

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

Bachelorarbeit der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen
Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen

Vorgelegt von
Julia Holzmann

Tübingen, Dezember 2016

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die eingereichte Arbeit war weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens.

Tübingen, Dezember 2016 _____

(Julia Holzmann)

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung	5
3. Material & Methoden	10
3.1 Probanden	10
3.2 Aufbau	11
3.3 Versuchsablauf	13
3.3.1 Sitzung 1	14
3.3.2 Sitzung 2	17
3.4 Datenerhebung und –analyse.....	19
4. Ergebnisse	21
4.1 Einfluss von Schlaf auf die Navigationsleistung	22
4.2 Tageszeiteffekt	27
4.3 Gendereffekt	27
4.4 Vigilanz & Schlafqualität	29
4.5 Sketch Maps	29
4.6 Abkürzungen	31
4.7 Motivation, Schwierigkeit, Selbsteinschätzung und verbrachte Zeit mit Computerspielen ...	33
5. Diskussion	34
6. Ausblick	39
7. Anhang	40
7.1 Tabellen aller PAOs (Percentage Above Optimum)	40
7.2 Sketch Maps	44
7.3 Einverständniserklärung	48
7.4 Fragebögen	49
8. Literaturverzeichnis	55

1. Zusammenfassung

Die Rolle des Schlafes bei der Konsolidierung räumlicher Informationen wurde bereits in vielen Studien belegt (z.B. Routenplanung: Peignieux et al. 2004, Landmarken-basierte Navigation: Ferrara et al, 2008). Die vorliegende Studie untersucht den Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis. Von besonderem Interesse ist dabei die Entstehung von Kartenwissen aus Routeninformationen.

Das Experiment fand in einer virtuellen Umgebung statt, die den Teilnehmern durch eine Oculus Rift Brille dargeboten wurde. 20 Versuchsteilnehmer nahmen am Experiment teil und wurden einer von zwei Gruppen, der Wach- und der Schlafgruppe zugeteilt. Die Wachgruppe absolvierte die erste Sitzung am Morgen und die zweite am Abend. Die Schlafgruppe schlief zwischen den beiden Sitzungen und absolvierte dementsprechend die erste Sitzung am Abend und die zweite am darauffolgenden Morgen. In der ersten Sitzung sollten, ausgehend von einem einzigen Startpunkt, 5 Routen zu unterschiedlichen Zielen gelernt werden. In der zweiten Sitzung sollten dann die 5 Ziele in einer anderen Reihenfolge als in der 1. Sitzung erreicht werden. Die Routen und Zielplätze waren so gewählt, dass der kürzeste Weg oftmals nur durch finden von neuen unbekanntem Abkürzungen, zustande kam. Diese Abkürzungen wurden nicht in der ersten Sitzung erlernt. Als Parameter für die Navigationsleistung wurden die zurückgelegten Strecken sowie die dafür benötigte Zeit beurteilt. Die allgemeine Wachheit sowie die Schlafqualität in der vergangenen Nacht wurden mit standardisierten Fragebögen erhoben (Stanford-Schläfrigkeit, Schlafqualität von Roman Görtelmeyer (SF-A-R)). Nach der zweiten Sitzung sollte außerdem eine Karte der Versuchsumgebung skizziert werden.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Schlaf und Navigationsleistung wurde nicht nachgewiesen. Dennoch gab es einen signifikanten Unterschied zwischen Wach- und Schlafgruppe in Bezug auf die Lernzuwachs von der ersten auf zweite Sitzung. Dieses Ergebnis könnte trotzdem auf einen möglichen Einfluss von Schlaf hindeuten, der weiter untersucht werden sollte. Auch die gezeichneten Karten korrelierten mit der Navigationsleistung der zweiten Sitzung. Probanden die schneller und akkurater navigierten, zeichneten auch bessere Karten.

2. Einleitung

Für mobile Lebewesen wie den Menschen ist es sehr wichtig, die Möglichkeit zu haben eine zielgerichtete Strecke zurückzulegen, um lebenswichtige Dinge wie z.B. Nahrung oder einen Sexualpartner zu erreichen. Dabei ist es wichtig ein Verständnis darüber zu haben, welches die kürzesten und effizientesten Routen sind und sich diese auch zu merken. Die Navigation ist eine sehr komplexe Form der Raumkognition, da der Organismus ständig seine eigene Position in Relation zu anderen Organismen, Objekten oder seinem Ausgangspunkt ermitteln und dabei oft auf Gedächtnisinhalte, also eine mentale räumliche Repräsentation, zurückgreifen muss. Es gibt verschiedene Arten bei der Herangehensweise der Routenplanung. Eine weitere Differenzierung des Navigationsprozesses ist mithilfe der zugrundeliegenden Strategien möglich: Bei der Landmarkennavigation orientiert man sich mithilfe von bestimmten, oft markanten, Objekten, Plätzen oder anderen wahrnehmbaren Aspekten der Umwelt. Dabei spielt der Wiedererkennungswert der Landmarke eine große Rolle. Dieser ist abhängig von der Auffälligkeit und Unterscheidbarkeit (Salienz), der Relevanz für die Wegentscheidung sowie seiner Permanenz, also wie wahrscheinlich es ist, diese Landmarke später dort wiederzufinden (Karnath & Thier, 2012). Landmarken können auf zwei Weisen gefunden werden: Falls die Landmarke vom Startpunkt aus sichtbar ist, spricht man von der sogenannten Zielführung. Hierbei wird eine Konstellation von mehreren Landmarken als „Schnappschuss“ gespeichert und ständig mit der aktuellen Position verglichen. Durch Bewegung kann der Unterschied zwischen „Schnappschuss“ und dem aktuellen Bild minimiert und das Ziel schließlich gefunden werden (Gillner, Weiss & Mallot, 2008). Bei verdeckten Landmarken können mittels der Wegweisung längere Routen als Ketten von Einzelschritten aufgebaut werden. Dabei sind die Landmarken mit bestimmten Aktionen wie z.B. Richtungsänderungen gekoppelt (O’Keefe & Nadel, 1978). Beim Fehlen dieser Landmarken kann auf die sogenannte Wegintegration zurückgegriffen werden. Hierbei wird ständig ein sogenannter Heimvektor erstellt, der die Positionsunterschiede zwischen dem Ausgangspunkt und der eigenen Position kontinuierlich aktualisiert. So gewinnt man Informationen über die aktuelle Position im Raum. Hierzu werden Information über Eigenbewegung, also propriozeptive, visuelle und vestibuläre Informationen verwendet. Dieser Vorgang wird als *spatial updating* bezeichnet (Wolbers et al., 2007). Bekannte Beispiele für die Navigation mit Wegintegration aus dem Tierreich sind Honigbienen und Ameisen, die ständig die eigene

Position im Vergleich zum Stock oder zum Bau aktualisieren und so immer wieder auf direktem Wege zurückfinden können (Collett & Collett, 2000).

Räumliches Wissen kann auch anhand der Informationsquelle in 4 Kategorien unterteilt werden: Das Landmarkenwissen basiert auf der Orientierung an markanten, wahrnehmbaren Aspekten der Umgebung. Dabei spielt es eine Rolle, wie auffällig und wie permanent eine Landmarke ist: so kann z.B. auch das Läuten der Kirchturmglöcken als akustische Landmarke dienen. Das Routenwissen kann als Aneinanderreihung von Richtungsentscheidungen aus egozentrischer Perspektive verstanden werden. Beim Überblickswissen hat man eine allozentrische Repräsentation der Lage und Anordnung verschiedener Objekte sowie auch der Winkel zwischen ihnen. Dieses Wissen ist also unabhängig von egozentrischen Perspektiven und der Position des Betrachters. Manche Forscher differenzieren noch weiter und schlagen als vierte Kategorie das sogenannte Graphenwissen vor. Es besteht aus den Beziehungen zwischen Orten, ähnlich einem Netzwerk oder einer Karte, wobei auch Granularitätsunterschiede einzelner Teile der Umgebung durch unterschiedliche Gewichtung der Kanten dargestellt werden können (Darstellung: Chrastil, 2013; view graph: Röhrich et al. 2014).

Findet sich ein Organismus nun in einer neuen Umgebung wieder, muss er die Position von verschiedenen Objekten lernen, um so Wissen über diesen Ort aufzubauen und sich zurechtzufinden. Dabei werden idealerweise erst Routen zu den wichtigsten Plätzen (z.B. Trink- und Futterplätze) gelernt, und dann langsam Wissen über Quervernetzungen verschiedener Plätze und schließlich das Layout der gesamten Umgebung aufgebaut. Dieses Wissen über örtliche Beziehungen ist in einer sogenannten kognitiven Karte gespeichert. Diese Karte ist aber nicht direkt mit einer Landkarte oder einem Stadtplan zu vergleichen, da Orte und deren Verbindungen je nach Person und der individuellen Wichtigkeit für diese unterschiedlich abstrahiert dargestellt sein können. Von ein und demselben Ort können verschiedene Personen auch größtenteils unterschiedlich aufgebaute kognitive Karten haben, da jeder seine Umwelt individuell wahrnimmt und es unterschiedlich ist, wie stark bestimmte Elemente der Umgebung zur Entstehung der räumlichen Repräsentation herangezogen werden (O'Keefe & Nadel, 1978; Tolman, 1948; Foo et al., 2005).

An der Navigation und dem Aufbau einer kognitiven Karte ist maßgeblich unser Gedächtnis beteiligt und bildet dabei einen wichtigen Einflussfaktor, da man ständig Zugriff auf die

mentale Repräsentation von örtlichen Informationen haben sollte. Der Erfolg bei der Zielfindung und Orientierung mithilfe dieser mentalen räumlichen Repräsentation hängt auch von der Gedächtnisleistung ab. Folgende 3 Systeme des Arbeitsgedächtnisses werden unterschieden: Die zentrale Exekutive (*central executive*) überwacht und verwaltet die anderen Subsysteme und besitzt keine eigene Speicherkapazität. Die Subsysteme bestehen einerseits aus der visuell-räumlichen Notiztafel (*visuospatial sketchpad*), welche visuell und räumlich aufgenommene Informationen kurzzeitig abspeichert, und andererseits aus der phonologischen Schleife (*phonological loop*), welche für die sprachliche Vermittlung zuständig ist (Baddeley, 1992). Beim Langzeitgedächtnis unterscheidet man zwischen deklarativem und das nicht-deklarativem Gedächtnis aufgeteilt. Das deklarative Gedächtnis enthält Tatsachen und Ereignisse, welche bewusst wiedergegeben werden können. Es kann wiederum in 2 Bereiche unterteilt werden: Das episodische Gedächtnis enthält spezifische Ereignisse, z.B. was man gestern Abend getan hat, und semantisches Wissen, z.B., dass die Hauptstadt von Italien Rom ist. Im nicht-deklarativen Gedächtnis können ebenfalls verschiedene Wissensinhalte unterschieden werden (Schacter, 1994). Die kognitive Karte kann als deklaratives Ortsgedächtnis verstanden werden und ist extrem wichtig für die Planung und zielgerichtete Fortbewegung im Raum.

An der Verarbeitung von ortsbezogenen Informationen ist vor allem der Hippocampus beteiligt (O'Keefe & Nadel, 1978), was sowohl beim Tier als auch beim Mensch nachgewiesen werden konnte. Der Hippocampus befindet sich im Temporallappen des Gehirns und hat eine wichtige Funktion bei der Überführung der Gedächtnisinhalte vom Kurz- ins Langzeitgedächtnis. (Morris et al., 1982; Ekstrom et al., 2003). Bei Ratten wurden Zellen beobachtet, die sogenannten Gitter- und Ortszellen im Hippocampus, die während der Navigation feuern und deren Aktivierung von der aktuellen Position des Tieres abhängt. Es wird sogar vermutet, dass das Netzwerk dieser Neurone einen Teil der mentalen räumlichen Repräsentation darstellt, also eine Art mentales Koordinatensystem. Während die Aktivität der Ortszellen von der aktuellen Eigenposition bestimmt wird, beeinflussen Anordnung und Distanz zu einzelnen Plätzen die Aktivität der Gitterzellen (Moser et al., 2015).

Nach der ersten Kodierung einer sensomotorischen Information wird durch verschiedene (oft noch unbekannte) zelluläre und molekulare Mechanismen diese Information in das Langzeitgedächtnis (Cortex) überführt. Dieser Prozess wird oft als Gedächtniskonsolidierung

bezeichnet (Dudai, 2004). Der Begriff der Konsolidierung geht dabei auf Müller und Pilzecker zurück, die im Jahre 1900 erstmals die Hypothese formulierten, dass Gedächtnisteile nicht in einer konstanten Form kodiert werden, sondern durch den Konsolidierungsprozess über die Zeit gestärkt, aber auch verändert werden können (Müller & Pilzecker, 1900). Die Konsolidierung kann auch den Transfer von Gelerntem in andere Hirnregionen beinhalten. So findet man Langzeiterinnerungen nicht mehr im Hippocampus, sondern im Neokortex wieder. Treten diese Prozesse während des Schlafes ein, so spricht man dementsprechend von Schlafkonsolidierung (Inostroza & Born, 2013; Stickgold 2005). Es werden seit langem Indizien für die förderlichen Effekte des Schlafes bei der Gedächtniskonsolidierung beobachtet: z.B. beim Erlernen von Sprache oder dem Erlangen von motorische Fähigkeiten (Clemens et al., 2005; Walker et al., 2002).

Der Schlafprozess an sich ist jedoch, im Gegensatz zur Schlafkonsolidierung, relativ gut verstanden. So besteht der menschliche Schlaf aus immer wiederkehrenden 90-minütigen Phasen, welche in REM- (rapid eye-movement) und in NREM- (nicht-REM) Schlafphasen unterteilt werden. Der NREM-Schlaf umfasst 4 Stadien, welche sich in der Tiefe des Schlafs, der Häufigkeit und der Intensität des Träumens, der EEG-Schwingungen, dem Muskeltonus und der regionalen Gehirnaktivität unterscheiden können. Stadium 3 und 4 sind Tiefschlafphasen und werden als SWS (slow-wave-sleep) bezeichnet, da sie auf dem Elektroenzephalogramm (EEG) große und langsame (0,5-4 Hz) Schwingungen erzeugen (Stickgold, 1998).

Sowohl beim REM-Schlaf, SWS als auch beim 2. Stadium des NREM-Schlafs weiß man, dass sie eine Bedeutung für die Schlafkonsolidierung von Hippocampus-abhängigen Gedächtnisinhalten haben. Dabei korreliert der Lernzuwachs über Nacht mit der Menge an spezifischen Schlafstadien oder –Ereignissen, während vollkommener und auch partieller Schlafentzug den Lernzuwachs verringern (Huber, 2004). Außerdem sollen gelernte Informationen, die sich überlappen, also gemeinsame Kontexte haben, während des SWS (slow-wave-sleep) konsolidiert werden, indem die damit verknüpfte neuronalen Bereiche nochmals reaktiviert werden (Lewis & Durrant, 2011). Bei Nagern werden während der Navigation in Abhängigkeit von ihrer aktuellen Position bestimmte Ortszellen im Hippocampus aktiviert. Identische Aktivierungsmuster wurden in den hippocampalen Ortszellen beim darauffolgenden Schlaf in dem NREM-Phasen beobachtet. Genau diese Reaktivierung von

Mustern, die durch bestimmte Erfahrungen gebildet wurden, ist ein wichtiges Element der Schlafkonsolidierung, da so bestimmte Gedächtnisinhalte neu verknüpft und somit stabilisiert werden können (Ji & Wilson, 2007). Auch bei Menschen konnte dieses Phänomen bereits beobachtet werden. Die Reaktivierung von Nervenzellen während des Schlafes wurde genau in den Bereichen des Hirns gefunden, die auch während der Navigation im wachen Zustand aktiv waren (Peigneux et al., 2004).

So spielt auch bei der Konsolidierung von örtlichen Informationen der Schlaf eine Rolle. Während Versuchsteilnehmer durch eine virtuelle Umgebung navigierten, wurden sie aufgefordert sich die Umgebung als Karte einzuprägen. Danach konnten die Personen die geschlafen hatten, schneller Landmarken finden, als die die nicht geschlafen hatten (Ferrara et al., 2008).

Um das Wissen über den Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis zu erweitern, untersucht diese Studie mittels einer virtuellen Umgebung, welchen Effekt Schlaf beim Übergang vom Routen- zum Karten- bzw. Überblickswissen hat. Dabei wird ermittelt, ob die Probanden die Informationen in eine generalisierte, abstraktere Form überführen, die sie allozentrisch nutzen können, um neue Abkürzungen zu finden. Hierzu lernen Probanden einer Wach- und einer Schlafgruppe in der ersten Sitzung bestimmte Routen zu Zielen und müssen in der zweiten Sitzung auf anderen Routen zu denselben Zielen, in anderer Reihenfolge, finden. Sie müssen also neue unbekannte Abkürzungen finden.

