

Aus dem
Institut für Medizinische Psychologie
und Verhaltensneurobiologie

**Schlafabhängiges Stimulus-Response-Lernen
in Virtueller Realität und im Labor**

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

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

vorgelegt von

Weber, Anna-Lena Johanna

2025

Dekan: Professor Dr. B. Pichler
1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. K. Rauss
2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. Lindner

Tag der Disputation: 05.11.2025

Für meine Familie.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	iii
Abkürzungsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Schlaf.....	1
1.1.1 Schlafstadien	1
1.1.2 Schlafspindeln	4
1.1.3 Kurzschlaf.....	5
1.2 Gedächtnis.....	7
1.2.1 Gedächtniskonsolidierung	10
1.2.2 <i>Stimulus-Response-Lernen</i>	12
1.3 Schlaf und Gedächtnisbildung	15
1.3.1 Kurzschlaf und Gedächtnis.....	17
1.4 Virtuelle Realität.....	18
1.4.1 VR-Krankheit	19
1.4.2 Immersives Lernen	20
1.5 Fragestellung	22
2 Material und Methoden	23
2.1 Versuchsteilnehmer*innen	23
2.1.1 Gruppengröße und -struktur	23
2.1.2 Ein- und Ausschlusskriterien	25
2.1.3 Rekrutierung	25
2.2 Versuchsablauf	26
2.3 Versuchsaufgaben	30
2.3.1 <i>Stimulus-Response-Lernen</i>	30

2.3.2	Kontrollvariablen	33
2.3.2.1	Psychomotorischer Vigilanztest.....	33
2.3.2.2	<i>Edinburgh Handedness Inventory</i>	34
2.3.2.3	Stanford Schläfrigkeitsskala	34
2.3.2.4	<i>Pittsburgh Sleep Quality Index</i>	34
2.3.2.5	Deutscher <i>Morningness-Eveningness Questionnaire</i>	35
2.3.2.6	<i>Misery Scale</i> und <i>Simulator Sickness</i>	35
2.3.3	Polysomnographie	36
2.4	Datenauswertung.....	37
2.5	Statistische Auswertung.....	38
3	Ergebnisse	39
3.1	Auswertung der Polysomnographie	39
3.2	Ergebnisse S-R-Aufgabe	40
3.2.1	Wechselkosten in Abhängigkeit von Schlaf und Versuchsumgebung	40
3.2.2	Einfluss von Mittagsschlaf und Lernumgebung auf S-R-Lernen ...	42
3.2.3	Einfluss von Schlafmenge und -tiefe auf S-R-Lernen.....	43
3.3	Wiedererkennungs- und explizite Gedächtnisaufgabe	45
3.4	Kontrollvariablen	48
4	Diskussion.....	49
4.1	S-R-Lernen	49
4.1.1	Mittagsschlaf fördert S-R-Lernen.....	49
4.1.2	Rolle des Umgebungskontext.....	52
4.2	Wiedererkennungs- und explizite Gedächtnisaufgabe	53
4.3	Bedeutung und Ausblick	53
4.4	Qualitative Beurteilung der Studie	54

5	Zusammenfassung.....	56
6	Literaturverzeichnis.....	57
7	Erklärung zum Eigenanteil	63
8	Veröffentlichungen	64
9	Danksagung.....	65
10	Anhang	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einteilung des Langzeitgedächtnisses	8
Abbildung 2:	S-R-Lernen.....	13
Abbildung 3:	Einteilung Proband*innen in Umgebungs- und Aufgabenkontext. 24	
Abbildung 4:	Studiendesign.....	29
Abbildung 5:	Ablauf S-R-Lernen in der Enkodierungsphase.....	31
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der S-R-Aufgabe in der Abrufphase ..	32
Abbildung 7:	Elektrodenpositionen der PSG	37
Abbildung 8:	Vergleich der kombinierten Wechselkosten der Reaktionszeit	42
Abbildung 9:	Einfluss von Schlaf auf S-R-Lernen	43
Abbildung 10:	Korrelation Non-REM-Spindeldichte und Wechselkosten	45
Abbildung 11:	Einfluss des Schlafes auf Wiedererkennung- und explizite Gedächtnisaufgabe	46
Abbildung 12:	Einfluss der Lernumgebung auf Wiedererkennungsaufgabe	47
Abbildung 13:	Einfluss der Lernumgebung auf explizite Gedächtnisaufgabe ...	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Schlafdauer und Schlafstadien	39
Tabelle 2:	Übersicht der durchschnittlichen Spindeldichten pro Minute und pro Region.....	44
Tabelle 3:	Proband*innenkollektiv	82

