nicht
a) sorglos					
b) erschöpft					
c) schlafbedürftig					
d) überfordert					
e) ausgeglichen					
f) ruhig					
g) müde					
h) entspannt					

Code: _____

11.) Wie fühlen Sie sich heute Morgen?

	Sehr	Ziemlich	Mittel	Wenig	Nicht
a) Ausgeglichen					
b) Dösig					
c) Tatkräftig					
d) munter					
e) frisch					
f) ausgeschlafen					
g) entspannt					

8.14 Aufklärungsbogen MRT

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



UNIVERSITÄTS
KLINIKUM
TÜBINGEN

Medizinische Fakultät
Medizinische Psychologie und
Verhaltensneurobiologie

Prof. Dr. Jan Born
Dr. Hannes Noack
Dr. Ralf Veit

Silberstr. 5
72076 Tübingen

+49 7071 – 29 75567
hannes.noack@uni-tuebingen.de

Sehr geehrte Studieninteressierte, sehr geehrter Studieninteressent,

mit diesem Aufklärungsbogen möchten wir Sie nochmals über den Ablauf und die Risiken der Untersuchung im Magnetresonanztomographen der Studie:

Physiologie der räumlichen Integration (PSI)

informieren.

Bei der Magnetresonanztomographie (MRT) handelt es sich um ein Verfahren zur Erstellung von Schnittbildern des menschlichen Körpers, das seit mehr als 30 Jahren auch in der radiologischen Diagnostik eingesetzt wird. Es beruht auf der Aufnahme von Signalen, die von Atomkernen im Körper ausgesendet werden, wenn zuvor eine Anregung mit einem Radiowellenimpuls in einem äußeren Magnetfeld erfolgt ist. Es werden keine Röntgenstrahlen verwendet!

Welchen Nutzen haben Sie von der Untersuchung

Da diese Untersuchung einen rein wissenschaftlichen Charakter hat, haben Sie keinen direkten Nutzen durch Ihre Teilnahme. **Es handelt sich bei dieser Untersuchung nicht um eine diagnostische Kernspintomographie, so dass etwaiger krankhafte Veränderungen nicht zielgerichtet untersucht werden.**

Im Fall eines zufälligen Fundes werden folgende Maßnahmen und folgende Schritte unternommen: die Bilder werden von einem Neuroradiologen beurteilt, der entscheidet, ob der Zufallsfund möglicherweise weiterer ärztlicher Diagnostik bedarf oder nicht. In diesem Fall werden Sie über Ihren Zufallsfund informiert und über das weitere Vorgehen beraten. Sie haben diesem Vorgehen mit der Einwilligung in die Studienteilnahme bereits zugestimmt. Wir bitten Sie hiermit, diese Zustimmung nochmals zu bestätigen.

Mögliche Risiken der MRT

Die Kernspintomographie ist ein nicht-invasives Verfahren, das nach dem derzeitigen Wissensstand keine schädigenden Wirkungen hat. Gleichzeitig basiert die MRT auf dem Einsatz von 3 erheblichen Kraftquellen: einem statischen Magnetfeld, einem wechselnden magnetischen Gradientenfeld, sowie hochfrequenten Radiowellenimpulsen. Für die Stärke dieser Quellen gibt es Richtlinien und Grenzwerte zum Schutz von Probanden und Patienten. Diese Grenzwerte werden eingehalten und vom Gerät selbst technisch überwacht. Alle drei Quellen erfordern darüber hinaus, dass die Untersuchung von geschultem Fachpersonal durchgeführt wird und dass Sie:

1. Bestimmte körperliche Kriterien erfüllen;
2. die Verhaltensregeln (s.u.) einhalten und;
3. den Anweisungen der Versuchsleiter folgeleisten um eine risikofreie Untersuchung zu gewährleisten.

MR- Aufklärung

Körperliche Voraussetzungen:

Sie können an der Studie nicht teilnehmen, wenn eine der folgenden Bedingungen auf Sie zutrifft.

- einen Herzschrittmacher / künstliche Herzklappen
- Cochlea-Implantate und nicht entfernbare Hörgeräte
- einen Granatsplitter
- Metallplatten (Hatten Sie eine OP?)
- feste Zahnspangen / Metall-Kronen o.ä.
- Herzkreislauferkrankungen
- Klaustrophobie (Angst vor Enge)
- Sie sind Schwanger?
- manche (vor allem ältere) Prothesen
- Metallclips oder Gefäßstents von einer Operation
- Kupferspiralen (zur Empfängnisverhütung)
- Piercings (falls Sie diese nicht entfernen können/wollen)
- eine Tätowierung
- Gehörerkkrankungen
- Eingeschränkte Temperaturempfindung

Verhaltensregeln:

- Sie dürfen nur ohne **Make-Up** in den Tomographen.
- Bitte legen Sie alle **metallischen Gegenstände**, die sie bei sich tragen, ab (Schlüssel, Geld, Stifte, Haarbänder, Brille, Gürtel, Kleidungsstücke mit Metallapplikationen, z.B. Bügel-BHs).
- Bitte nehmen Sie Ihren **Schmuck** ab (Ringe, Armbänder, Haarnadeln, Piercings!!)
- Bitte legen Sie alle **elektronischen Geräte** ab (Uhren, Telefone, Hörhilfen).
- Bitte legen Sie alle Karten mit **Magnetkarten** (z.B. Kreditkarten ab, diese werden sonst gelöscht)
- Bitte achten Sie darauf, dass Ihre Ohren gegen **laute Geräusche** geschützt sind.
- Bitte sorgen Sie dafür, dass während der Messung kein **Haut-auf-Hautkontakt** entsteht.