3. Material & Methoden

Um den Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis zu untersuchen, wurde eine virtuelle Stadt entworfen, die den Probanden mit der einer Oculus Rift Datenbrille präsentiert wurde und in welcher Navigationsaufgaben bewältigt werden mussten. Das Experiment umfasste zwei Sitzungen, wobei in der ersten Sitzung Routen zu verschiedenen Zielen gelernt wurden, und diese Ziele in der zweiten Sitzung selbstständig gefunden werden mussten. Zwischen den beiden Sitzungen war jeweils eine zwölfstündige Pause. Die Probanden wurden gleichmäßig auf zwei Gruppen verteilt: Die Wachgruppe absolvierte die erste Sitzung am Morgen und die zweite am Abend, während die Schlafgruppe die erste Sitzung am Abend und die zweite am Morgen durchlief.

3.1 Probanden

Am Experiment nahmen 20 Studenten teil (m:10, f:10; Alter: 20 – 26; Mittelwert = 22,05). Alle waren normalsichtig oder trugen eine entsprechende Sehhilfe. Keiner der Teilnehmer litt an einer Schlafstörung. Jede Versuchsperson war naiv gegenüber der Fragestellung und hatte auch keine Vorerfahrung mit dem Oculus Rift oder ähnlichen Navigationsexperimente gemacht.

3.2 Aufbau



Tabelle 1: Versuchsaufbau

Für die virtuelle Umgebung wurde ein Stadtmodell übernommen, welches von Tobias Kopp für sein Laborprojekt mit dem Programm City Engine angefertigt wurde (Kopp, 2015), und entsprechend der Anforderungen des Experimentes modifiziert. City Engine von ESRI stellte sich als geeigneter Städtegenerator heraus. Da die Universität Tübingen Teilnehmer an der ESRI-Landeslizenz in Baden-Württemberg ist, erhält sie kostenlos Zugang zum Tool City Engine. Über City Engine wurde dann ein Straßennetzwerk generiert. Diese Umgebung wurde dann in die Game-Engine Unity (Version 5.3.4f1) geladen, um dort den Versuch zu implementieren und die Ergebnisse aufzuzeichnen. Es wurden noch Bäume, Texturen und 3D-Zahlen als Zielmarkierungen eingefügt.

Die Stadt war komplett von einer bewegten Wasser-Animation umgeben, um eine optische Begrenzung zu schaffen. So hatte man das Gefühl, als würde man sich während des Experimentes auf einer Insel befinden.

Die Experimentalumgebungen wurde den Probanden mithilfe einer Oculus Rift Brille (DK2) präsentiert. Der Proband saß dabei auf einem 360°-drehbaren Hocker und konnte sich mittels eines X-Box-360-Controllers durch die virtuelle Umgebung bewegen (Abbildung 1). Dabei lief man immer in Blickrichtung und regelte seine Geschwindigkeit mit dem linken Joystick. Außerdem konnte man sich noch mit dem rechten Joystick nach rechts und links bewegen. So konnte man sich rechts und links die Umgebung anschauen und dabei trotzdem geradeaus laufen. Im Verlauf des Experimentes erhielt der Proband immer wieder schriftliche Anweisungen zum nächsten Handlungsschritt über das Oculus Rift eingeblendet. Um diese Anweisungen zu bestätigen benötigte man noch den A-Knopf des x-Box-Controllers. Alle anderen Knöpfe sowie das Steuerkreuz hatten im Experiment keine Funktion (Abbildung 2). Die Versuchsdurchführung in einer dreidimensionalen virtuellen Welt hat vor allem den Vorteil, dass die Probanden aktiv in der Ich-Perspektive agieren können und die Umwelt durch eine komplette Rundum-Ansicht realistischer wirkt. Ein weiterer Vorteil ist, dass die

Probanden so vestibuläre Signale über ihre Eigenbewegung erhalten, was bei einem 2-D-Experiment nicht der Fall wäre. Außerdem kann ständig die Position und die für einzelne Aktionen benötigte Zeit erfasst und dokumentiert werden.



Abbildung 2: X-Box-360-Controller

Die virtuelle Stadt, die die Versuchsumgebung darstellte, war einer Großstadt mit Hochhäusern nachempfunden. Dabei wurde darauf geachtet, dass Fassaden eher unscheinbar waren, und es auch sonst nur wenige Landmarken gab (Abbildung 3). Damit die Versuchsstadt einen eindeutig identifizierbaren Horizont hatte, wurde sie von einer Meer-Animation umgeben. Der Startpunkt wurde direkt auf eine Kreuzung in der Mitte der Stadt gesetzt, die von 4 Hochhäusern umgeben war, und durch ein gelbes X auf dem Boden markiert. Alle Ziele waren mit gelben 3D-Zahlen markiert, die von weitem schlecht sichtbar waren, da sie z.B. hinter einem Baum oder eingerückt von der Straße weg standen (Abbildung 4). Dies stellte sicher, dass die Ziele nicht mit sich-umschauen finden konnte, sondern dass man eine genauere Vorstellung von ihrer Position haben musste, um sie zu erreichen.



Abbildung 3: Grundriss der Versuchsumgebung



Abbildung 4: Große 3D-Zahlen markieren die Ziele

3.3 Versuchsablauf

Die Probanden wurden zufällig auf die Wach- und die Schlafgruppe verteilt. Auf ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis wurde geachtet. Die Wachgruppe absolvierte die 1. Sitzung morgens und die 2. Sitzung dann am Abend. Dementsprechend erfolgte bei den Personen der Schlafgruppe die 1. Sitzung am Abend und die 2. Sitzung am darauffolgenden Morgen. Zwischen erster und zweiter Sitzung waren jeweils 12 Stunden Zeit. Der genaue Versuchsablauf ist in Tabelle 1 dargestellt.

Table 1: Ablauf des Experimentes für Wach- und Schlafgruppe

	Wachgruppe	Schlafgruppe
1. Sitzung	<ul style="list-style-type: none"> - Einverständniserklärung - Aufgabeninstruktion - Fragebogen zur Schlafqualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Einverständniserklärung - Aufgabeninstruktion
12 Stunden Pause	Ohne Schlaf	Mit Schlaf
2. Sitzung	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgabeninstruktion - Stanford-Schläfrigkeitsskala - Zeichnen der Sketchmap 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufgabeninstruktion - Fragebogen zur Schlafqualität - Stanford-Schläfrigkeitsskala - Zeichnen der Sketchmap

Im Vorversuch wurde mit drei Personen (Studenten, m: 2, f: 1) getestet, ob das Navigationsexperiment so realisierbar war wie es bis dahin gestaltet war. Die Versuchsumgebung durfte weder zu groß noch zu klein sein. Weder durften die Aufgaben so schwer sein, dass sie kaum lösbar waren, noch durften sie zu einfach sein, weil dann die Leistungsverbesserung durch Lernen schwerer zu bestimmen ist. Zudem sollte die Aufenthaltsdauer in der virtuellen Umgebung zwischen 20 und 45 Minuten liegen, um Übelkeit, bedingt durch die Darstellungsform vorzubeugen. Es stellte sich heraus, dass der Schwierigkeitsgrad angemessen war. Auch die Dauer, die die Aufgaben in Anspruch nahmen, schien passend zu sein. Die Aufenthaltsdauer in der virtuellen Umgebung betrug in der ersten Sitzung durchschnittlich 30 Minuten und der zweiten Sitzung 30 – 40 Minuten, je nachdem, wie schnell man die Navigationsaufgaben löste. Beide Voraussetzungen zur Untersuchung des Einflusses von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis waren somit gegeben.

3.3.1 Sitzung 1

Zu Beginn der ersten Sitzung unterschrieben alle Probanden eine Einverständniserklärung und erhielten eine Probandeninformation. Diese sowie alle im Folgenden genannten Dokumente

stehen im Anhang. Die Wachgruppe füllte außerdem den Fragebogen zur Schlafqualität von Roman Görtelmeyer (SF-A-R) aus (Görtelmeyer, 1981). Anschließend bekamen sie eine schriftliche Aufgabeninstruktion und nach einer mündlichen Erläuterung der Steuerung mit dem X-Box-360-Controllers startete das Navigationsexperiment.

In der ersten Sitzung sollten die Probanden die verschiedenen Routen zu den 5 Zielen kennen lernen und sich einprägen (Abbildung 5). Die Sitzung kann dabei in zwei Phasen aufgeteilt werden: Im ersten Teil musste man vom Startpunkt aus einer roten Kugel zum Ziel 1 folgen (Abbildung 6). Der Teilnehmer musste sich dabei zur Kugel drehen, und auf Tastendruck (A-Knopf) schwebte die Kugel mit konstanter Geschwindigkeit zu Ziel 1, wartete aber auf den Spieler, wenn die Distanz mehr als 6 Meter betrug. Hatte die Person das erste Ziel erreicht, musste sie selbstständig wieder zum Ausgangspunkt zurückfinden. Diese Aufforderung erhielt sie mittels einer Texteinblendung. Wenn der Proband innerhalb von 5 Minuten das Ziel nicht alleine fand, wurde er dort hingeführt. Dies war möglich, da der Versuchsleiter die Position des Probanden ständig auf der Karte auf einem Monitor verfolgen konnte. Zurück am Start wurde eine Textmeldung eingeblendet welche den Teilnehmer aufforderte wieder der Kugel zu folgen. Danach wurde er von der Kugel zu Ziel 2 geführt und sollte dann wieder selbstständig zum Startpunkt zurückkehren usw., bis der Proband alle 5 Ziele angelaufen hatte und jeweils wieder selbstständig zum Startpunkt gefunden hatte. Die erste Navigationsaufgabe endete dann wieder am Startpunkt.

Der zweite Teil erfolgte sofort im Anschluss, ohne Absetzen des Oculus Rift. Während die Probanden in der ersten Phase zu den Zielen geführt und nur alleine zurückfinden mussten, sollten sie in der zweiten Phase die Ziele selbstständig finden und dann auch wieder jeweils zum Startpunkt zurückkehren. Die Versuchsteilnehmer starteten wieder am bekannten Ausgangspunkt und bekamen für mindestens 5 Sekunden ein Bild des nächsten Ziels zu sehen (Abbildung 4). Das Bild konnte per Knopfdruck ausgeblendet werden. Sobald der Proband das Ziel gefunden hatte, wurde er aufgefordert, wieder an den Startpunkt zu gehen. Auch hier wurden in derselben Reihenfolge, wie im ersten Teil die Ziele 1-5 abgelaufen. Bei jeder Aufgabe, in der die Person selbstständig zu einem Ziel finden musste, gab es ein Zeitlimit von 5 Minuten, nach der auch keine Daten mehr aufgenommen wurden. Wurde dieses Zeitlimit überschritten, führte man sie an das entsprechende Ziel. Dort lief das Experiment dann mit der nächsten Aufgabe weiter. So wurde sichergestellt, dass nicht zu lange nach Zielen gesucht

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

wurde und man so nicht zu viel Zeit in der virtuellen Realität verbrachte, um z.B. Übelkeit vorzubeugen sowie die Versuchsdauer zu kontrollieren.

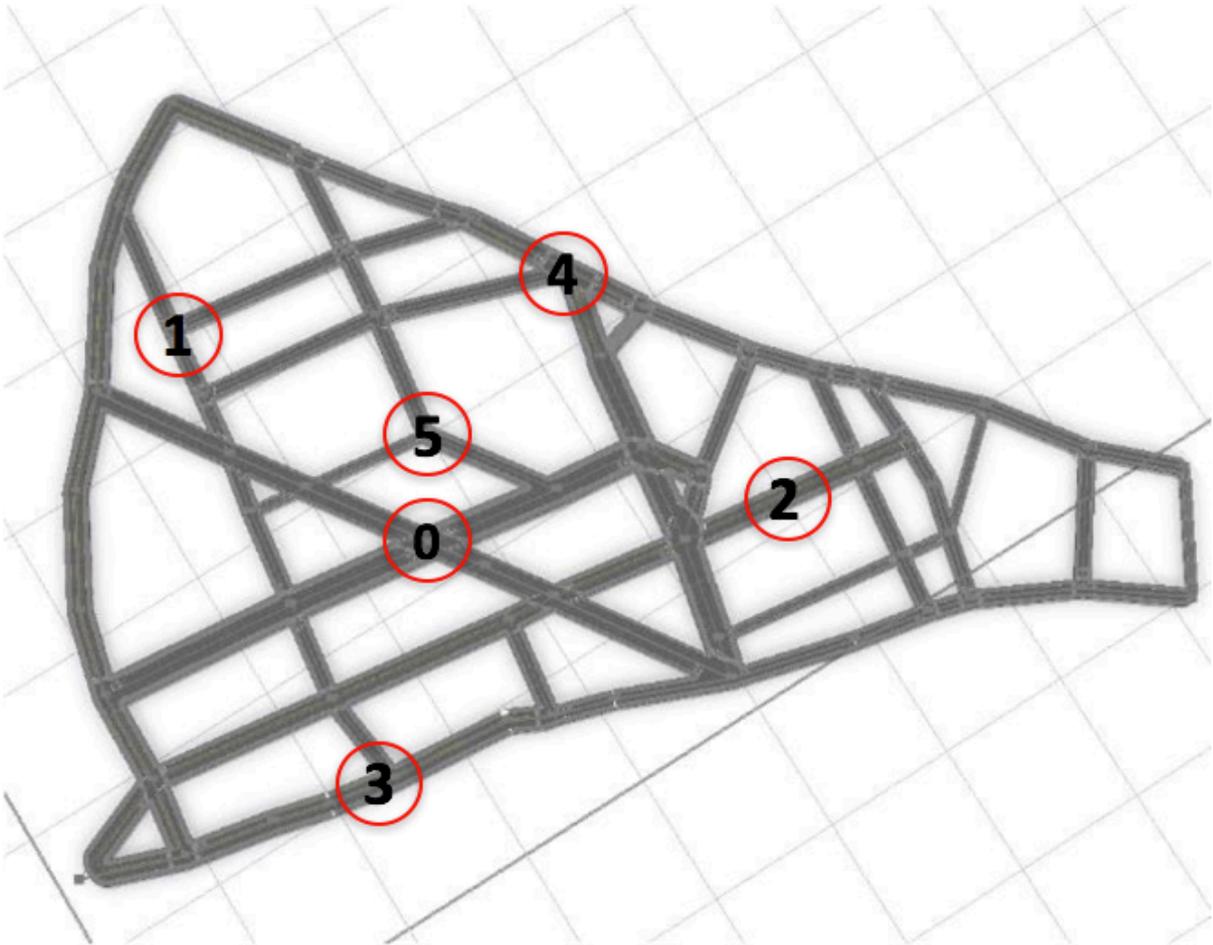


Abbildung 5: Karte mit allen 5 Zielen. 0 markiert den Startpunkt.



Abbildung 6: Perspektive der Versuchsperson, die dieser roten Kugel folgen soll.

3.3.2 Sitzung 2

Zu Beginn der zweiten Sitzung erhielten alle Probanden nochmals die schriftliche Aufgabeninstruktion. Danach sollte jeder die Stanford-Schläfrigkeitsskala ausfüllen und die Schlafgruppe zusätzlich den Fragebogen zur Schlafqualität. Dann startete das Navigationsexperiment.

Die Versuchspersonen starteten wieder am selben Ausgangspunkt wie in Sitzung 1 und hatten zu Beginn 5 Minuten Zeit zur freien Exploration. Dies sollte gewährleisten, dass die Probanden wieder mit der Steuerung und der virtuellen Realität vertraut waren. Nach dieser Explorationszeit wurden sie wieder zurück zum Start teleportiert und ein Bild des aktuellen Ziels eingeblendet (Abbildung 4). Dieses Bild musste für mindestens 5 Sekunden angeschaut werden, bevor es per A-Knopf weggedrückt werden konnte. Danach sollten die Versuchspersonen dieses Ziel auf dem kürzesten Weg finden. Hier konnte es vorkommen, dass sie dazu Wege laufen mussten, die sie in Sitzung 1 eventuell noch nicht gegangen waren. Es mussten also neue, noch unbekannte Abkürzungen gefunden werden. Dies sollte zeigen, ob ein Übersichtswissen der Umgebung angelegt wurde. Hatten sie das erste Ziel erreicht, wurde das nächste Ziel eingeblendet usw. Sie mussten also nicht wie in Sitzung 1 immer wieder zum Startpunkt zurückkehren. Die Reihenfolge in der die Ziele angelaufen werden mussten, war die folgende: 0 → 3 → 2 → 4 → 1 → 5 → 3 → 4 → 1 → 2 → 5 (Abbildung 7 & 8). Es wurde darauf geachtet, dass die Routenlänge während des Versuchs zunahm. Jedes Ziel wurde zwei Mal angelaufen, die Probanden mussten also 10 Routen finden. Nur die Route von Ziel 4 zu Ziel 1 kam hierbei doppelt vor und diente zur Aufrechterhaltung der Motivation der Probanden, da es für schwächere Teilnehmer ein Erfolgserlebnis war, wenn sie eine bereits bekannte Route laufen sollten, die sie schon einmal gelaufen waren.