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
AASM	Amerikanische Akademie für Schlafmedizin / <i>American Association of Sleep Medicine</i>
CAMIL	<i>Cognitive Affective Model of Immersive Learning</i>
EEG	Elektroenzephalogramm bzw -graphie
EHI	<i>Edinburgh Handedness Inventory</i>
EMG	Elektromyogramm bzw -graphie
EOG	Elektrookulogramm bzw -graphie
HMD	<i>Head-mounted display</i>
MAD	<i>Mean absolute derivation</i>
MEQ	<i>morningness-eveningness questionnaire</i>
MISC	<i>Misery Scale</i>
N1-N3	Non-REM-Stadium 1-3
Non-REM	<i>Non-Rapid Eye Movement</i>
PSG	Polysomnographie
PSQI	Pittsburgh Schlaf Qualität Index
PVT	Psychomotorischer Vigilanztest
REM	<i>rapid eye movement</i>
S-R	<i>Stimulus-Response</i>
S1-S4	Stadium 1-Stadium 4
SD	<i>standard deviation</i>
SSS	Stanford Schläfrigkeitsskala
SWA	<i>slow wave activity</i>
SWS	<i>slow wave sleep</i>
TSS	<i>tiredness symptoms scala</i>
VR	Virtuelle Realität

1 Einleitung

1.1 Schlaf

Schlaf ist ein natürlicher, reversibler Prozess, der durch reduzierte Reaktionsfähigkeit, relative Inaktivität und Bewusstseinsverlust gekennzeichnet ist. Er findet regelmäßig zyklisch statt und wird homöostatisch reguliert. Er hat eine zentrale Bedeutung für multiple physiologische und kognitive Prozesse wie die Gedächtniskonsolidierung und das Lernen, aber auch für die Immunfunktion, den Metabolismus und die emotionale Regulierung (Borbély & Achermann, 1999; Rasch & Born, 2013; Zielinski et al., 2016). Mit Schlafentzug werden vielerlei Gesundheitsprobleme wie Bluthochdruck, kardiovaskuläre Erkrankungen, Diabetes Mellitus Typ II, Neurodegenerationen und Übergewicht verbunden (Worley, 2018). Tierexperimente unterstreichen die lebenswichtige Bedeutung des Schlafes: bei Ratten führte langanhaltender Schlafentzug über zwei bis drei Wochen zum Tod der Versuchstiere (Rechtschaffen et al., 1989). Schlafentzug führt zu einer Beeinträchtigung kognitiver Prozesse, zu einer herabgesetzten Reaktionsfähigkeit und Aufmerksamkeit sowie einer reduzierten Leistungsfähigkeit des Kurzzeitgedächtnisses (Goel et al., 2009). Somit kommt Schlaf eine zentrale Rolle zu, da er entscheidende Regenerations- und Konsolidierungsprozesse ermöglicht, die für die körperliche und kognitive Leistungsfähigkeit unerlässlich sind (Rasch & Born, 2013).

1.1.1 Schlafstadien

Bei Säugetieren setzt sich der Schlaf aus verschiedenen Stadien zusammen, die sich im Laufe eines Schlafzyklus gegenseitig abwechseln: dem *Rapid Eye Movement*-Schlaf (*REM*) und dem *Non-Rapid Eye Movement*-Schlaf (*Non-REM*). Der Non-REM-Schlaf umfasst dabei fast die Hälfte eines Schlafzyklus (Rasch & Born, 2013). Ein Schlafzyklus benötigt circa 90-110 Minuten und wiederholt sich vier bis sieben Mal pro Nacht. Er beginnt mit den verschiedenen Stadien des Non-REM-Schlafes gefolgt von REM-Schlaf (Iber et al., 2007; Stuck et al., 2013).

Die Polysomnographie (PSG) stellt hierbei eine Methode zur Erfassung und Untersuchung des Schlafes dar. Sie setzt sich meist zusammen aus der Elektroenzephalographie (EEG), der Elektrookulographie (EOG) und der Elektromyographie (EMG). Zusätzlich können weitere Befunde wie ein Elektrokardiogramm, der Atem und Beinbewegungen erfasst werden. Die EEG erfasst die elektrische Aktivität des Gehirns und wird über an der Kopfhaut angebrachte Elektroden gemessen. Die Ableitung sollte über mindestens drei Kanäle erfolgen. Die EOG wird über zwei Augenelektroden, jeweils am linken und rechten Orbitalrand mit circa 1 cm vertikalem Versatz gemessen und ermöglicht die Registrierung von Augenbewegungen. Die EMG wird mithilfe Elektroden am Musculus mentalis, zum Teil auch am Musculus submentalis abgeleitet und registriert die Muskelspannung oder -atonie (Rundo & Downey, 2019; Stuck et al., 2013).

Die Auswertung der Polysomnographie kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, wobei meist das Klassifikationssystem nach Rechtschaffen und Kales (1968) oder das der amerikanischen Akademie für Schlafmedizin (AASM) verwendet werden.

Der Non-REM-Schlaf wird nach Rechtschaffen und Kales (1968) anhand charakteristischer Muster der PSG, wie der Amplitude und der Frequenz, zusätzlich in vier Schlafphasen, Stadium 1 bis Stadium 4 (S1-S4), unterteilt. Die unterschiedlichen, typischen Frequenzmuster der EEG-Wellen gehen mit modulierten Aktivitäten von Neurotransmittern, typischer Aktivität der tonischen Muskelaktivität und Augenbewegungen einher.

2007 veröffentlichte die AASM eine eigene Klassifikation der PSG. In ihr werden Non-REM-Stadien statt in S1-S4 in Non-REM-Stadium 1-3 (N1-N3) unterteilt, wobei N3 den *Slow Wave Sleep (SWS)*, die früheren S3 und S4, zusammenfasst (Iber et al., 2007).