Mögliche Begleiterscheinungen

Trotz strengster Beachtung der Sicherheitsrichtlinien sind bestimmte Begleiterscheinungen möglich:

- **Hautreizungen**, die durch Tätowierungen oder Make-up, in denen metallhaltige Farbstoffe enthalten sind, hervorgerufen werden.
- Leichte bis mäßige **Kopfschmerzen** durch die lauten Geräusche, die in der Regel von selbst wieder abklingen und meist keiner Behandlung bedürfen.
- Extrem selten: Auftreten von **Ohrgeräuschen** (Tinnitus), die zumeist nach der Untersuchung wieder verschwinden, ausgesprochen selten aber auch bleiben können
- kurzzeitiges **Schwindelgefühl** beim Einfahren in den Tomographen
- während des Aufenthalts im Scanner können **Nervenreizungen** und dadurch ausgelöste Muskelzuckungen oder sensorische Reizungen (Phosphene) auftreten
- Bei Hautberührungen der Beine oder der Arme oder Hände kann es in seltenen Fällen durch die eingestrahlte Hochfrequenz zu lokalen **Erhitzungen** oder Hautverbrennungen an den Kontaktstellen kommen. Bei der Lagerung von Personen im Magnetresonanztomographen ist deshalb darauf zu achten, dass solche Berührungen nicht auftreten.

Sicherheitsfragen vor Durchführung einer MRT-Studie

Ist durch einen Unfall oder eine Verletzung Metall in Ihren Körper gekommen? Möglich wäre dies z.B.

- durch einen Berufsunfall (Metallarbeiter, Schweißer, etc.)
- durch Schussverletzungen oder Granatsplitter
- bei Verletzungen im Gesicht v.a. am Auge

Ja Nein

Befinden sich seit einer Operation Metallteile bzw. andere Implantate/Prothesen in Ihrem Körper wie

• Herzschrittmacher oder andere Geräte ?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Implantate an Herz oder Blutgefäßen, z.B. künstliche Herzklappe, Stent, Shunt oder Port, Clips, Coils, Filter, Katheder, Defibrilator etc. ?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• orthopädische oder chirurgische Metallteile (Clips, Platten, Nägel, Drähte, Klammern, Nähte, etc.) ?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• irgendwelche Prothesen (Einfache Zahnplomben sind ohne Belang) ?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• andere Implantate, z.B. Gelenkimplantate, Intrauterinpeessar (Spirale), Insulinpumpe etc. ?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• metallhaltige Teile anderer Art (z.B. abgebrochene Biopsienadeln, Dauerakupunktur-nadeln) ?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Tätowierungen	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Piercing	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Permanent make-up	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein

Einige Erkrankungen und besondere Umstände sollten bei der Untersuchung besonders berücksichtigt werden. Trifft einer der folgenden Punkte bei Ihnen zu?

• Zuckerkrankheit	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Bluthochdruck	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Lungen- oder Herzerkrankung	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Nieren- oder Lebererkrankung	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Blutarmut	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• neurologische Erkrankungen wie Epilepsie, Schlaganfall, etc.	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• sonstige Erkrankungen, die eine regelmäßige ärztliche Behandlung oder die Einnahme von Medikamenten erfordern	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Abhängigkeit (auch frühere) von Alkohol, Drogen oder Medikamenten	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• bei Frauen: mögliche Schwangerschaft	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
• Klaustrophobie (Angstzuständen in engen Räumen)?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein

Bitte beachten!

Legen Sie bitte alle der im Folgenden aufgelisteten Gegenstände ab, bevor Sie den MR-Raum betreten, damit diese nicht beschädigt werden bzw. keine Unfälle verursachen können. Sie können Ihre Sachen vor dem Untersuchungsraum in Schließfächern deponieren. Ein Raum zum Umziehen ist ebenfalls vorhanden.

Vorher abzulegende Gegenstände:

- Kreditkarten u.a. Karten mit Magnetstreifen
- Brieftasche, Geldbeutel incl. Kleingeld in den Taschen !
- Uhr
- Hörgerät
- Sicherheitsnadeln
- Haarklammern, -nadeln
- Schmuck (Ringe, Halsketten, Ohrringe, etc.)
- Stifte
- Schlüssel (außer dem Schließfachschlüssel)
- Taschenmesser
- Gürtel
- Kugelschreiber
- sonstige Gegenstände aus Metall, die Sie bei sich tragen

Brille und **Schuhe** können Sie im MR-Raum ablegen. Den **Schließfachschlüssel** sollten Sie bei den Untersuchern abgeben, die ihn sicher verwahren.

Bitte durchsuchen Sie alle Ihre Taschen und vergewissern Sie sich, dass Sie sicher keine Gegenstände mehr bei sich haben, die Metall enthalten könnten, bevor Sie den MR-Raum betreten.

Ich bestätige, dass Herr/Frau _____ die Sicherheitsfragen mit mir besprochen hat, und die Richtigkeit meiner Angaben.

(Name des Probanden)

Ort, Datum

(Unterschrift des Probanden)

9 Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Betreuer Hannes Noack bedanken, der mich über all die Zeit begleitet und unterstützt hat und mir auch nach dem Wechsel seiner Arbeitsstelle weiter als Ansprechpartner zur Seite stand. Tausend Dank hierfür.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr. Jan Born für die Möglichkeit bedanken, diese Arbeit in der Abteilung für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie an der Universität Tübingen, durchzuführen.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mich in meinem gesamten akademischen Werdegang und Leben immer unterstützt und bestärkt haben.

Besonderer Dank gilt meinem Mann für seine grenzenlose Geduld, Hilfe und Ratschläge, mit denen er mich immer begleitet hat.

Zuletzt möchte ich einem sehr kleinen Menschen danken, der mir auf den letzten Metern nochmal die nötige Motivation gegeben hat, um diese Arbeit fertig zu stellen.