Nach dem Versuch erhielten alle Probanden einen weiteren Fragebogen, indem sie zu ihrer Bewertung des Experiments und ihrer eigenen Leistung befragt wurden. Außerdem sollte jeder Teilnehmer eine Karte der virtuellen Stadt zu zeichnen (Anhang).

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis



Abbildung 7: Optimale Routen in der 2. Sitzung : $0 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 5$; (Für eine bessere Darstellung ist nur die erste Hälfte der Routen eingezeichnet).



Abbildung 8: Idealrouten der 2. Sitzung: $5 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5$; (Für eine bessere Darstellung ist nur die zweite Hälfte der Routen eingezeichnet).

3.4 Datenerhebung und –analyse

Die Daten wurden mit einer Frequenz von 2,5 Hz, d.h. alle 0,4 Sekunden, aufgezeichnet und in einem Logfile gespeichert. Dabei wurden die Versuchspersonennummer, die aktuelle Route, der aktueller Standort (in Form einer X- und Z-Koordinate) und die bis dato benötigte Zeit festgehalten.

Die Navigationsleistung wurde anhand den Parametern Strecke und Zeit beurteilt. Hierfür wurde jeweils das percentage above optimum (PAO) folgendermaßen ausgerechnet:

- Für die Strecke: $\frac{\text{zurückgelegte Strecke} - \text{ideale Strecke}}{\text{ideale Strecke}} * 100$ [%]
- Für die Zeit: $\frac{\text{benötigte Zeit} - \text{ideale Zeit}}{\text{ideale Zeit}} * 100$ [%]

Somit entsprach ein POA von 0% der idealen Zeit oder Strecke, und ein POA von z.B. 100% der doppelten Strecke oder Zeit. Für die Idealwerte wurde das Experiment einmal fehlerfrei durchlaufen und die Daten als Referenzwerte definiert. Während des Experimentes kam es allerdings vor, dass auch eine kürzere Strecke gelaufen oder weniger Zeit benötigt wurde. Dies kann z.B. durch Schneiden von Kurven vorgekommen sein. In diesem Fall wurde dann die neue kürzeste Zeit oder Strecke eines Probanden als Idealwert für alle verwendet.

Für die Auswertung der gezeichneten Karte wurden drei Kriterien festgelegt und jeweils ein Punkt für deren Erfüllung gegeben. Der Gesamt-Punktwert, im Folgenden Karten-Score genannt, umfasste:

- Stimmt die Anzahl der der eingezeichneten Ziele? Bei Fehlen eines Ziels wurden 0,2 Punkte abgezogen. Da es insgesamt 5 Ziele waren, konnte hier Maximalwert von 1,0 erzielt werden.
- Ist die Anordnung der Ziele korrekt? Bei falscher Anordnung gab es pro Ziel 0,2 Punkte Abzug. Auch hier konnte ein Maximalwert von 1,0 erzielt werden.
- Stimmen die Winkel und Anzahl der Abzweigungen der Straßen vom Start zu den Zielen grob? Hierbei wurde nicht exakt auf Winkelgröße geachtet sondern eher auf die ungefähre Himmelsrichtung der Abzweigung. Pro richtigen Straßenverlauf gab es 0,2 und so insgesamt 1,0 Punkte.

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

Im besten Fall konnte also ein Karten-Score von 3 und im schlechtesten Fall einer von 0 erreicht werden.

Über Fragebögen wurde außerdem die Schläfrigkeit mittels der Stanford-Schläfrigkeitsskala und die Schlafqualität in der vergangenen Nacht ermittelt, diese Daten waren subjektive Einschätzungen der Probanden (s. Anhang).

Die Datenanalyse wurde sowohl mit den Statistikprogrammen SPSS (Version 23) und Matlab (Version R2015b) als auch Excel 2016 durchgeführt.

4. Ergebnisse

Die Navigationsleistung, ermittelt anhand der zurückgelegten Strecke und der benötigten Zeit, wurde für jede Route einzeln berechnet und als Mittelwerte der Wach- und Schlafgruppe dargestellt (Tabelle 2). Eine Übersicht über alle erhobenen Daten der einzelnen Probanden befindet sich im Anhang.

Tabelle 2: PAO in % der Strecke der Wach- und der Schlafgruppe in beiden Sitzungen.

Sitzung	Route	Wachgruppe	Schlafgruppe
Sitzung 1	Route 1 hin	85,36	105,08
	Route 1 zurück	12,42	6,75
	Route 2 hin	248,49	370,95
	Route 2 zurück	24,55	6,89
	Route 3 hin	252,78	315,26
	Route 3 zurück	27,59	33,71
	Route 4 hin	189,06	290,42
	Route 4 zurück	18,87	17,57
	Route 5 hin	216,26	10,13
	Route 5 zurück	14,79	13,32
Sitzung 2	Route 1	183,46	234,01
	Route 2	151,59	100,00
	Route 3	59,75	48,72
	Route 4	34,62	27,61
	Route 5	80,30	56,03
	Route 6	59,35	68,12
	Route 7	120,58	31,82
	Route 8	41,48	15,17
	Route 9	40,75	37,69
	Route 10	68,00	22,26

Tabelle 3: PAO in % der Zeit der Wach- und der Schlaf-Gruppe in beiden Sitzungen.

Sitzung	Route	Wachgruppe	Schlafgruppe
Sitzung 1	Route 1 hin	140,24	167,40
	Route 1 zurück	19,64	15,44
	Route 2 hin	417,11	503,33
	Route 2 zurück	41,32	17,11
	Route 3 hin	337,43	373,50
	Route 3 zurück	39,79	42,99
	Route 4 hin	277,71	376,62
	Route 4 zurück	27,20	20,48
	Route 5 hin	327,63	15,45
	Route 5 zurück	21,57	16,30
Sitzung 2	Route 1	266,66	272,54

	Route 2	216,49	142,34
	Route 3	83,65	76,88
	Route 4	48,87	46,77
	Route 5	339,32	90,99
	Route 6	240,64	88,36
	Route 7	142,39	43,92
	Route 8	51,53	34,23
	Route 9	64,41	57,16
	Route 10	83,94	33,54

4.1 Einfluss von Schlaf auf die Navigationsleistung

Um den Einfluss von Schlaf auf die Navigationsleistung zu untersuchen, wurde eine 2x2 Anova durchgeführt. Faktoren waren hierbei die Sitzungsreihenfolge (Faktorstufe Sitzung 1 und Sitzung 2) und die Gruppenzugehörigkeit (Faktorstufe Schlafgruppe und Wachgruppe). Die Analyse ergab, dass der Faktor Sitzung einen Effekt auf die Navigationsleistung der Probanden hatte ($F = 12,386$; $p = 0,002$; $\eta^2 = 0,408$). Dies war aber nur bei der zurückgelegten Strecke der Fall, nicht aber bei der benötigten Zeit ($F = 2,985$; $p = 0,101$; $\eta^2 = 0,142$). Eine Interaktion der Faktoren Schlaf und Gruppe ließ sich nicht feststellen, weder für die gelaufene Strecke ($F = 0,65$; $p = 0,225$; $\eta^2 = 0,081$), noch für die benötigte Zeit ($F = 1,046$; $p = 0,235$; $\eta^2 = 0,077$).

Sowohl die Wach- als auch die Schlafgruppe zeigten in der 1. Sitzung einen höheren PAO der Strecke, was einem längeren zurückgelegten Weg und somit einer schlechteren Navigationsleistung entspricht. Der Unterschied in der Wach-Gruppe zwischen Sitzung 1 (Mittelwert: 109,02; SEM: 16,49) und Sitzung 2 (Mittelwert: 83,99; SEM: 21,63) ist dabei nicht signifikant ($p = 0,2101$). Der Unterschied in der Schlafgruppe zwischen Sitzung 1 (Mittelwert: 117,01; SEM: 19,00) und Sitzung 2 (Mittelwert: 64,14; SEM: 15,17) ist dagegen signifikant ($p = 0,0018$; Abbildung 9).

Der PAO der Zeit zeigte ähnliche Ergebnisse: Der PAO war in beiden Gruppen jeweils in der 1. Sitzung höher als in der 2. Sitzung. Der PAO der 1. Sitzung der Wachgruppe (Mittelwert: 164,96; SEM: 27,07) und der 2. Sitzung der Wachgruppe (Mittelwert: 153,79; SEM: 45,91) war dabei nicht signifikant unterschiedlich ($p = 0,7936$), während es bei der Schlafgruppe einen signifikanten Unterschied zwischen Sitzung 1 (Mittelwert: 154,86; SEM: 25,21) und Sitzung 2 (Mittelwert: 88,87; SEM: 16,01) für die benötigte Zeit gab ($p = 0,0035$; Abbildung 10).

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

Ein gruppenspezifischer Unterschied für die zurückgelegte Strecke wurde weder in Sitzung 1 ($p = 0,7810$) noch in Sitzung 2 ($p = 0,5048$) festgestellt. Dasselbe galt für die benötigte Zeit (Sitzung 1: $p = 0,7768$; Sitzung 2: $p = 0,2407$).

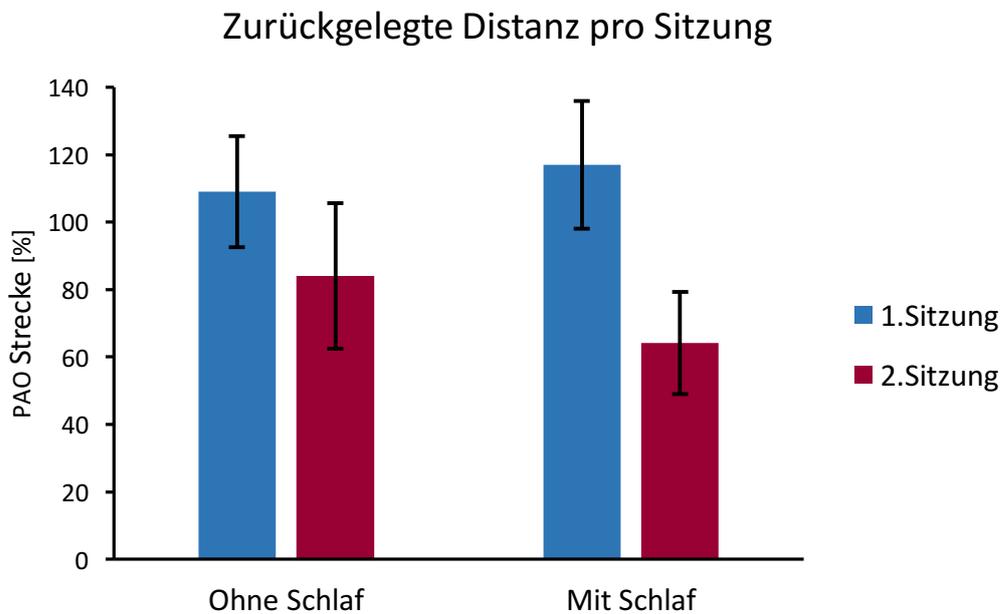


Abbildung 9: PAO der zurückgelegten Distanz in % der Wach- und der Schlaf-Gruppe in Sitzung 1 und Sitzung 2, mit Standardfehler.

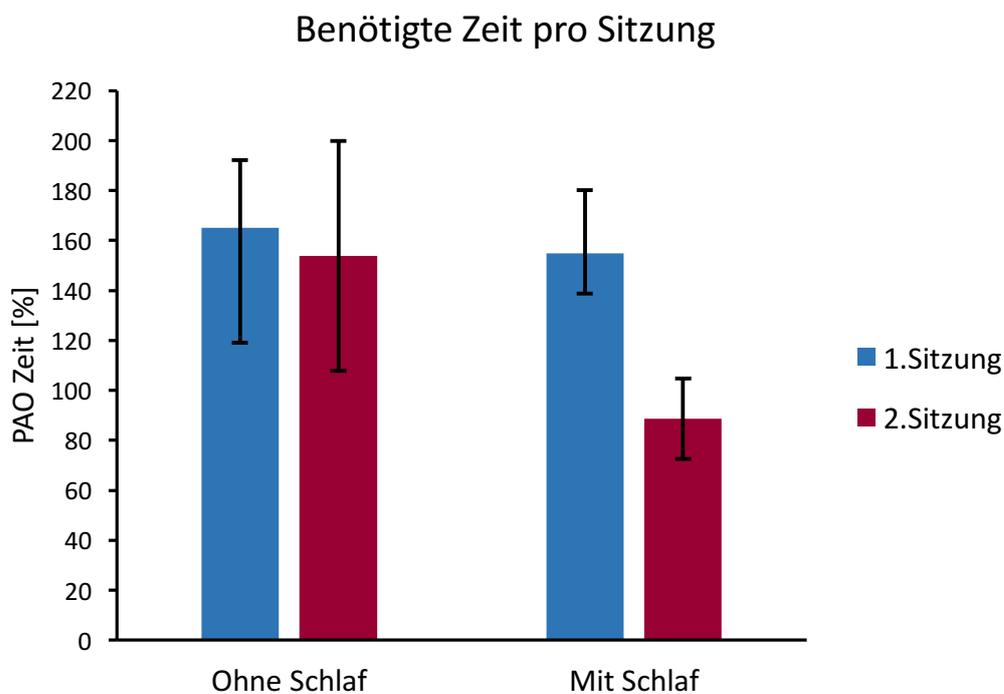


Abbildung 10: PAO der benötigten Zeit der Wach- und der Schlaf-Gruppe in Sitzung 1 und Sitzung 2, mit Standardfehler.

Eine signifikante, positive Korrelation wurde in Bezug auf den Unterschied der zurückgelegten Strecke zwischen Sitzung 1 und Sitzung 2 gefunden (Spearman-Korrelation: $r(18) = 0,734$; $p < 0,05$). Das bedeutet, dass alle Versuchspersonen, die in der ersten Sitzung gut in der Navigationsaufgabe waren, auch in der zweiten Sitzung gut waren, also weniger zusätzliche Strecke zurückgelegt hatten. Die Regressionsgerade der Schlaf-Gruppe lag dabei stets unter der der Wach-Gruppe: im Mittel haben die Probanden der Schlaf-Gruppe also eine kürzere Strecke zurückgelegt (Abbildung 11).

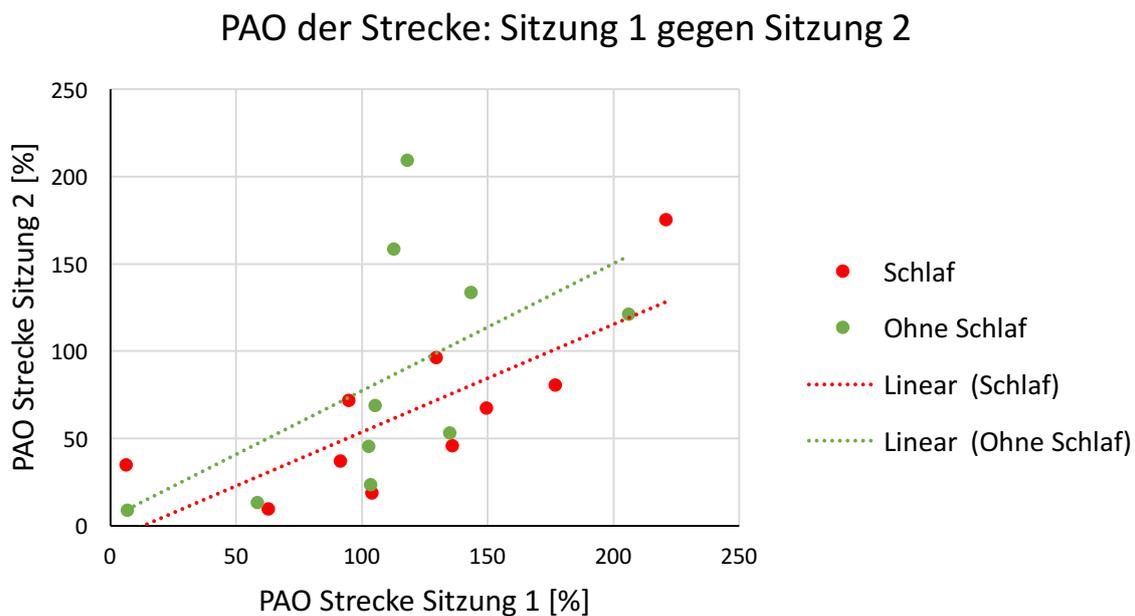


Abbildung 11: PAO der Strecke der ersten Sitzung gegen die zweite Sitzung in % inklusive Regressionsgeraden.