Zur Auswertung der PSG werden die Schlafstadien in sequenziellen, 30 Sekunden langen Epochen ausgewertet, wobei jeder Epoche ein Schlafstadium zugeordnet wird. Wenn mehr als zwei Schlafstadien während einer Epoche

vorliegen wird das Schlafstadium mit dem größten Anteil gewertet (Troester et al., 2023).

Während zu Beginn einer längeren Schlafphase, zum Beispiel Nachtschlaf, überwiegend der SWS dominiert, überwiegt mit zunehmender Schlafdauer der REM-Schlaf, der gegen Ende der Schlafperiode intensiver und umfangreicher stattfindet (Born et al., 2006; Rasch & Born, 2013; Stuck et al., 2013).

Zu Beginn eines Schlafzyklus findet man zunächst den Non-REM-Schlaf, untergliedert in S1-S4.

S1 kennzeichnet sich durch das absolute Fehlen von Spindel- und K-Komplexen sowie einer langsameren EEG-Aktivität mit niedriger Amplitude (2-7 Hz). Man findet weniger als 50% Alpha-Wellen (8-13 Hz) und langsame Theta-Wellen (4-7.99 Hz). Möglich sind ebenso Vertex-Wellen, die vor allem zentral auftreten und weniger als 0.5 Sekunden andauern. Langsame Augenbewegungen sind ebenfalls möglich. Die Muskelaktivität ist niedriger als im Wachzustand. Während des nächtlichen Schlafes ist die Phase relativ kurz (1-7 Minuten) (Rechtschaffen, 1968; Troester et al., 2023).

S2 kennzeichnet sich durch Schlafspindeln, K-Komplexe und langsame Theta-Wellen. Augenbewegungen bleiben aus, die Muskulatur ist entspannt.

Schlafspindeln haben eine Frequenz von 12-14 Hz und dauern mehr als 0.5 Sekunden. Sie sind maximiert bei der zentralen Ableitung. K-Komplexe stellen sich im EEG als scharf abgrenzbare, negative Welle, die direkt gefolgt wird von einer positiven Komponente mit einer Gesamtdauer von mindestens 0.5 Sekunden dar. Die maximale Amplitude findet man typischerweise bei der frontalen Ableitung (Rechtschaffen, 1968). Die K-Komplexe sind nicht assoziiert mit *Arousals*, einem abrupten Wechsel in der EEG-Frequenz mit einer Frequenz von mehr als 16 Hz, welche mehr als 3 Sekunden andauert. Treten K-Komplexe mit einem *Arousal* assoziiert auf, definiert er das Ende des Stadiums N2. Um damit assoziiert zu sein, muss der *Arousal* zeitgleich oder innerhalb einer Sekunde nach dem K-Komplex auftreten (Troester et al., 2023).

S3 und S4 stellen den SWS dar, der seinen Namen aufgrund niederfrequenter Wellen, der *Slow Wave Activity (SWA)*, mit einer Frequenz von bis zu 2 Hz erhält,

bei der die Amplitude der *Slow Waves* mindestens 75 μV beträgt (Rechtschaffen, 1968). Augenbewegungen liegen typischerweise nicht vor, die Muskulatur ist weiterhin entspannt (Troester et al., 2023). Unterschieden werden S3 und S4 anhand der Anteile der niederfrequenten Wellen: Während S3 machen diese mindestens 20%, aber weniger als 50% aus. In S4 machen sie mehr als 50% aus (Rechtschaffen, 1968). Goel et al. (2014) zeigten als Reaktion auf ihre visuell-kognitive Aufgabe eine erhöhte *Slow Wave*-Aktivität.

Der REM-Schlaf ist durch die namensgebenden schnellen, konjugierten, unregelmäßigen Augenbewegungen gekennzeichnet. Dabei ist zu beachten, dass die schnellen Augenbewegungen auch im Wachzustand auftreten können. Ebenso typisch für den REM-Schlaf sind Säbelzahn-ähnliche Wellen (2-6 Hz), welche meist vor schnellen Augenbewegungen auftreten, aber auch unabhängig davon auftreten können. Die EMG-Aktivität ist überwiegend gering, es kann aber zu kurzen (<25 Sekunden), unregelmäßigen Aktivitäten kommen. Diese Aktivität ist am stärksten, wenn sie mit den Augenbewegungen verbunden ist. Es liegen keine Spindeln oder K-Komplexe vor (Rasch & Born, 2013; Rechtschaffen, 1968; Troester et al., 2023).

1.1.2 Schlafspindeln

Schlafspindeln sind charakteristische Muster im EEG, die während Non-REM-Schlaf zu finden sind. Überwiegend treten sie in S2 auf, können aber auch im SWS vorkommen, wobei die durchschnittliche Spindelaktivität hier geringer ist (Iber et al., 2007; Rechtschaffen, 1968). Sie sind gekennzeichnet als kurze 0.5-3 Sekunden lange Episoden mit einer Frequenz von 9-15 Hz (Astori et al., 2013). Bei Menschen findet man zwei Arten von Schlafspindeln: die schnellen (13-15 Hz), die sich vor allem über dem zentralen und parietalen Kortex finden und die langsamen (10-12 Hz) Spindeln, die sich vor allem über dem frontalen Kortex finden und vermehrt im SWS auftreten. Die beiden Spindelarten unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht, wie zum Beispiel altersbedingte Veränderungen und homöostatische Regulierungen. Dabei ist noch unklar, ob die beiden unterschiedlichen Spindelarten unterschiedliche neuronale Prozesse darstellen

oder ob es sich um einen Prozess mit unterschiedlichen Modulationen handelt (Rasch & Born, 2013).

Den Schlafspindeln wird bei Mensch und Tieren eine zentrale Rolle in der Gedächtniskonsolidierung zugeschrieben. Nach der Enkodierung einer Liste mit abstrakten Wörtern zeigte sich bei Proband*innen eine erhöhte Spindeldichte. Ebenso zeigte sich, dass je höher die Spindeldichte war, desto besser die Erinnerungsleistung nach dem Schlaf gewesen ist (Rasch & Born, 2013). Die Spindelaktivität korreliert signifikant mit der Verbesserung der Leistung nach Schlaf (Schabus et al., 2004). Auch wenn sich starke Hinweise für eine positive Korrelation zwischen Schlafspindeln und Gedächtniskonsolidierung zeigen, konnte bislang kein kausaler Zusammenhang nachgewiesen werden (Rasch & Born, 2013).

Zwischen verschiedenen Nächten eines Individuums ist die Spindeldichte gleichbleibend, wobei sie im Laufe einer Nacht zunimmt. Zwischen verschiedenen Individuen kann die Spindeldichte aber stark variieren. Auch ist die Spindelzahl und Spindeldichte abhängig vom Alter – im Laufe des Lebens nimmt die Spindelzahl, Spindeldichte und die Länge der Spindeln ab (Fogel & Smith, 2011).

1.1.3 Kurzschlaf

Durch den heutigen Lebensstil – Bildschirmnutzung, Schichtdienste, internationale Reisen, globale Vernetzungen über Zeitzonen hinweg – zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme des nächtlichen Schlafes und damit verbunden eine Zunahme von Schlafstörungen und schlafmangel-bedingten Unfällen (Grandner, 2017; Medrick & Drummond, 2009). Aufgrund dieser Entwicklung gewinnt der Kurzschlaf zunehmend an Bedeutung.

Unter Kurzschlaf versteht man kurze Schlafperioden zwischen 3 Minuten und 3 Stunden, unabhängig davon, ob diese tagsüber oder nachts stattfinden. Davon abzugrenzen ist der Sekundenschlaf, der in der Regel unfreiwillig ist und lediglich Sekunden bis Minuten andauert und die langen (>5 Stunden), meist nächtlichen Schlafperioden (Medrick & Drummond, 2009). Kurzschlaf soll neben der

Bekämpfung von Schläfrigkeit und Müdigkeit auch für die Aufmerksamkeit und die kognitive Leistung förderlich sein (Lovato & Lack, 2010; Medrick & Drummond, 2009; Tucker & Fishbein, 2008).

Die Länge und Häufigkeit von Kurzschlaf variieren im Laufe des Lebens. Neugeborene haben generell kürzere Schlafzyklen als Erwachsene (50–60 Minuten), daher kommt Kurzschlaf erst kurz vor dem ersten Geburtstag hinzu, wenn sich ein nächtlicher Schlafrhythmus eingestellt hat. Während kleinere Kinder noch bis zu drei Mal kürzere oder längere Schläfe tagsüber halten, entwickeln sich diese mit zunehmendem Alter in einen längeren Nachmittagsschlaf. Ab einem Alter von vier Jahren finden zumeist keine Mittagsschläfe mehr statt und treten dann erst wieder im *Teenager*-Alter auf. In der Universität haben bis zu 60% der Studierenden eine regelmäßige Mittagsschlaf-Gewohnheit. Männer scheinen dabei häufiger Mittagsschlaf zu halten als Frauen (Medrick & Drummond, 2009).

Wie lange ein optimaler Kurzschlaf sein sollte lässt sich nicht verallgemeinern. Bereits ein Kurzschlaf von circa 10-minütiger Dauer, allgemein bekannt als „*Power nap*“, verbessert die kognitive Leistungsfähigkeit, führt zu einer subjektiven Erhöhung der Wachsamkeit und vermindert sowohl die Erschöpfung und Schläfrigkeit. Auch längerer Kurzschlaf zeigte die positiven Effekte - allerdings zeigte sich direkt im Anschluss an den Kurzschlaf zunächst eine kurze Phase der verlangsamten kognitiven Fähigkeiten und einer reduzierten subjektiven Wachsamkeit (Brooks & Lack, 2006; Lovato & Lack, 2010). Ein Kurzschlaf kann den Lernerfolg einer motorischen Lernaufgabe genau so gut wie ein kompletter Nachtschlaf fördern (Walker & Stickgold, 2005). Hierbei sind vor allem die Schlafstadien und der Anteil des SWS wichtig (Lovato & Lack, 2010; Medrick & Drummond, 2009; Tucker et al., 2006).