Vergleicht man die benötigte Zeit in der ersten Sitzung mit der in der zweiten Sitzung benötigten, erhält man ein vergleichbares Ergebnis. Auch hier ergab die Spearman-Korrelation eine signifikante positive Korrelation ($r(18) = 0,719$; $p < 0,05$). Wer also in der ersten Sitzung weniger Zeit für die Navigationsaufgabe benötigte, benötigte auch weniger Zeit in der zweiten Sitzung. Auch hierbei lag die Regressionsgerade der Schlaf-Gruppe stets unter der der Wach-Gruppe. Also benötigte die Schlaf-Gruppe im Mittel immer weniger Zeit (Abbildung 12).

In der ersten und zweiten Sitzung korrelierten die PAOs der Strecke und der Zeit stark miteinander, und zwar in beiden Gruppen. Wer also eine weitere Strecke zurücklegte, brauchte auch mehr Zeit dafür.

PAO der Zeit: Sitzung 1 gegen Sitzung 2

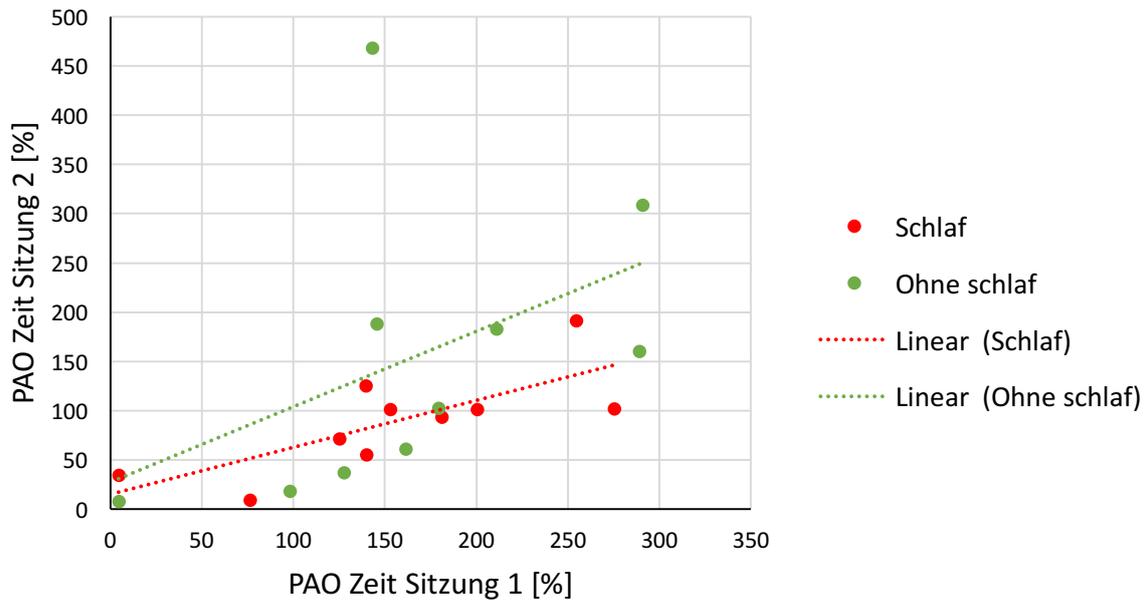


Abbildung 12: PAO der Zeit der ersten Sitzung gegen die zweite Sitzung in % inklusive Regressionsgeraden.

Abbildung 13 zeigt den gemittelten PAO der zurückgelegten Strecke aller 10 Routen der 2. Sitzung. Es werden sowohl Daten der Wach- als auch der Schlaf-Gruppe dargestellt. Die Schlaf-Gruppe hatte ausschließlich bei der ersten und der sechsten Route einen höheren PAO als die Wach-Gruppe, sonst lag er immer niedriger. Bei Route 1 lag der PAO mit ca. 200% insgesamt am höchsten von allen Routen. Das bedeutet, dass die Probanden bei dieser Route durchschnittlich doppelt soweit gelaufen sind, wie es ideal der Fall gewesen wäre. Route 8 war mit einem gemittelten Wert von ca. 28% die Route mit dem geringsten PAO der Strecke (Abbildung 13).

PAO der Strecke der 2. Sitzung

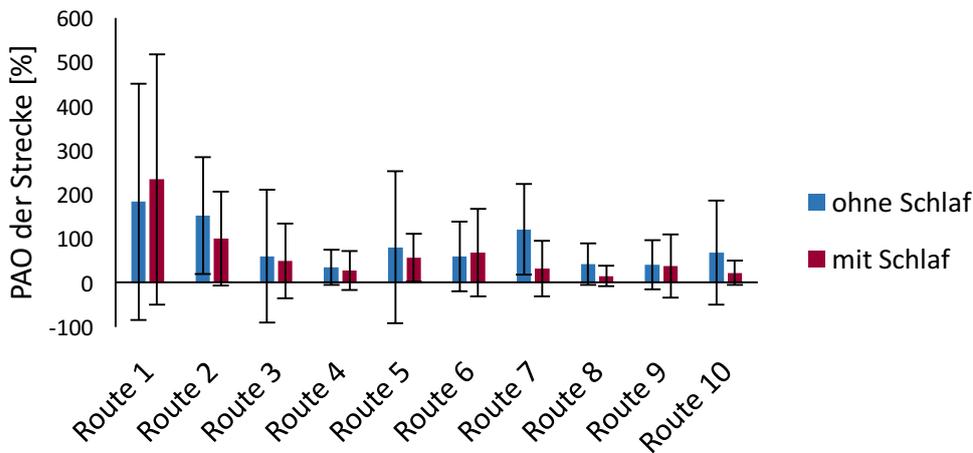


Abbildung 13: PAO der Strecke der 2. Sitzung in % für jede Route mit Standardabweichung.

Vergleicht man die Mittelwerte der einzelnen Routen der zweiten Sitzung in Bezug auf die Zeit, ist auch hier der PAO der Schlaf-Gruppe für den Großteil der Routen niedriger als der der Wach-Gruppe. Ausschließlich bei Route 1 war der PAO der Zeit minimal höher (ca. 10%). Mit einem durchschnittlichen PAO von ca. 43% wurde die Route 8 am schnellsten im Vergleich zur Ideal-Zeit absolviert. Route 1 war mit einem durchschnittlichen PAO von ca. 270%, die Strecke für die am meisten Zeit im Vergleich zu der Ideal-Zeit benötigt wurde (Abbildung 14).

PAO der Zeit der 2. Sitzung

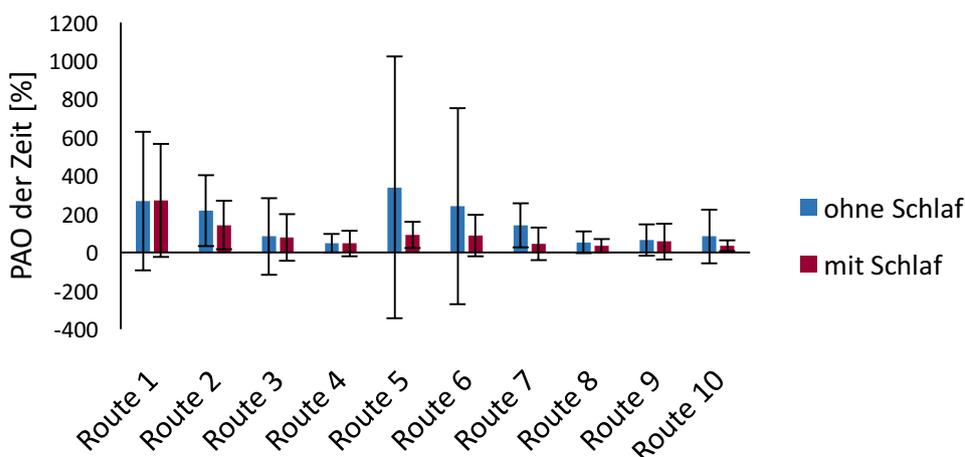


Abbildung 14: PAO der Zeit der 2. Sitzung in % für jede Route mit Standardabweichung.

4.2 Tageszeiteffekt

Da die Wach-Gruppe Sitzung 1 am Morgen und die Schlaf-Gruppe diese am Abend absolvierte und bei Sitzung 2 umgekehrt, musste ein Tageszeiteffekt ausgeschlossen werden. Dies wurde mittels eines t-Tests untersucht, welcher die Performanz (Strecke und Zeit) der Sitzungen am Abend und am Morgen verglich. Ein signifikanter Tageszeiteffekt wurde weder für die zurückgelegte Strecke noch für die benötigte Zeit gefunden:

Der PAO (percentage above optimum) der Strecke lag morgens etwas niedriger als abends (morgens: M:86,58, SD: 53,93; abends: M: 100,50, SD: 64,88). Der t-Test ergab jedoch, dass dieser Unterschied nicht signifikant war ($p = 0,465$).

Der POA der benötigten Zeit war ebenfalls morgens niedriger als abends (morgens: M: 126,82, SD: 78,84; abends: M: 154,33, SD: 113,99). Auch hier erwies sich der Unterschied zwischen den beiden Tageszeitpunkten als nicht signifikant ($p = 0,381$).

4.3 Gendereffekt

Ein möglicher Effekt des Geschlechts wurde mittels einer 2x2 Anova getestet (Faktor 1: Sitzung, Sitzung 1, Sitzung 2; Faktor 2: Geschlecht, männlich (m), weiblich (f)). Die Analyse zeigte, dass das Geschlecht keinen Einfluss auf die zurückgelegte Strecke in Sitzung 1 und Sitzung 2 hatte ($F = 4,001$; $p = 0,061$; $\eta^2 = 0,182$). Ähnliche Ergebnisse gab es auch in Bezug auf die benötigte Zeit, auch hier gab es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Geschlecht und Navigationsleistung ($F = 1,846$; $p = 0,191$; $\eta^2 = 0,093$).

Abbildung 15 zeigt den PAO der zurückgelegten Strecke der beiden Geschlechter der Wach- und der Schlafgruppe, aufgeteilt nach Sitzungsnummer. Die weiblichen Probanden benötigten in allen Sitzungen im Mittel mehr Zeit und legten eine größere Distanz zurück, signifikant wurde diese Differenz allerdings nicht (Abbildung 15).

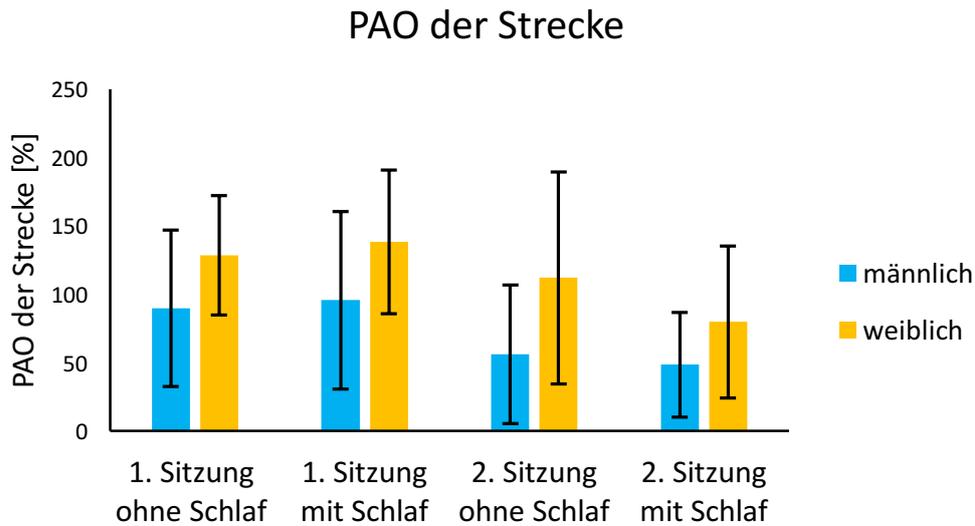


Abbildung 15: PAO der Strecke in % der 2 Sitzungen der Wach- und der Schlafgruppe, aufgeteilt nach Geschlecht, mit Standardabweichung.

Dieser Unterschied zeigt sich auch, wenn man die Ergebnisse des PAO der benötigten Zeit betrachtet. Auch hier lag der PAO der Frauen stets höher als bei den Männern, aber auch hier wurde dieser Unterschied nie signifikant (Abbildung 16).

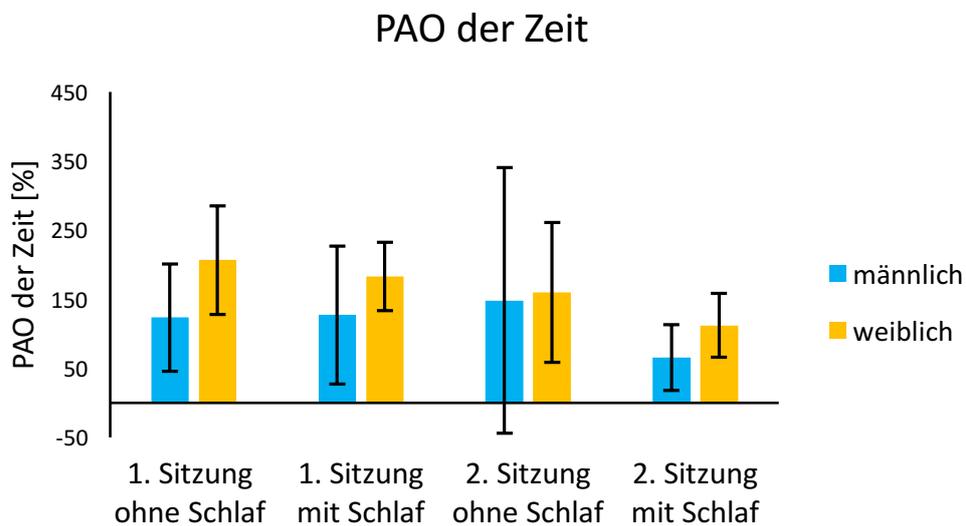


Abbildung 16: PAO der Strecke in % der 2 Sitzungen der Wach- und der Schlafgruppe, aufgeteilt nach Geschlecht, mit Standardabweichung.

4.4 Vigilanz & Schlafqualität

Die Vigilanz der Probanden während des Experiments wurde mittels der Stanford-Schläfrigkeitsskala erfasst und spiegelt somit die subjektiv eingeschätzte Wachheit wider. Diese Skala bietet 8 verschiedene Bewertungsstufen (von 1: „ich fühle mich aktiv, lebhaft, aufmerksam oder sehr wach“ bis 8: „ich schlafe“). Die Schläfrigkeit unterschied sich nicht signifikant zwischen Wach- (Mittelwert: 2,6) und Schlafgruppe (2,8) ($p = 0,6618$), was ungefähr einem Zustand entspannter Aufnahmefähigkeit entspricht. Es zeigte sich keine Korrelation zwischen Performanz im Experiment und der Schläfrigkeit der Probanden.

Die Schlafqualität der Probanden wurde ebenfalls subjektiv mittels eines Fragebogens erfasst (siehe Fragebogen zur Schlafqualität im Anhang). Dabei konnten maximal 28 Punkte erreicht werden. Die Wachgruppe gab hier einen Wert von 9,2 und die Schlafgruppe einen Wert von 12 im Mittel an. Da ein höherer Wert einer schlechteren Schlafqualität entspricht, war die Schlafqualität der Schlafgruppe dementsprechend geringer als die der Wachgruppe. Ein t-test ergab jedoch, dass dieser Unterschied jedoch nicht signifikant war ($p = 0,1546$). In Bezug auf den Zusammenhang zwischen Schlafqualität und Navigationsleistung konnte kein Effekt gefunden werden. Es zeigte sich keine Korrelation zwischen Schlafqualität und Navigationsleistung, weder in Bezug auf Strecke (Spearman-Korrelation: $p = 0,738$) noch auf Zeit (Spearman-Korrelation: $p = 0,687$).

Im Fragebogen zur Schlafqualität wurde ebenfalls die Schlafdauer abgefragt. Die Wachgruppe schlief vor der ersten Sitzung 6,5 Stunden im Mittel, während die Schlafgruppe zwischen erster und zweiter Sitzung durchschnittlich 6,7 Stunden schlief. Auch hier konnte keine Korrelation zwischen Schlafdauer und Navigationsleistung nachgewiesen werden.

Insgesamt korrelierte weder die Vigilanz noch die Schlafqualität oder Schlafdauer signifikant mit der Navigationsleistung im Experiment.

4.5 Sketch Maps

Um festzustellen, ob die Navigationsleistung mit der Qualität der angefertigten Sketch Maps korrelierte, wurden der PAO sowohl für die Zeit als auch für die Strecke der zweiten Sitzung und der Sketch Map Score mittels einer Spearman-Korrelation untersucht. Die Karten wurden in Bezug auf die Anzahl der Plätze, deren Anordnung und die Straßen dorthin bewertet. So

konnte maximal ein Score von 3 Punkten erzielt werden. Alle gezeichneten Karten mit zugehörigen Sketch Map Score befinden sich außerdem im Anhang.