Die Dauer des Kurzschlafes beeinflusst die Schlafstadien, die durchlaufen werden: Sehr kurzer Kurzschlaf enthält nur S1 oder S1 und S2, wohingegen mit anhaltender Dauer des Schlaf auch der SWS und REM-Schlaf hinzukommen (Medrick & Drummond, 2009). In Studien erlaubt Kurzschlaf damit – tagsüber in Form von Mittagsschlaf - eine Isolierung der gewünschten Schlafstadien, ohne

klassische Schlafdeprivationstechniken, bei welchen Proband*innen vor Erreichen eines unerwünschten Schlafstadiums geweckt werden. Nicht nur ist hier fraglich, ob eine komplette Isolierung zwischen S2, SWS und REM möglich ist, es löst vor allem Stress aus und könnte damit Einfluss auf das Ergebnis nehmen (Genzel et al., 2015; Medrick & Drummond, 2009).

Zeitlich eignet sich hierfür das natürliche „Nachmittagstief“, ein Zeitfenster zwischen 14 und 16 Uhr mit besonders hoher Schlafneigung (Medrick & Drummond, 2009). Dies wird mit dem *Multiple Sleep Latency Test* bestätigt (Carskadon et al., 1986). Er erfasst die Schlafneigung im Verlaufe des Tages. Wenn Proband*innen explizit angewiesen wurden nicht zu schlafen, zeigten sich in diesem Zeitraum die größten Schwierigkeiten. Physiologisch zeigt sich dies auch in einer Fluktuation der Körperkerntemperatur als Messgröße des zirkadianen Rhythmus - typischerweise ist ein Abfall der Körperkerntemperatur zur habituellen Schlafenszeit zu erkennen, deren Tiefpunkt circa 2 Stunden vor der habituellen Aufstehzeit (meist zwischen 3 und 5 Uhr) erreicht ist. Im bizirkadianen Modell ist ein analoger Abfall der Körperkerntemperatur zwischen 14 und 16 Uhr zu finden (Medrick & Drummond, 2009).

Einen optimalen Zeitpunkt für einen Kurzschlaf gibt es nicht – er ist von multiplen individuellen Faktoren, darunter Chronotyp, Schlafbedürfnis, Tag/Nacht-Rhythmus und vorangegangenen Wachzeiten abhängig (Milner & Cote, 2009).

1.2 Gedächtnis

Die elementare Fähigkeit von Lebewesen Erinnerungen zu bilden und gelernte Informationen abrufen zu können ermöglicht es ihnen, ihr Verhalten an die Anforderungen der Umwelt anzupassen und kontinuierlich zu verbessern (Rasch & Born, 2013).

Das Gedächtnis bezeichnet dabei verschiedene Speichersysteme und Prozesse, welche die Verarbeitung, das Abspeichern und Aufbewahren, den Abruf und die Verwendung von Informationen ermöglichen, wenn die ursprüngliche Informationsquelle, welche sensorische Reize, motorische Fähigkeiten oder

spezifische Fertigkeiten wie Sprachregeln umfassen kann, nicht mehr vorhanden ist.

Die Einteilung der verschiedenen Gedächtnissysteme kann anhand der Zeitdauer der gespeicherten Informationen unterschieden werden.

Hierbei sind die Systeme hierarchisch gegliedert. Beginnend im sensorischen Speicher (Ultrakurzzeitgedächtnis) werden Informationen visuell oder auditorisch gespeichert. Im Kurzzeitgedächtnis (transientes Gedächtnis) werden Informationen für Sekunden bis Minuten gespeichert. Danach werden Informationen entweder aussortiert und gehen verloren oder gehen in das Langzeitgedächtnis, welches in Dauer und Kapazität prinzipiell unbegrenzt ist, über. Das Arbeitsgedächtnis stellt hierbei eine Sonderheit dar, da es nicht nur Informationen speichert, sondern vor allem auch verarbeitet (Jäncke, 2013).

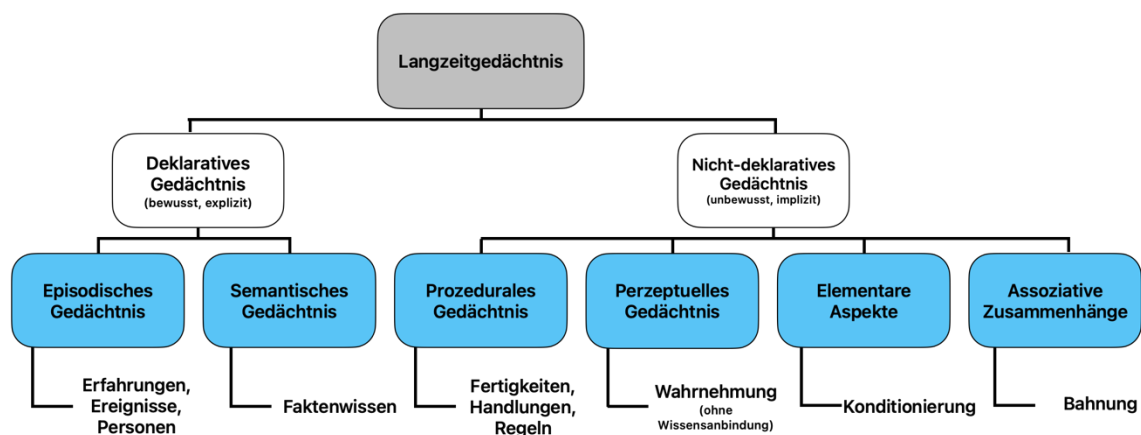


Abbildung 1: Einteilung des Langzeitgedächtnisses. Modifiziert nach Jäncke (2013).