Es zeigte sich, dass der Sketch Map Score und der PAO der Strecke der 2. Sitzung negativ miteinander korrelierten ($r(18) = -0,508$; $p = 0,022$): Probanden, die bessere Karten zeichneten, also einen höheren Sketch Map Score hatten, waren auch bei der Navigationsaufgabe besser, legten also weniger zusätzliche Strecke zurück. Dabei lag die Regressionsgerade der Schlafgruppe zum größten Teil unter der der Wachgruppe, schnitt sie jedoch im Bereich bei einem Sketch Map Score von ca. 2,5 und einem PAO der Strecke von ca. 60%. Die Probanden der Schlafgruppe zeichneten also größtenteils korrektere Karten und navigierten besser. Der Unterscheid zwischen beiden Gruppen wird jedoch geringer je exakter die Versuchspersonen navigierten und genauere Karten zeichneten. Über einem Sketch Map Score von 2,5 war die Schlafgruppe dann sogar durchschnittlich schlechter als die Wachgruppe. (Abbildung 17).

Korrelation zwischen Sketch Map Score und zurückgelegter Strecke

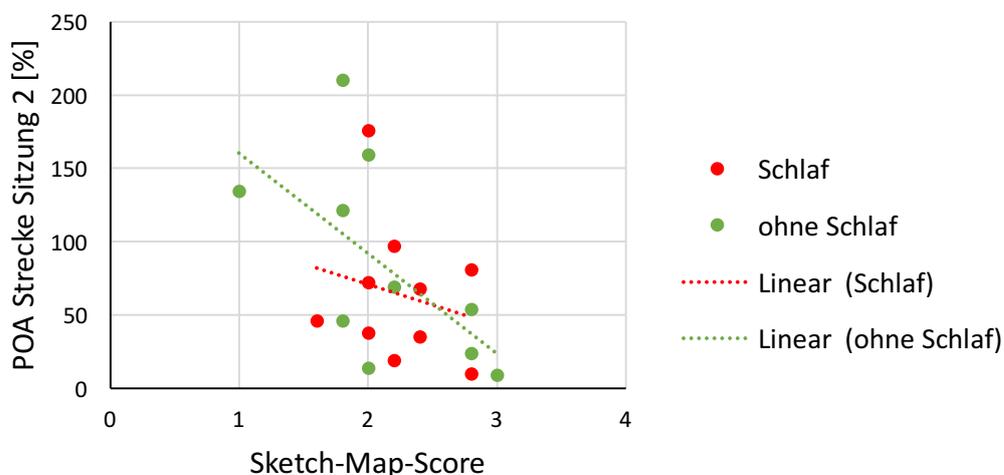


Abbildung 17: Sketch Map Score gegen PAO der Strecke der 2. Sitzung in % mit Regressionsgeraden.

Die Spearman-Korrelation der Zeit mit dem Sketch Map Score ergab ähnliche Ergebnisse. Auch hier gab es eine signifikante negative Korrelation ($r(18) = -0,582$; $p = 0,007$). Je besser die Karten gezeichnet wurden, desto schneller konnten die Probanden auch die Navigationsaufgabe bewältigen. Dies trifft sowohl für die Wach- als auch die Schlafgruppe zu, dabei liegt die Regressionsgerade der Schlafgruppe stets unter der der Wachgruppe, was

bedeutet, dass die Schlafgruppe im Mittel bessere Karten gezeichnet und schneller navigiert hat (Abbildung 18).

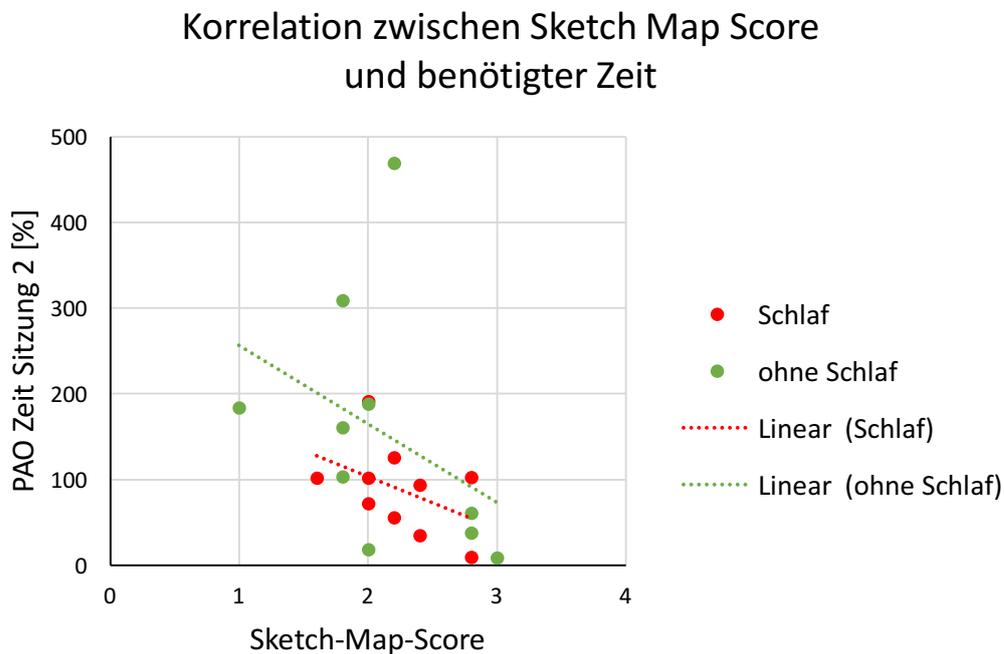


Abbildung 18: Sketch Map Score gegen den PAO der Zeit der 2. Sitzung in % mit Regressionsgeraden.

4.6 Abkürzungen

Auffällig war, dass Probanden in der zweiten Sitzung oft die Routen, die sie in der ersten Sitzung gelernt hatten, aneinandersetzten, um zu den Zielen zu gelangen. Sie wählten dabei den gelernten Weg vom aktuellen Standpunkt über den Startpunkt und von dort wieder den gelernten Weg aus Sitzung 1 zum neuen Ziel. Oftmals war dabei der Weg über den Start und dann zum neuen Ziel länger, als der kürzeste Weg, der direkt zum Ziel geführt hätte. Diese Versuchsteilnehmer konnten also keine neuen unbekanntenen Abkürzungen finden, sondern kombinierten die gelernten Strecken aus der ersten Sitzung. Dieses Phänomen konnte sowohl in der Wach- als auch in der Schlafgruppe beobachtet werden und trat bei 10 Versuchsteilnehmern auf (Abbildungen 19, 20, 21).

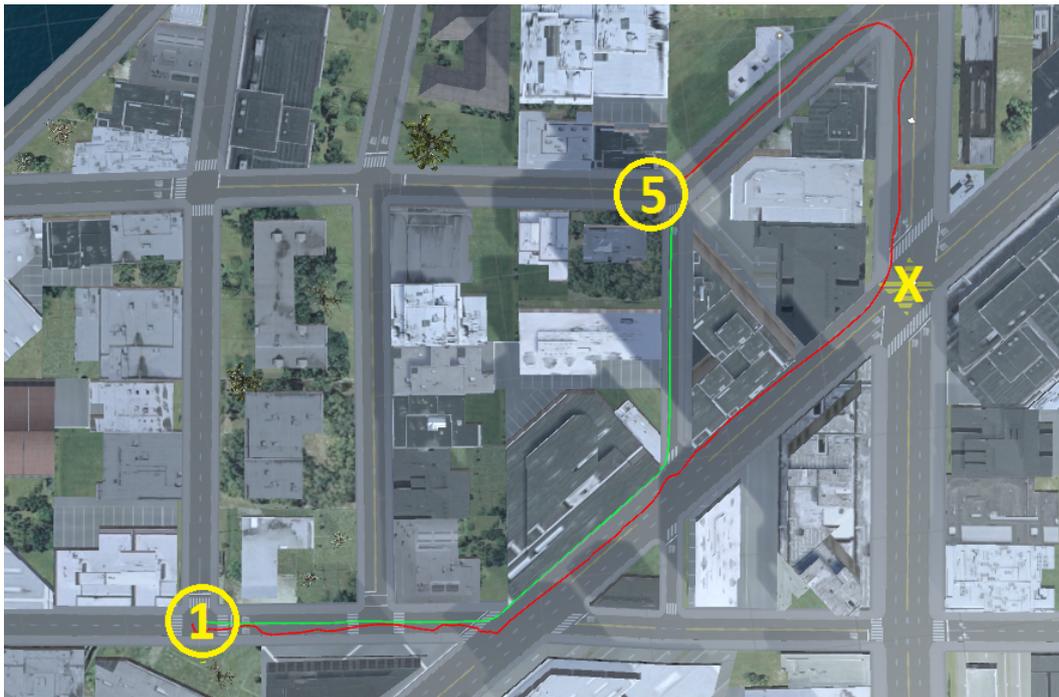


Abbildung 21: Routen von Ziel 1 nach Ziel 5; Rot: Route des Probanden über den Start (X) (Schlafgruppe); Grün: Idealroute.

4.7 Motivation, Schwierigkeit, Selbsteinschätzung und Erfahrung mit Computerspielen

Bei den nachfolgenden Fragen aus den Fragebögen konnten Werte zwischen 1 (sehr wenig) und 7 (sehr viel) angegeben werden. Der Spaßfaktor des Experimentes war mit 5,75 Punkten durchschnittlich gut, die Probanden waren also motiviert das Experiment durchzuführen. Die Schwierigkeit des Experimentes wurde mit 4,4 Punkten bewertet. Dieser Wert lag ungefähr in der Mitte. Das Experiment wurde also weder zu einfach noch zu schwer empfunden. Die Schlafgruppe hat sich selbst als etwas schlechtere Navigatoren beschrieben (3,5 Punkte) als die Wachgruppe (4,4 Punkte). Die Spearman-Korrelation ergab keine signifikanten Korrelationen des Spaßfaktors, der subjektiv empfundenen Schwierigkeit oder der Selbsteinschätzung als Navigator mit der Performanz im Versuch, weder in Sitzung 1, Sitzung 2 noch im Lernzuwachs von erster auf zweite Sitzung. Die Selbsteinschätzung bezogen auf die Leistung im Experiment korrelierte allerdings, und zwar sowohl mit der zurückgelegten Strecke ($p = 0,003$) als auch mit der benötigten Zeit ($p = 0,011$). Das heißt, dass die Probanden ihre Leistung im Mittel gut selbsteinschätzten. Bei der Zeit die mit Computerspielen verbracht wird konnten zwischen 0 (keine Zeit) und 3 (mehr als 5x die Woche) Punkte erreicht werden. Dabei gab es starke Unterschiede zwischen männlichen (2,8 Punkte) und weiblichen (0,7 Punkte) Probanden. Die mit Computerspielen verbrachte Zeit korrelierte jedoch nicht mit der der Navigationsleistung.

5. Diskussion

Mit diesem Experiment sollte untersucht werden, ob Schlaf einen Einfluss auf das deklarative Ortsgedächtnis hat. Dies wurde vermutet, da während des Schlafes bestimmte, während der eigentlichen Navigation aktive Gehirnareale im Hippocampus reaktiviert werden und dies vermutlich zur Konsolidierung von räumlichem Wissen beiträgt (Ferrara et. al., 2008). In dieser Studie mussten Probanden in einer virtuellen Umgebung in der ersten Sitzung Routen zu bestimmten Zielen lernen, während sie in der zweiten Sitzung, welche 12 Stunden später stattfand, diese Ziele in anderer Reihenfolge wiederfinden sollten. Dabei waren die Navigationsaufgaben so gewählt, dass die Versuchsteilnehmer in der zweiten Sitzung neue Abkürzungen finden sollten. Es gab eine Wach- und eine Schlafgruppe.

Diese Studie zeigt, dass Probanden nach einer Schlafperiode Navigationsaufgaben signifikant besser lösen konnten. Versuchsteilnehmer konnten nach einer Schlafphase die Navigationsaufgaben sowohl korrekter als auch schneller lösen als die Teilnehmer der Wachgruppe, sie zeigten also einen signifikanten Lerneffekt. Ein Einfluss von Schlaf auf die Navigationsleistung konnte jedoch nicht klar bewiesen werden, da kein Effekt durch eine ANOVA bestätigt werden konnte. Dies lässt sich einerseits durch die relativ große Standardabweichung der Daten erklären. Auch war die Stichprobengröße von 20 vermutlich zu gering. Andererseits gibt es sowohl bei der Navigations- als auch der Lernleistung große interindividuelle Unterschiede. So wäre es beispielsweise möglich, dass nur Personen, die gut im Navigieren sind, vom Schlaf profitieren können. Diese individuellen Unterschiede können von der vorliegenden Studie allerdings nicht aufgezeigt und erklärt werden. Obwohl kein Tageszeiteffekt nachweisbar war lässt sich dieser nicht vollkommen ausschließen, da die Gruppen unterschiedliche Aufgaben morgens und abends absolvierten. Es ist zum Beispiel auch möglich, dass der Lernzuwachs der Schlafgruppe noch größer gewesen wäre, wenn auch sie die erste Sitzung am Morgen und die zweite am Abend durchlaufen hätte und einen Mittagsschlaf gehalten hätte. Es könnte auch sein, dass der Lernzuwachs nur deshalb bei der Schlafgruppe größer war, weil man morgens fitter und wacher ist und dadurch besser lernt. Diese Vermutungen lässt sich daraus ableiten, dass Tageszeit und Phase des circadianen Rhythmus Einfluss auf die kognitive Leistung haben (Pomplun et al., 2012).

Nichtsdestotrotz gibt es einen signifikanten Unterschied bezüglich des Lernzuwachses von Sitzung 1 auf Sitzung 2 zwischen der Wach- und der Schlafgruppe. Dieser Unterschied lässt trotzdem stark vermuten, dass Schlaf doch einen förderlichen Einfluss auf die Verarbeitung von örtlichen Information haben kann.

In der zweiten Sitzung mussten neue Wege zwischen den Zielen gefunden werden. Um dies zu schaffen, musste eine Vorstellung vom allgemeinen Layout der Umgebung, sprich der Form und Position von Plätzen und dem Arrangement der Straßen, die sie verbinden, aufgebaut worden sein (Foo et al., 2006). Das Finden der neuen Abkürzungen ist dabei eins der deutlichsten Hinweise auf die Integration des Routenwissens in eine abstrahierte und generalisierte Version der Umgebung. Es gibt mehrere Erklärungen, warum dies nicht immer zu 100% der Fall war: Erstens war die Umgebung in der zweiten Sitzung nicht komplett neu für die Probanden. Es konnten auch schon in der ersten Sitzung oder in der Explorationsphase der zweiten Sitzung Routen gelaufen worden sein, die nicht den direkten Routen zu den 5 Zielen, die man sich einprägen sollte, entsprachen. Dadurch hätte man zufällig Abkürzungen zwischen den Zielen erkennen und sich einprägen können. Zweitens können Landmarken zum Navigieren benutzt worden sein, die schon von Weitem sichtbar gewesen waren, wie z.B. ein Hochhaus oder ein markanter Baum. Die Versuchsumgebung in diesem Experiment hatte einige dieser Landmarken. In den Fragebögen wurde oftmals ein markantes Hochhaus an Ziel 3 als Hilfsmittel zur Navigation genannt. Drittens waren manche Routen so einfach, dass sie eventuell schon mit Wegintegration bewältigt werden konnten (*metric shortcut behaviour*). Laut Foo wird eine metrische kognitive Karte aber nicht durch Wegintegration aufgebaut, sondern basiert auf sichtbaren Landmarken, da diese einfacher zu verrechnen seien (Foo et al., 2006). Da es viele unterschiedliche Navigationsstrategien und auch Mischformen gibt, ist es sehr schwierig zu beurteilen, welche Strategie benutzt wurde. So gibt es beispielsweise Personen, die die Nutzung eines Übersichtswissen allgemein gegenüber einer egozentrischen Rechts-Links Entscheidungsaneinanderreihung präferieren (Wolbers & Hegarty, 2010). Im Fragebogen antworteten die meisten so etwas wie: „Orientierung an Gebäude mit Uhr“ oder „an Hochhaus rechts“, was darauf schließen lässt, dass zumindest ein Teil der Navigation durch Landmarkenorientierung stattgefunden haben musste. So ließ sich auch beobachten, dass es Probanden gab, die in der zweiten Sitzung keine neuen Abkürzungen nahmen, sondern einfach gelernte Routen aus der ersten Sitzung aneinandersetzten. Dies lässt vermuten, dass diese Probanden keine kognitive Karte erstellt und so kein Überblickswissen über die

Umgebung hatten, sondern nur ein Routenwissen aufgebaut hatten. Es gab aber auch Probanden, die neue Abkürzungen fanden und somit Routen liefen, die sie zuvor noch nie betreten hatten. Dies hingegen lässt schließen, dass diese Personen eine kognitive Karte oder zumindest ein Überblickswissen der Umgebung aufgebaut hatten, in welchem Standorte von Landmarken und deren örtlichen Beziehungen zueinander mental repräsentiert sind. Bei einfacheren Navigationsaufgaben, wie z.B. beim Ablaufen einer gelernten Route, ist eine andere Art der mentalen Repräsentation sinnvoller. Zwar ist der Organismus dann weniger flexibel, da er nur die gelernten Routen kombinieren kann. Dafür benötigt er aber gleichzeitig weniger Aufwand für die Wahrnehmungsverarbeitung und aktive Kontrolle. Es gibt aber auch oft große interindividuelle Unterschiede in Auswahl und Verarbeitungstiefe der Informationen, die während der Navigation benutzt werden (O'Keefe & Nadel, 1978). Individuen unterscheiden sich z.B. darin, wie stark sie sich auf die eigene Route, ihre eigene Bewegung oder auf die Reihenfolge der Objekte, die sie begegnen, konzentrieren. Dabei haben die Anforderungen der verschiedenen Aufgaben auch anatomische Korrelate. So korreliert die Verwendung von entfernten Landmarken, um eine örtliche Repräsentation des Raumes aufzubauen -ähnlich einer Übersichtskarte-, mit einer großflächigen hippocampalen Aktivierung, während das z.B. bei dem Abzählen von Routen nicht der Fall ist (Iaria et al., 2003). Das einfache Nachlaufen von Routen wird vor allem vom Nucleus caudatus verarbeitet und gesteuert. Die daraus resultierende mentale Repräsentation der Routen ist eher unflexibel und lässt weniger Planung zu, da sie nur die Navigation auf den zuvor gelernten Routen ermöglicht. Der Nucleus caudatus ist ein paariges großes Kerngebiet im Telencephalon und ist bei Willkürbewegungen involviert (Grahn et al., 2008). Beim Aufbau einer kognitiven Karte ist hingegen der Hippocampus aktiv. Diese Art der Informationsrepräsentation ermöglicht einen flexibleren Zugriff auf das Wissen über das Layout der Umgebung und somit auch das Finden neuer Abkürzungen. Wenn nun beide mentalen Repräsentationsmöglichkeiten einer Person zur Verfügung stehen, muss sie eine geeignete Form wählen, eine zufällig ausführen oder eine Mischform beider verwenden, um die Navigationsaufgabe zu lösen. Wird dann bei einer Aufgabe, bei der neue, noch unbekannte Wege gefunden werden sollen, lediglich auf die gespeicherten Routen und nicht auf die kognitive Karte zurückgegriffen, so wird die Navigation nicht ganz optimal ausfallen, da die gelernten Routen nicht immer den kürzesten Wegen entsprechen. Dieser Fall konnte bei den Versuchsteilnehmern beobachtet werden, die in der zweiten Sitzung Routen aus der ersten

Sitzung aneinandersetzten und keine neuen Abkürzungen gingen, um zum Ziel zu gelangen. Sie gingen also einen Umweg und legten somit nicht die kürzestmögliche Strecke zurück. Genaueres würde sich allerdings nur mit einer nebenherlaufenden fMRT-Studie (Funktionelle Magnetresonanztomographie) während des Experimentes zeigen. Dabei werden mittels Detektion von Durchblutungsänderungen aktive Gehirnareale sichtbar gemacht (Hartley et al. 2003). So könnte geklärt werden, ob der Hippocampus oder der Nucleus caudatus während der Navigation aktiv ist, und so könnte ein Schluss auf die Navigationsstrategie gemacht und zwischen einfachen Routenablaufen und neuer Wegfindung unterschieden werden.

Insgesamt lässt sich sagen, dass Menschen auf so unterschiedliche Weise navigieren, dass in dieser Studie nicht festgestellt werden kann, ob der signifikante Unterschied beim Lernzuwachs von erster auf zweite Sitzung allein vom Schlaf abhängt. Es spielen dabei noch sehr viele andere Faktoren eine Rolle, z.B. wie gut eine Person allgemein im Navigieren ist, wie schnell sie lernt oder welche Navigationsstrategie sie verwendet.

Es ist zu erwähnen, dass die Zeit, die von den Versuchsteilnehmern benötigt wird, um von einem Ort zum anderen in der virtuellen Umgebung zu navigieren, durch die Genauigkeit der Route, die Geschwindigkeit und die Zeit, die er für seine Richtungsentscheidungen benötigt, beeinflusst wird. So ist es auch möglich, dass Probanden, die eine schlechtere kognitive Karte der Versuchsumgebung aufgebaut haben, dies durch schnelleres Navigieren kompensieren können. Andererseits könnte ein Versuchsteilnehmer mit einer besseren kognitiven Karte auch länger für die Navigation brauchen, da er sich beispielweise mehr Zeit bei den Richtungsentscheidungen und zur Feststellung der eigenen Position nimmt. Deshalb war es sinnvoll, ebenfalls die zurückgelegte Strecke als Parameter für die Beurteilung der Navigationsleistung zu verwenden. In dieser Studie wurde nicht beobachtet, dass Probanden, die ungenauer navigierten, also eine längere Strecke liefen, dies durch schnelles Navigieren ausglich. Vielmehr gab es eine positive Korrelation zwischen benötigter Zeit und gelaufener Distanz. Personen die also eine kürzere Strecke für eine Route zurückgelegt hatten, diese also korrekter abliefen, benötigten auch weniger Zeit dafür.

Es konnte schon mehrmals gezeigt werden, dass Schlaf die Zeit, die Probanden für eine Navigationsaufgabe benötigen, verkürzt, bzw. auf andere verkürzend wirkende Parameter Einfluss hat (Ferrara, 2008; Wamsley et al., 2010). Da die Zeit, die für Navigationsaufgaben benötigt wird, aber von Genauigkeit und Geschwindigkeit beeinflusst wird, kann nicht definitiv

gesagt werden, dass Schlaf die Genauigkeit der menschlichen Hippocampus-abhängigen räumlichen Karte verbessert. Es konnte auch festgestellt werden, dass die Navigationsleistung von Probanden nach dem Schlaf besser war, da sie akkurater navigieren konnten. Auch die vorliegende Studie belegt dieses Ergebnis, da nach dem Schlaf die Navigationsaufgaben mit einer niedrigeren zurückgelegten Distanz, also effizienter, bewältigt werden konnten. Dies lässt folgern, dass Schlaf das Wissen über das Layout der Umgebung verbessert. Dieser Vorgang soll Konsolidierungsprozesse von Hippocampus-abhängigen räumlichen Informationen beinhalten (Nguyen et al., 2013).

Betrachtet man die Navigationsleistungen in der ersten Sitzung bezogen auf die einzelnen Routen, so fällt auf, dass die erste Route eher schlecht ausfiel. Da die erste Route vom Start zum ersten Ziel nicht sehr schwer war und auch der ersten Route aus Sitzung 1 entspricht - es musste also keine neue Abkürzung gefunden werden -, wird es wohl eher darauf zurückzuführen sein, dass mit jeder Route die Vertrautheit mit der Umgebung und der Steuerung steigt, was die Bewegung in der virtuellen Welt erleichtert und man so leichter navigieren kann. Diesem Phänomen sollte eigentlich die Explorationszeit von 5 Minuten zu Beginn der zweiten Sitzung entgegenwirken.

Obwohl kein Gendereffekt nachweisbar war, lassen die Ergebnisse vermuten, dass das Geschlecht doch einen Effekt haben könnte. Die weiblichen Versuchsteilnehmer benötigten im Durchschnitt immer mehr Zeit und auch eine längere Distanz für eine Strecke. Dies kann damit erklärbar sein, dass die männlichen Teilnehmer häufiger und länger in virtuellen Umgebungen in Computerspielen zu tun hatten als die weiblichen. Diese Ergebnisse decken sich mit denen, die in der Literatur zu finden sind. In einem Navigationsexperiment in einem virtuellen Labyrinth von Grön et al. (2000) schnitten Frauen ebenfalls insgesamt schlechter ab als Männer. Männer wiesen interessanterweise eine stärkere Aktivierung des linken Hippocampus während des Experimentes auf als Frauen. Dieser geschlechtsspezifische physiologische Unterschied muss allerdings nicht daraufhin deuten, dass Frauen allgemein schlechter navigieren als Männer, sondern könnte lediglich daraufhin weisen, dass die Geschlechter auch unterschiedliche Navigationsstrategien in diesem Experiment hatten. Dies soll aber hier nicht weiter vertieft werden (Grön et al. 2000).

Die Korrelation der Sketch Map Scores und der Navigationsleistung zeigt, dass Probanden, die eine genauere Karte der Umgebung zeichnen konnten, auch besser die Ziele gefunden haben.

Das lässt sich dadurch erklären, dass sie eine kognitive Karte oder zumindest ein Überblickswissen der Umgebung aufgebaut haben und so die Position der Ziele oder Landmarken und deren Beziehung untereinander bekannt waren. Mithilfe dieses Wissens konnten die Ziele schneller und auf einem kürzeren Weg gefunden werden. Das Skizzieren einer Karte nach dem Experiment eignet sich in diesem Fall also gut, um festzustellen, ob die Versuchsteilnehmer eine mentale Repräsentation der Versuchsumgebung angefertigt haben.

6. Ausblick

Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass Probanden nach einer Schlafphase einen größeren Lerneffekt bezüglich der Navigationsaufgabe zeigten als Probanden, die keine Schlafphase durchlaufen hatten. Dieses Ergebnis betrifft sowohl die Genauigkeit als auch die Schnelligkeit, mit der navigiert wurde. Ein Beleg für eine klare Förderung der Bildung einer kognitiven Karte durch Schlaf wurde in dem Experiment jedoch nicht gefunden. Außerdem belegen die Ergebnisse die Aussagekraft der nach dem Experiment angefertigten Kartenskizzen zur Überprüfung des aufgebauten räumlichen Wissens.

Da der signifikante Unterschied der Wach- und der Schlafgruppe bezüglich des Lernzuwachses doch auf einen förderlichen Effekt von Schlaf auf die Bildung einer kognitiven Karte hindeuten könnte, ließen sich hier noch neue Experimente gestalten. Dabei wäre es allerdings besser, eine größere Stichprobengröße als wie in diesem Fall von 20 zu haben, um eine exaktere Aussage über den Effekt von Schlaf zu machen. Diese Probanden könnten zuvor noch in Bezug auf ihre Navigationsstrategie und -leistung beurteilt werden z.B. mit der Santa Barbara Sense of Direction Skala (SBSOD) (Hegarty et al., 2002). Zusätzlich wäre es sinnvoll, dass sowohl die Wach- als auch die Schlafgruppe die ersten Sitzung am Morgen absolvieren und die Schlafgruppe dann mittags schlafen muss. Dies könnte einen Einfluss der Tageszeit und des circadianen Rhythmus ausschließen. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass sich die Probanden im Trainingsteil ausschließlich auf den vorgegebenen Routen bewegen, damit so ausgeschlossen werden kann, dass ein Teil der Versuchsteilnehmer bereits eine neue Abkürzung, die in der zweiten Sitzung abgefragt wird, schon einmal betreten hat.

7. Anhang

7.1 Tabellen aller PAOs (Percentage Above Optimum)

Tabelle 4: PAO der zurückgelegten Strecke der Wachgruppe in beiden Sitzungen.

Sitzung	Route	5	6	7	8	10	11	16	18	19	20
Sitzung 1	Route 1 hin	122,12	249,45	115,01	84,15	0,69	1,63	269,83	0,45	8,36	1,95
	Route 1 zurück	0	34,92	13,51	10,44	37,37	6,07	14,87	1,49	4,66	0,84
	Route 2 hin	169,65	27,70	357,26	397,91	382,99	1,60	1,94	321,45	326,35	498,07
	Route 2 zurück	53,21	14,44	9,88	13,72	11,49	5,55	6,73	2,55	119,74	8,20
	Route 3 hin	505,85	3,54	9,56	756,80	33,57	7,09	622,08	7,67	574,44	7,24
	Route 3 zurück	145,16	1,35	0,33	11,33	6,59	10,44	78,29	0	18,90	3,49
	Route 4 hin	5,66	470,59	7,46	2,99	522,08	5,44	7,49	244,85	401,50	222,55
	Route 4 zurück	3,54	8,33	54,16	51,98	24,27	6,91	5,07	5,07	21,63	7,70
	Route 5 hin	12,48	615,34	7,58	3,01	7,4	10,24	13,44	584,04	557,49	351,62
	Route 5 zurück	7,53	7,06	7,47	15,65	24,77	11,73	12,75	9,90	26,40	24,64
Sitzung 2	Route 1	8,85	10,43	13,85	1,04	5,43	9,88	85,82	493,83	568,61	636,89
	Route 2	186,99	258,01	6,49	337,36	316,64	6,09	29,13	249,40	44,30	81,53
	Route 3	5,35	488,77	18,48	10,045	20,12	6,18	11,47	7,14	18,14	11,82
	Route 4	94,57	80,96	3,24	7,06	14,56	7,12	11,19	13,14	15,91	98,49
	Route 5	13,30	20,71	18,85	2,72	7,11	6,30	12,53	561,39	117,81	42,25
	Route 6	30,80	280,45	40,62	32,67	31,83	11,39	40,50	40,33	52,08	32,86
	Route 7	13,96	102,20	11,61	133,28	256,59	18,20	9,54	211,27	229,86	219,27
	Route 8	94,89	8,84	2,56	2,67	3,25	6,60	8,35	78,13	110,02	99,50

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

	Route 9	1,60	77,41	8,12	4,88	29,25	6,45	17,60	186,38	32,22	43,63
	Route 10	8,91	13,37	13,31	4,79	8,13	12,97	12,52	257,31	25,51	323,20

Tabelle 5: PAO der zurückgelegten Strecke der Schlafgruppe in beiden Sitzungen.

Sitzung	Route	1	2	3	4	9	12	13	14	15	17
Sitzung 1	Route 1 hin	0,58	1,75	3,76	1,13	0,02	336,19	1,83	343,13	358,58	3,86
	Route 1 zurück	3,06	3,46	13,45	13,58	1,93	10,50	3,40	8,28	2,41	7,43
	Route 2 hin	3,17	536,46	496,82	409,58	506,99	584,00	3,86	430,77	300,97	436,92
	Route 2 zurück	1,96	0,62	17,68	10,73	7,78	8,09	5,29	4,30	7,07	5,35
	Route 3 hin	4,48	420,62	277,58	441,49	106,42	594,10	7,38	411,91	781,01	107,64
	Route 3 zurück	7,84	32,57	160,65	3,49	25,89	78,76	6,13	10,72	7,46	3,58
	Route 4 hin	536,83	20,16	220,95	445,03	239,45	576,68	3,45	523,88	3,47	334,25
	Route 4 zurück	55,59	4,34	66,33	5,05	4,94	2,55	6,28	4,79	6,16	19,65
	Route 5 hin	3,43	6,18	19,57	8,51	6,70	7,79	13,03	10,33	15,43	10,31
	Route 5 zurück	9,84	11,66	16,77	18,10	13,37	7,78	10,75	17,48	10,30	17,14
Sitzung 2	Route 1	3,27	44,66	703,46	69,54	4,93	765,57	104,59	358,76	183,83	101,46
	Route 2	37,37	40,68	119,46	34,52	2,46	288,92	122,25	284,69	13,81	55,85
	Route 3	1,98	7,91	17,74	18,68	270,94	114,88	19,09	14,59	6,99	14,41
	Route 4	7,51	8,36	11,40	123,50	7,44	3,31	5,38	9,28	95,43	4,45
	Route 5	8,54	15,86	27,48	14,86	43,35	119,17	4,50	81,64	78,41	166,51
	Route 6	14,11	27,43	33,63	65,45	28,20	343,08	50,82	19,71	21,04	77,74
	Route 7	5,45	19,43	15,92	10,97	4,07	13,49	15,96	13,35	9,87	209,71
	Route 8	3,54	7,44	10,15	10,00	5,93	10,25	8,30	8,00	6,20	81,88
	Route 9	10,56	6,78	10,31	100,40	1,28	4,29	7,73	7,03	223,00	5,54
	Route 10	7,10	12,39	17,89	12,73	7,08	94,98	14,56	12,98	38,63	4,27

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

Table 6: PAO der benötigten Zeit der Wachgruppe in beiden Sitzungen.