Die geläufigste Einteilung des Langzeitgedächtnisses erfolgt anhand des Bewusstseinsgrades der beteiligten Prozesse in das deklarative und das nicht-deklarative Gedächtnis. Das deklarative (bewusstes, explizites) Gedächtnis, welches sich aus dem episodischen Gedächtnis (Ereignisse, Erinnerungen) und dem semantischen Gedächtnis (Faktenwissen) zusammensetzt, hängt neuroanatomisch insbesondere vom Hippocampus ab (Jäncke, 2013; Squire & Zola, 1996; Tulving, 1985). Epileptische Patienten, denen bilateral die Bereiche des Hippocampus entfernt wurden, litten folgend an anterograder Amnesie. Kürzlich gelernte und neugelernte Informationen konnten nicht mehr langfristig

gespeichert werden, während Erinnerungen aus der Vergangenheit wie die Adresse des Hauses, aus dem der Patient kürzlich ausgezogen war, präsent bleiben. Daraus folgt, dass das Kurzzeitgedächtnis zwar intakt war, die Übertragung ins Langzeitgedächtnis jedoch nicht mehr erfolgen konnte (Scoville & Milner, 1957).

Deklarative Erinnerungen können unbewusst oder bewusst enkodiert werden, sind aber bewusst abrufbar. Episodische Informationen werden zwar schnell gelernt, aber auch schnell wieder vergessen. Semantische Informationen können als Ansammlung von wiederholter Enkodierung oder überschneidenden episodischen Informationen betrachtet werden (Rasch & Born, 2013; Squire & Zola, 1996).

Das nicht-deklarative (unbewusste, implizite) Gedächtnis setzt sich zusammen aus dem prozeduralen Gedächtnis (Fertigkeiten), dem perzeptuellen Gedächtnis (Wahrnehmung), dem Gedächtnis für assoziative Zusammenhänge und dem Gedächtnis für elementare Aspekte, welche durch Konditionierung entstehen (Jäncke, 2013; Squire & Zola, 1996; Tulving, 1985). Die Informationen werden in verschiedenen Gedächtnissystem gespeichert. Motorische Fertigkeiten des prozeduralen Gedächtnisses werden so beispielsweise im Motorcortex, im Striatum und im Cerebellum abgespeichert und Wahrnehmungen des perzeptuellen Gedächtnisses in sensorischen Cortex-Bereichen. Nicht-deklarative Informationen werden implizit gelernt und abgerufen (Rasch & Born, 2013; Squire & Zola, 1996).

Bezüglich des Gedächtnisses für assoziative Zusammenhänge wurde in Bahnungs-Aufgaben untersucht, dass Proband*innen Aufgaben schneller lösen konnten, wenn sie auf bekannte Reize zurückgreifen konnten, als wenn sie die Reize noch nicht gekannt hatten. Dies gilt auch, wenn diese nicht bewusst wahrgenommen wurden. Bahnung bezeichnet einen Prozess, bei dem vorangegangenen Reize unbewusst Einfluss auf die Verarbeitung eines Reizes nehmen (Jäncke, 2013; Tulving & Schacter, 1990).

1.2.1 Gedächtniskonsolidierung

Der Speicherprozess des Gedächtnisses setzt sich aus drei verschiedenen Phasen zusammen. Die erste Phase, die Enkodierung, bezeichnet das Abspeichern von Informationen. Die zweite Phase, die Konsolidierung, bezeichnet die neuronale Festigung der Informationen, sowie die Integration in existierendes Wissen. Die dritte Phase, der Abruf, bezeichnet den Zugriff auf Informationen (Born et al., 2006; Jäncke, 2013; Rasch & Born, 2013).

Die Enkodierung umfasst die Identifikation der Information, die Merkmalsextraktion und das Erkennen. Die erlernte Information wird in ein neuronales Netzwerk integriert und es wird eine Spur im Gedächtnis gebildet. Diese neu entstehende Gedächtnisspur ist zu Beginn noch sehr labil – sie muss noch gefestigt werden (Rasch & Born, 2013). Die Festigung der Informationen bezeichnet man als Konsolidierung. Sie erfolgt auf zwei Ebenen: auf Synapsenebene, die sogenannte Synapsenkonsolidierung und auf Gedächtnissystemebene, die sogenannte Systemkonsolidierung.

Die Synapsenkonsolidierung erfolgt schnell, innerhalb von Minuten bis Stunden und geht mit einer veränderten Genexpression einher, welche wiederum mit veränderter Proteinsynthese verbunden ist. Dadurch werden die neuronalen Verknüpfungen der Synapsen verstärkt (Langzeitpotenzierung) oder gemindert (Langzeitdepression); es kommt also zu einer Modifikation der synaptischen Plastizität. Die Systemkonsolidierung braucht mehr Zeit, sie benötigt Tage, Wochen oder gar Jahre (Jäncke, 2013; Rasch & Born, 2013). Dies geschieht sowohl beim deklarativen als auch beim nicht-deklarativen Gedächtnis (Alger et al., 2015; Diekelmann & Born, 2010).

Das Zwei-Stufen-Modell nach Marr (1971) stellte die Vermutung auf, dass Informationen parallel in verschiedenen Hirnarealen verarbeitet werden: zunächst in einem schnellen Speicher (hippokampale Netzwerke) und dann, nach mehreren Reaktivierungen, in einem langsameren Speicher (Neokortex).

Schlaf fördert dabei besonders die Gedächtniskonsolidierung, wohingegen die Enkodierung und der Abruf überwiegend im Wachzustand stattfinden (Born et al., 2006; Diekelmann & Born, 2010).

Bei den Abfragaufgaben unterscheidet man die Wiedererkennungs- und die Reproduktionsabfrage. Bei der Wiedererkennung werden dieselben Reize wie in der Enkodierung gemeinsam mit Distraktoren präsentiert und die Proband*innen sollen eine Alt-Neu-Entscheidung treffen. Bei der Reproduktion muss ein zuvor gelernter Reiz wiedergegeben werden. Dies kann unterstützt sein durch einen Hinweisreiz oder frei sein (Jäncke, 2013). Einige Studien weisen darauf hin, dass Wiedererkennungsaufgaben im Gegensatz zu freien oder hinweisgestützten Reproduktionsaufgaben weniger schlafabhängig sind (Diekelmann et al., 2008).

Smith und Vela (2001) untersuchten in ihrem Review die Rolle des Kontexts beim Lernen und zeigten, dass der Kontext in den Informationen erlernt und abgerufen werden, einen Einfluss auf den Lernerfolg hat. Sie zeigten, dass eine Veränderung des äußeren Kontexts, dem Umgebungskontext, einen Einfluss auf das Erlernte hat.

Finden Lernen und Abruf im selben Umgebungskontext statt zeigte sich ein besserer Lernerfolg. Taucher, die Wörter unter Wasser auswendig gelernt hatten, erinnerten sich besser an diese, wenn sie auch unter Wasser abgerufen wurden, als wenn sie an Land abgerufen wurden (Godden & Baddeley, 1975). Bei Wiedererkennungsaufgaben zeigen sich in einigen Studien geringere Einflüsse des Kontextes als beim freien Abruf (Godden & Baddeley, 1980), wobei sich im Review kein signifikanter Unterschied bei dem Einfluss des Umgebungskontextes zwischen freier Abfrage, hinweisgestützter und Abfragaufgaben zeigte (Smith & Vela, 2001).

Ebenso spielt der Kontext in Bezug auf die Schlaf- und Wachkonsolidierung eine entscheidende Rolle: Während die Schlafkonsolidierung bei Ratten insgesamt zu einer stärkeren Objekterkennung führt, ist die Wachkonsolidierung etwas schwächer, dafür aber kontextunabhängiger. Bei einem Kontextwechsel beim Abruf zeigte die Wachgruppe sogar bessere Leistungen als die Schlafgruppe (Sawangjit et al., 2022).

1.2.2 *Stimulus-Response-Lernen*

Das *Stimulus-Response-(S-R)*-Modell beschreibt eine Reiz-Reaktions-Assoziation. Das Modell stellt eine Verknüpfung des Stimulus und seiner Reaktion, der Entscheidung und dem Aufgabenkontext mit diesem Stimulus dar. Es kommt zu einer komplexen Assoziationsbildung (Henson et al., 2014).

Es handelt sich beim *S-R-Lernen* um eine Form der Bahnung: der Stimulus wird mit der Reaktion verbunden. Um einen Reiz in einer Klassifikationsaufgabe korrekt klassifizieren zu können, müssen normalerweise mehrere, separate Prozesse des Gedächtnisses durchlaufen werden und hierfür multiple Antwortrepräsentationen wie die motorische Aktion, die Entscheidung und die Klassifikation abgespeichert werden. Bei einer erneuten Präsentation des Stimulus kann die Antwort durch die Reiz-Reaktions-Assoziation dann mit reduzierter kognitiver Leistung reproduziert werden (Henson et al., 2014; Horner & Henson, 2009).

Bereits eine einfache Paarung von Reiz und Reaktion reicht für das Erlernen einer Reiz-Reaktions-Assoziation aus. Zunächst wurde eine einfache Reiz-Reaktions-Assoziation erwartet: die wiederholte Präsentation eines Reizes führt zu einer schnelleren motorischen Antwort (Dobbins et al., 2004; Schnyer et al., 2007). Es zeigte sich aber, dass während des *S-R-Lernens* mindestens drei verschiedene Abstraktionen stattfinden: eine motorische Aktion (z.B. rechter / linker Fingerdruck), eine Klassifikation (z.B. größer / kleiner) und eine Entscheidung (z.B. ja / nein) (Horner & Henson, 2009).

Um eine Antwort geben zu können muss zunächst eine initiale Klassifikation des Objektes stattfinden. Diese Klassifikation muss dann in eine Antwort übertragen werden (Entscheidung) und diese Entscheidung in Form einer motorischen Aktion betätigt werden (Henson et al., 2014).