Sitzung	Route	5	6	7	8	10	11	16	18	19	20
Sitzung 1	Route 1 hin	253,56	380,02	155,14	138,43	29,30	0,88	357,79	14,48	39,40	33,41
	Route 1 zurück	9,873	42,89	12,00	23,16	48,26	0	11,20	28,64	15,88	4,46
	Route 2 hin	338,70	102,51	653,41	565,17	653,41	0	0,94	653,41	550,08	653,41
	Route 2 zurück	93,77	31,76	21,43	21,67	7,5	0	14,17	41,59	168,60	12,62
	Route 3 hin	801,53	30,09	23,79	801,53	33,12	1,66	726,39	144,76	801,53	9,90
	Route 3 zurück	193,74	9,47	1,29	10,96	0	11,81	90,03	42,64	36,86	1,11
	Route 4 hin	19,99	636,33	19,49	2,12	586,66	3,47	19,70	636,33	575,68	277,34
	Route 4 zurück	10,81	10,99	67,54	44,26	41,92	5,70	8,41	32,14	41,51	8,70
	Route 5 hin	42,09	855,44	8,09	0	8,20	7,50	29,81	1255,57	640,66	428,94
	Route 5 zurück	29,48	7,47	17,40	4,69	21,24	16,0	18,02	57,42	19,67	24,29
Sitzung 2	Route 1	75,76	30,44	24,66	0	32,04	20,02	118,65	788,35	788,35	788,35
	Route 2	390,22	390,22	10,58	390,22	390,22	0,92	42,93	390,22	60,49	98,90
	Route 3	28,73	653,04	16,02	17,80	20,61	3,03	18,24	21,66	22,32	35,07
	Route 4	127,35	117,16	2,57	9,34	23,43	6,66	23,09	44,02	33,47	101,61
	Route 5	91,97	83,29	26,42	0,26	2179,28	5,88	32,93	745,92	142,39	84,91
	Route 6	80,88	305,81	42,02	32,21	1680,34	10,28	60,78	87,07	72,59	34,43
	Route 7	42,61	117,15	17,59	143,22	281,14	12,30	28,53	281,14	281,14	219,05
	Route 8	123,87	18,89	3,95	2,85	4,05	6,37	12,79	118,93	120,66	102,95
	Route 9	34,39	96,37	21,05	6,36	69,68	5,89	21,83	279,32	59,27	49,97
	Route 10	31,70	22,86	17,50	7,53	6,89	12,26	14,47	332,20	26,46	367,49

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

Table 7: PAO der benötigten Zeit der Schlafgruppe in beiden Sitzungen.

Sitzung	Route	1	2	3	4	9	12	13	14	15	17
Sitzung1	Route 1 hin	1,88	36,81	19,43	20,05	18,69	517,07	0	529,04	487,06	43,97
	Route 1 zurück	10,10	3,79	26,90	68,53	12,92	9,65	1,08	7,10	4,85	9,51
	Route 2 hin	1,94	801,54	547,20	653,41	653,41	653,4	3,21	653,41	412,32	653,41
	Route 2 zurück	3,07	4,62	16,51	30,12	10,77	5,20	5,22	55,30	24,12	16,13
	Route 3 hin	0	457,05	320,23	487,74	119,55	600,49	1,99	801,53	801,53	144,91
	Route 3 zurück	1,29	28,76	148,81	48,22	57,48	99,22	6,96	18,19	5,38	15,59
	Route 4 hin	684,95	34,95	220,03	636,33	332,40	636,33	0,92	636,32	2,93	581,01
	Route 4 zurück	58,22	1,92	63,75	15,06	10,55	1,87	6,87	0	4,55	41,99
	Route 5 hin	1,96	20,56	18,66	7,00	14,13	14,71	10,23	19,68	37,87	9,70
	Route 5 zurück	0	8,64	12,47	35,79	21,57	5,38	8,71	29,65	29,54	11,25
Sitzung 2	Route 1	1,50	140,30	788,35	121,26	8,56	788,35	104,23	406,80	224,63	141,38
	Route 2	44,41	77,16	148,26	78,80	51,23	358,19	129,60	390,22	63,07	82,50
	Route 3	1,66	35,64	49,04	63,45	411,39	110,67	13,42	24,15	6,28	53,07
	Route 4	7,38	25,90	39,28	210,32	41,19	6,45	4,19	12,78	109,43	10,78
	Route 5	4,29	80,36	46,50	108,37	86,58	141,32	2,00	94,55	113,78	232,15
	Route 6	11,88	63,93	63,16	99,02	33,35	384,68	49,12	23,00	60,57	87,86
	Route 7	0	32,81	26,02	32,45	4,80	13,37	12,82	22,28	13,51	281,14
	Route 8	3,58	28,97	32,81	83,29	40,53	10,84	7,91	14,97	8,75	110,66
	Route 9	10,03	30,71	23,65	174,38	16,51	4,14	11,32	10,54	279,32	10,98
	Route 10	6,40	40,18	40,49	41,67	22,75	95,61	13,44	13,91	55,40	5,58

7.2 Sketch Maps

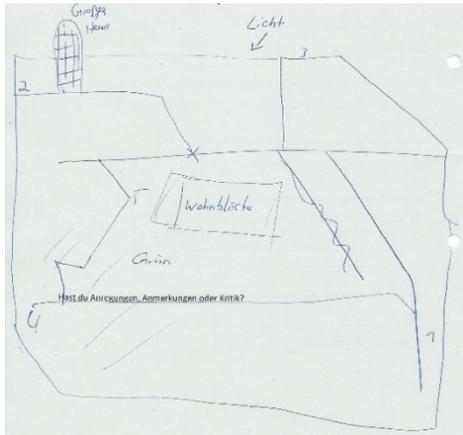


Abbildung 22: Wach-Gruppe; Sketch Map Score: 2,8

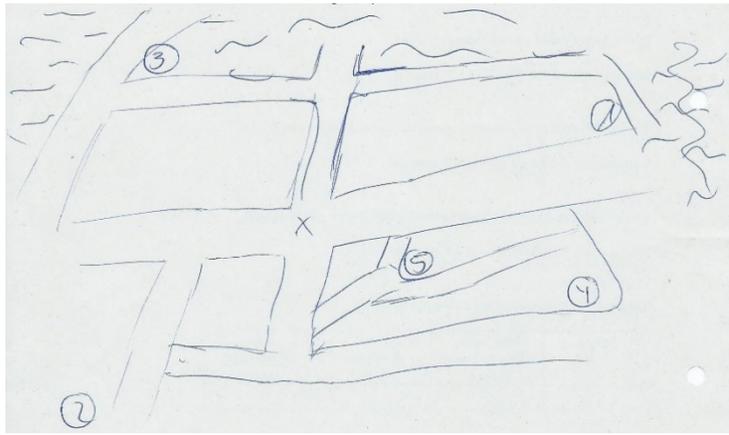


Abbildung 23: Wach-Gruppe; Sketch Map Score: 2,8

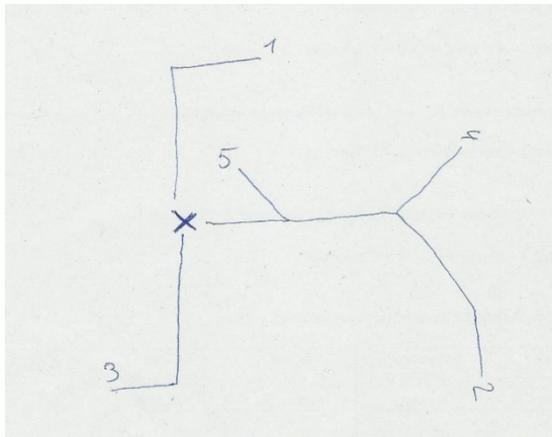


Abbildung 24: Schlaf-Gruppe; Sketch Map Score: 2

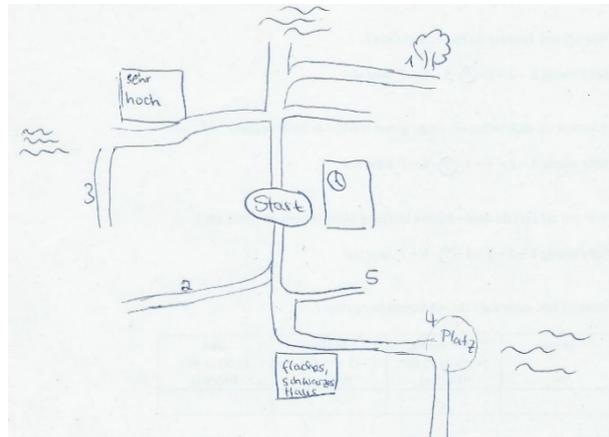


Abbildung 25: Wach-Gruppe; Sketch Map Score: 1,8

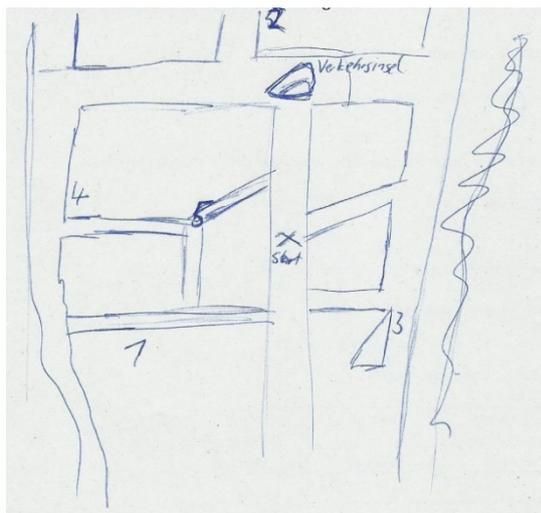


Abbildung 26: Wachgruppe; Sketch Map Score: 2,2

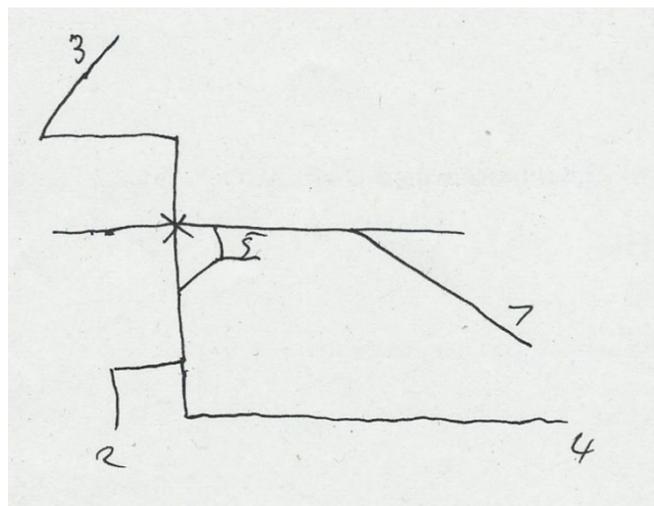


Abbildung 27: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,4

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

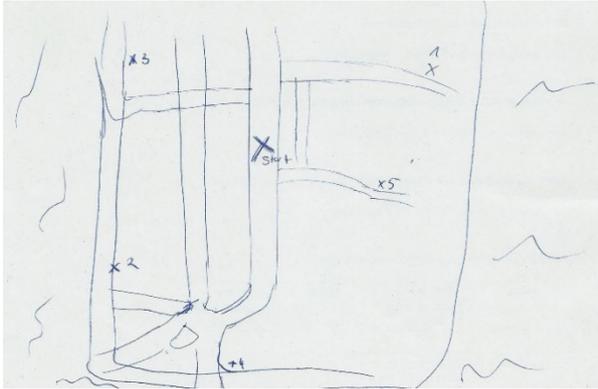


Abbildung 28: Wachgruppe; Sketch Map Score: 2

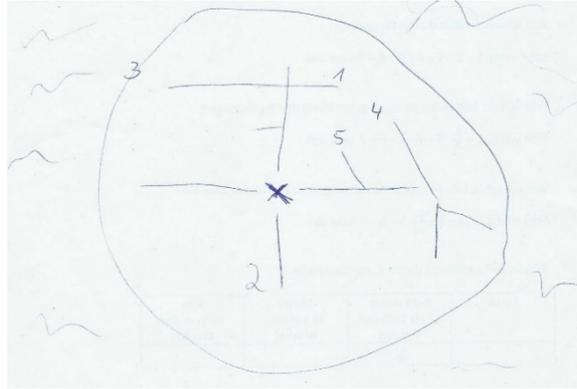


Abbildung 29: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 1,6

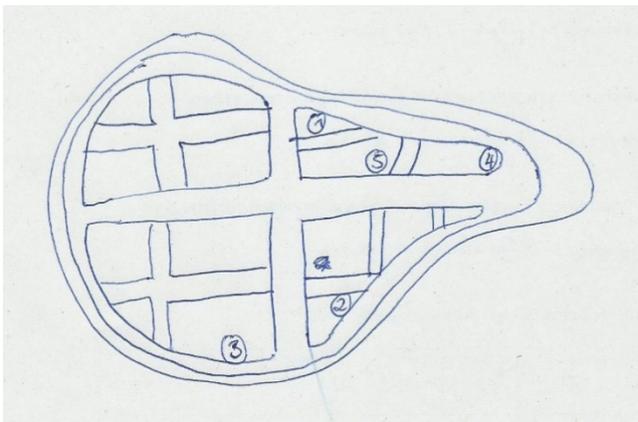


Abbildung 30: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2

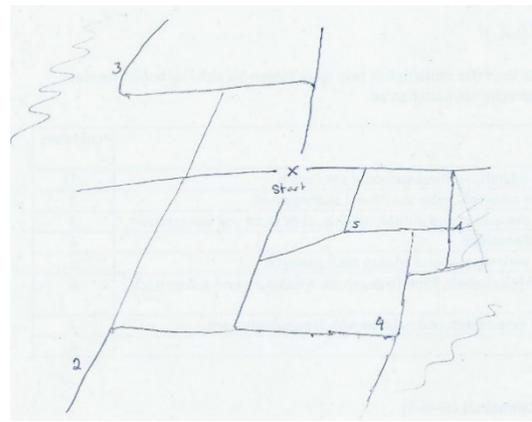


Abbildung 31: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,8

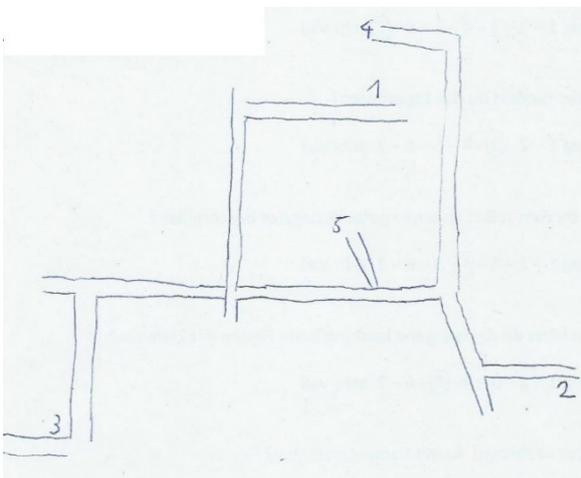


Abbildung 32: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,2

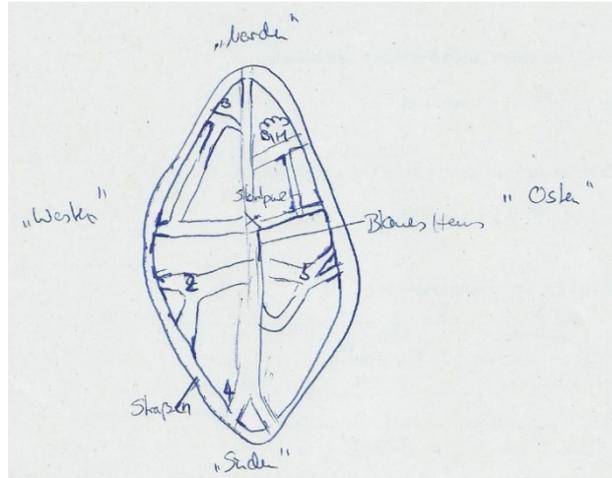


Abbildung 33: Wachgruppe; Sketch Map Score: 1,8

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

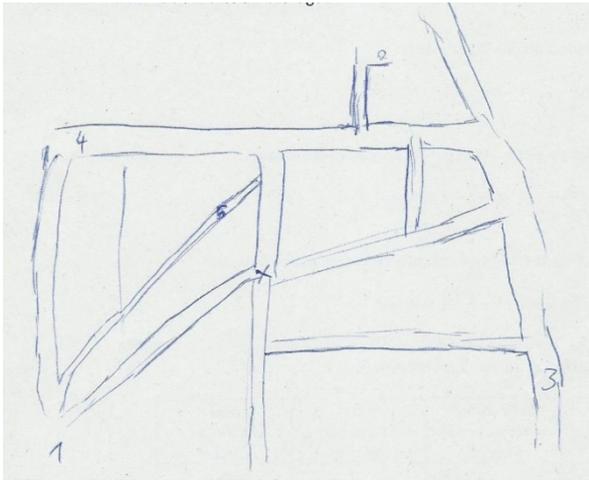


Abbildung 34: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,8

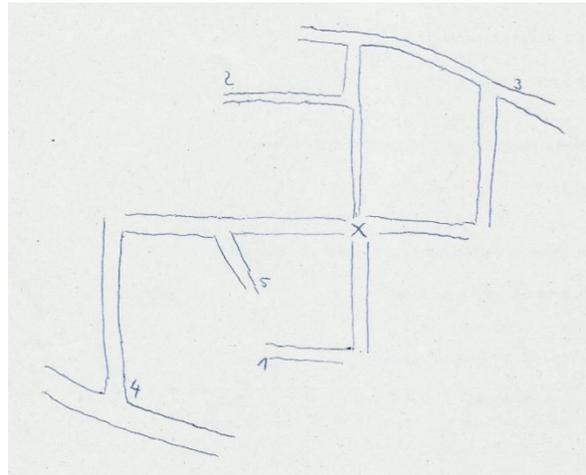


Abbildung 35: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,8

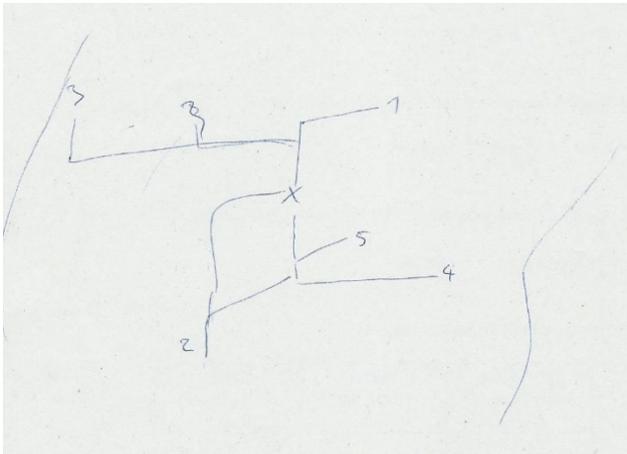


Abbildung 36: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,4

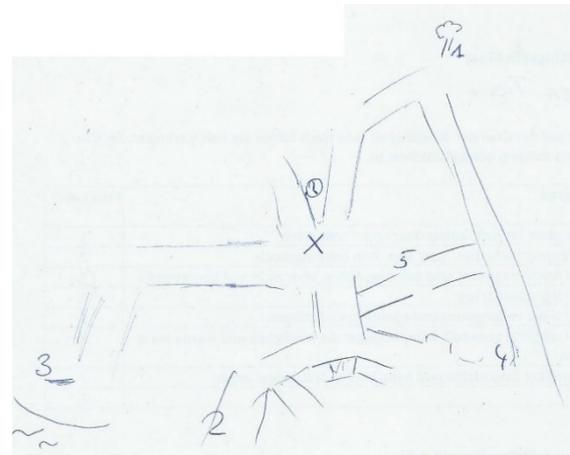


Abbildung 37: Schlafgruppe; Sketch Map Score: 2,2

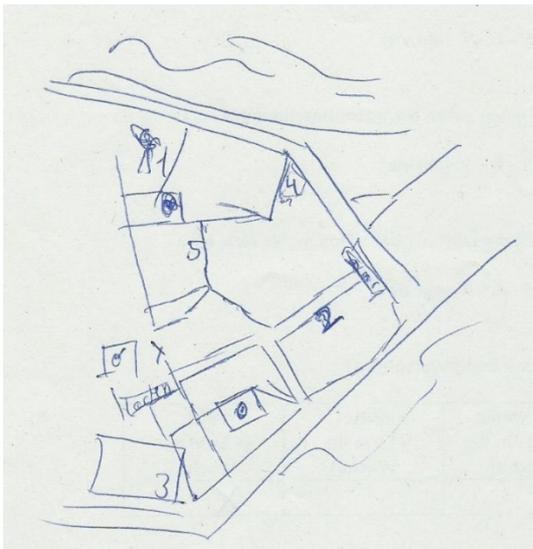


Abbildung 38: Wachgruppe; Sketch Map Score: 2

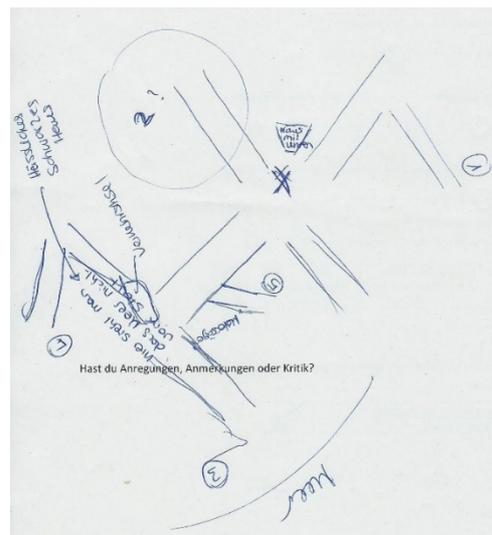


Abbildung 39: Wachgruppe; Sketch Map Score: 1,8

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

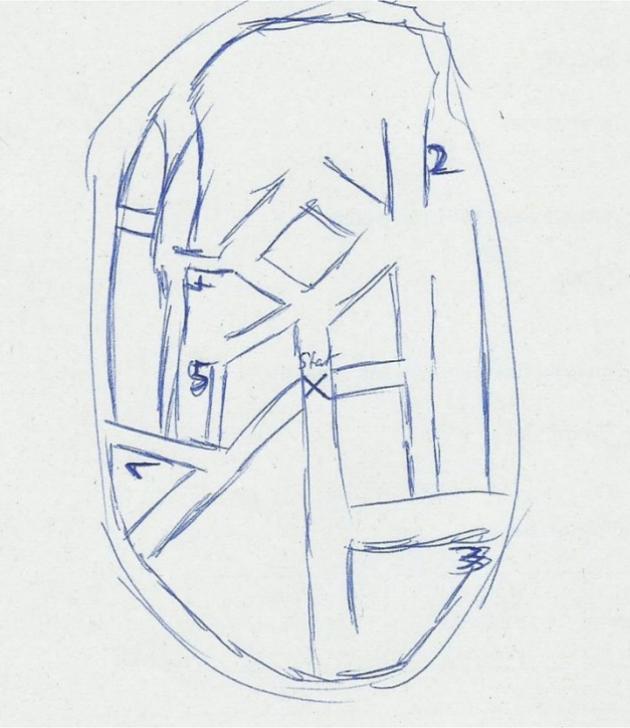


Abbildung 40: Wachgruppe; Sketch Map Score: 3

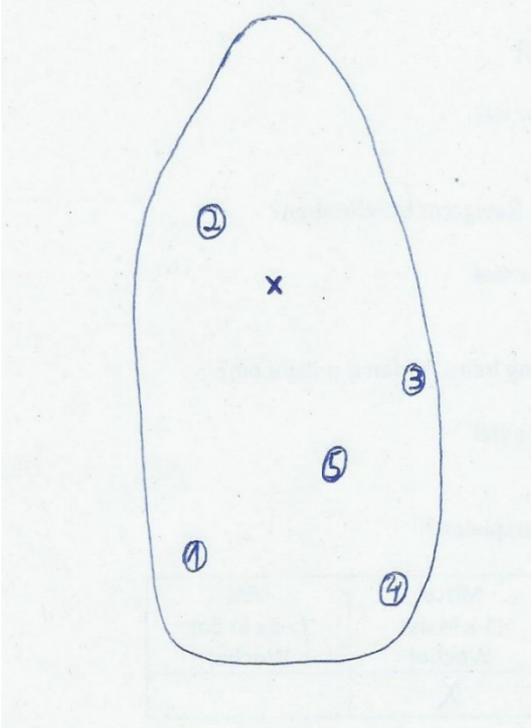


Abbildung 41: Wachgruppe; Sketch Map Score: 1

7.3 Einverständniserklärung

Probandeninformation zum Experiment

Experiment: Kognitive Karte

Name des Versuchsleiters: Julia Holzmann

Sie werden an einem Experiment mit einer Navigationsaufgabe teilnehmen, bei dem der Aufbau von kognitiven Karten untersucht wird. Das Experiment besteht aus 2 Sitzungen.

Ihre persönlichen, während dieser Studie erhobenen, Daten werden im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen - in anonymisierter Form - veröffentlicht und am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft gespeichert.

Die Teilnahme erfolgt freiwillig und kann zu jedem Zeitpunkt ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden.

Tübingen, den _____

Unterschrift

Ich möchte eine Kopie der Einverständniserklärung

Einverständniserklärung zur Teilnahme

Name der Versuchsperson (in Druckbuchstaben): _____

Ich erkläre, dass ich volljährig bin, und bereit, an dem o.g. Experiment teilzunehmen.

Ich habe den Text der Probandeninformation und dieser Einverständniserklärung gelesen und verstanden. Aufgetretene Fragen wurden mir verständlich und vollständig beantwortet. Ich hatte ausreichend Zeit, Fragen zu stellen und mich für oder gegen eine Teilnahme zu entscheiden.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine persönlichen, während dieser Studie erhobenen Daten im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen - in anonymisierter Form - veröffentlicht und am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft gespeichert werden.

Tübingen, den _____

Unterschrift

7.4 Fragebögen

Name:

Datum:

Geb.Datum:

Geschlecht: w o m o

Studium/Beruf:

Bitte kreise die Zahl ein, die am ehesten deiner Antwort entspricht:

Hat dir das Experiment mit dem Oculus Rift Spaß gemacht?

Sehr wenig 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 sehr viel

Wie schwer fandest du das Experiment?

Sehr wenig 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 sehr viel

Würdest du dich selbst als einen guten Navigator beschreiben?

Sehr wenig 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 sehr viel

Wie gut schätzt du deine eigene Leistung beim Finden der Ziele ein?

Sehr wenig 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 sehr viel

Wieviel Zeit verbringst du mit Computerspielen?

keine	Sehr wenig (< als 1x in der Woche)	Mittel (1 x in der Woche)	Viel (> 5x in der Woche)

Hast du am Tag körperlich oder geistig anstrengende Arbeit verrichtet?

Nein	
Ja, körperlich anstrengende Arbeit	
Ja, geistig anstrengende Arbeit	

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

Hattest du eine Strategie für die Wegplanung? (z.B. rechts-links, an dem großen Baum rechts...)?

.....
.....
.....
.....

Versuche eine Skizze der Karte anzufertigen:

Hast du Anregungen, Anmerkungen oder Kritik?

Stanford Schläfrigkeits-Skala

Name:

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

Fragebogen zur Schlafqualität (SF-A-R)

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 und lassen Sie dabei keine Fragen aus.

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 einer 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 mir nicht sicher	Ja, sehr deutlich

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

Nein	Leicht	Stark

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

Nein	1x	2x	3x	>3x

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

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

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	

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

Angenehm	Neutral	Unangenehm

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

.....

.....

.....

.....

6.) Haben Sie letzte Nacht geschwitzt?

Nein	Leicht	Stark

7.) Hatten 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
Gleichmäßig					
Tief					
Gut					
Entspannt					
Ungestört					
Ruhig					
Ausgiebig					

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

	sehr	ziemlich	mittel	wenig	nicht
Sorglos					
Erschöpft					
Schlafbedürftig					
Überfordert					
Ausgeglichen					
Ruhig					
Müde					
Entspannt					

11.) Wie fühlen Sie sich heute Morgen?

	sehr	ziemlich	mittel	wenig	nicht
Ausgeglichen					
Dösig					
Tatkräftig					
Munter					
Frisch					
Ausgeschlafen					
Entspannt					

8. Literaturverzeichnis

- Baddeley, Alan. "Working memory." *Science* 255.5044 (1992): 556.
- Chrastil, Elizabeth R. "Neural evidence supports a novel framework for spatial navigation." *Psychonomic bulletin & review* 20.2 (2013): 208-227.
- Clemens, Z., D. Fabo, and P. Halasz. "Overnight verbal memory retention correlates with the number of sleep spindles." *Neuroscience* 132.2 (2005): 529-535.
- Collett, Matthew, and Thomas S. Collett. "How do insects use path integration for their navigation?." *Biological cybernetics* 83.3 (2000): 245-259.
- Dudai, Yadin. "The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram?." *Annu. Rev. Psychol.* 55 (2004): 51-86.
- Ekstrom, Arne D., et al. "Cellular networks underlying human spatial navigation." *Nature* 425.6954 (2003): 184-188.
- Ferrara, Michele, et al. "Sleep to find your way: the role of sleep in the consolidation of memory for navigation in humans." *Hippocampus* 18.8 (2008): 844-851.
- Foo, Patrick, et al. "Do humans integrate routes into a cognitive map? Map-versus landmark-based navigation of novel shortcuts." *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 31.2 (2005): 195.
- Foo, Patrick, et al. "Humans do not switch between path knowledge and landmarks when learning a new environment." *Psychological research* 71.3 (2007): 240-251.
- Gillner, Sabine, Anja M. Weiß, and Hanspeter A. Mallot. "Visual homing in the absence of feature-based landmark information." *Cognition* 109.1 (2008): 105-122.
- Görtelmeyer, R. "Schlaffragebogen SF-A und SF-B. Internationale Skalen für Psychiatrie." *Beltz, Weinheim* (1981).
- Grahn, Jessica A., John A. Parkinson, and Adrian M. Owen. "The cognitive functions of the caudate nucleus." *Progress in neurobiology* 86.3 (2008): 141-155.
- Grön, Georg, et al. "Brain activation during human navigation: gender-different neural networks as substrate of performance." *Nature neuroscience* 3.4 (2000): 404-408.
- Hartley, Tom, et al. "The well-worn route and the path less traveled: distinct neural bases of route following and wayfinding in humans." *Neuron* 37.5 (2003): 877-888.
- Hegarty, Mary, et al. "Development of a self-report measure of environmental spatial ability." *Intelligence* 30.5 (2002): 425-447.
- Huber, Reto, et al. "Local sleep and learning." *Nature* 430.6995 (2004): 78-81.
- Iaria, Giuseppe, et al. "Cognitive strategies dependent on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: variability and change with practice." *The journal of neuroscience* 23.13 (2003): 5945-5952.
- Inostroza, Marion, and Jan Born. "Sleep for preserving and transforming episodic memory." *Annual review of neuroscience* 36 (2013): 79-102.
- Ji, Daoyun, and Matthew A. Wilson. "Coordinated memory replay in the visual cortex and hippocampus during sleep." *Nature neuroscience* 10.1 (2007): 100-107.

Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Ortsgedächtnis

- Karnath, Hans-Otto, and Peter Thier. *Kognitive Neurowissenschaften*. Berlin, Germany: Springer, 2012.
- Kopp, Tobias „Laborprojekt: Untersuchung Landmarken-unabhängiger Übertragungseffekte bei der Navigation in zwei virtuellen Städten.“ *Projektarbeit* der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, LS für Kognitive Neurowissenschaft, Tübingen (2015).
- Lewis, Penelope A., and Simon J. Durrant. "Overlapping memory replay during sleep builds cognitive schemata." *Trends in cognitive sciences* 15.8 (2011): 343-351.
- Morris, R. G. M., et al. "Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions." *Nature* 297.5868 (1982): 681-683.
- Moser, May-Britt, David C. Rowland, and Edvard I. Moser. "Place cells, grid cells, and memory." *Cold Spring Harbor perspectives in biology* 7.2 (2015): a021808.
- Müller, G. E. "Pilzecker,(1900)." *Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Gedächtnis. Zeitschrift f. Psych, und Physiol. des Sinnesorgan., supplement* (1900).
- Nguyen, Nam D., et al. "Overnight sleep enhances hippocampus-dependent aspects of spatial memory." *Sleep* 36.7 (2013): 1051-7.
- O'keefe, John, and Lynn Nadel. *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford University Press, USA, 1978.
- Peigneux, Philippe, et al. "Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep?." *Neuron* 44.3 (2004): 535-545.
- Pomplun, Marc, et al. "The effects of circadian phase, time awake, and imposed sleep restriction on performing complex visual tasks: Evidence from comparative visual search." *Journal of vision* 12.7 (2012): 14-14.
- Röhrich, Wolfgang G., Gregor Hardiess, and Hanspeter A. Mallot. "View-based organization and interplay of spatial working and long-term memories." *PloS one* 9.11 (2014): e112793.
- Schacter, Daniel L., and Endel Tulving. *Memory systems 1994*. Mit Press, 1994.
- Stickgold, Robert. "Sleep-dependent memory consolidation." *Nature* 437.7063 (2005): 1272-1278.
- Stickgold, Robert. "Sleep: off-line memory reprocessing." *Trends in cognitive sciences* 2.12 (1998): 484-492.
- Walker, Matthew P., et al. "Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning." *Neuron* 35.1 (2002): 205-211.
- Wamsley, Erin J., et al. "A brief nap is beneficial for human route-learning: The role of navigation experience and EEG spectral power." *Learning & Memory* 17.7 (2010): 332-336.
- Wolbers, Thomas, et al. "Differential recruitment of the hippocampus, medial prefrontal cortex, and the human motion complex during path integration in humans." *The Journal of Neuroscience* 27.35 (2007): 9408-9416.
- Wolbers, Thomas, and Mary Hegarty. "What determines our navigational abilities?" *Trends in cognitive sciences* 14.3 (2010): 138-146.