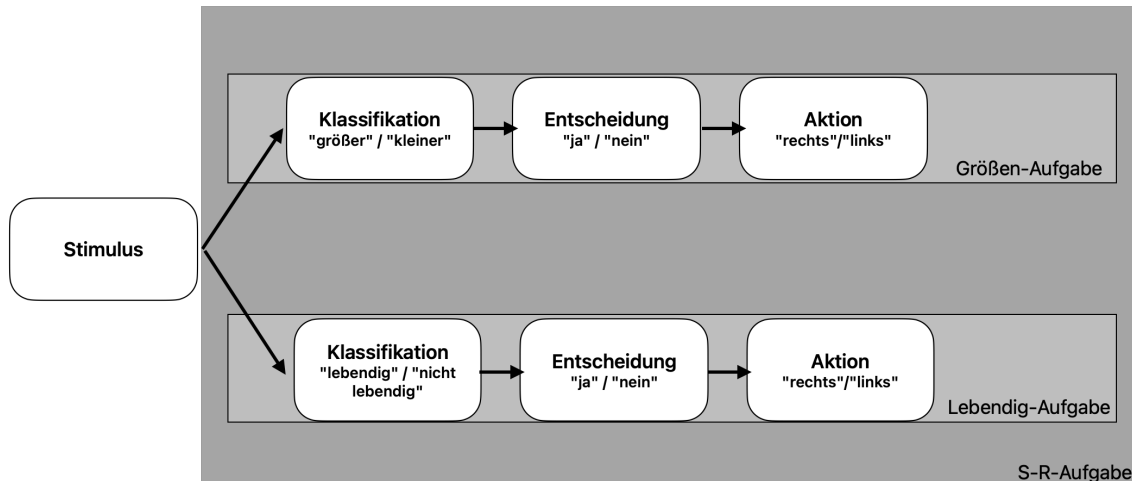


Abbildung 2: S-R-Lernen. Schematische Darstellung einer Reiz-Reaktions-Assoziation und der drei Abstraktionen je Stimulus. Graphik in Anlehnung nach Henson et al. (2014).

Es konnte gezeigt werden, dass bekannte Stimuli sowohl in derselben aber auch über verschiedenen Aufgaben hinweg schneller und genauer mit der Aktion beantwortet werden können als neue Stimuli – der nötige kognitive Aufwand ist reduziert (Dobbins et al., 2004). Neben dem positiven Bindungseffekt des Stimulus in derselben Aufgabe kommt es bei abweichenden Aufgabenkontext zu einem Verknüpfungskonflikt (negative Bahnung), da zunächst die bestehende S-R-Verbindung gelöst und neu verknüpft werden muss. Es kommt zu einer Verlängerung der Reaktionszeit, zu sogenannten Wechselkosten (*task switch costs*): Bei einem Wechsel z.B. des Aufgabenkontextes, etwa einer anderen Klassifikation (statt „kleiner / größer“ z.B. „lebendig / nicht lebendig“) oder einer gegensätzlichen Klassifikation (statt „kleiner als“ / „größer als“), kommt es zum Verknüpfungskonflikt und damit zu einer Verlängerung der Reaktionszeit (Colzato et al., 2006; Horner & Henson, 2009; Rogers & Monsell, 1995).

Horner und Henson (2009) untersuchten dabei die einzelnen Abstraktionsebenen. Zur klaren Abtrennung der Entscheidungsebene wurden drei Gruppen betrachtet: Gruppe 1 hatten keinen Wechsel des Aufgabenkontexts. Gruppe 2 hatte dieselbe Entscheidung, aber eine unterschiedliche Aktion (Verbalisierung der Entscheidung anstelle einer motorischen Aktion) im zweiten Durchlauf. Gruppe 3 hatte eine unterschiedliche Entscheidung und eine unterschiedliche Aktion (Objekt sollte benannt werden).

Wurde die Aktion wiederholt zeigte sich eine signifikant bessere Assoziation als bei einer veränderten Aktion. Ebenso zeigte sich eine signifikant bessere Assoziation, wenn die Entscheidung wiederholt wurde gegenüber einer Veränderung dieser Entscheidung (Horner & Henson, 2009).

Sie untersuchten ebenso die Prozesse, die sowohl in Bezug auf die Klassifikation als auch auf die Entscheidung oder aber nur in der Klassifikation inkongruent waren. Wurde in der ersten Sitzung zum Beispiel gefragt, ob ein Affe größer als eine Schuhbox (Klassifikation: größer als Schuhbox, Entscheidung: ja) sei, wurde in der zweiten Sitzung danach gefragt, ob ein Affe größer als ein Mülleimer (Klassifikation: größer als Mülleimer, Entscheidung: nein) sei – sowohl Klassifikation als auch Entscheidung waren inkongruent. Wenn in der zweiten Sitzung stattdessen gefragt wurde, ob ein Affe kleiner als ein Müllereimer (Klassifikation: kleiner als Mülleimer, Entscheidung: ja) war die Entscheidung trotz anderer Fragestellung dieselbe. Sie zeigten eine signifikant bessere Bahnung bei der kongruenten Entscheidungs-Fragestellung als bei der inkongruenten (Horner & Henson, 2009)

Beim Lernen werden neben den Assoziationen auch die Lernumgebung, der Umgebungskontext, enkodiert. McDonald et al. (2001) zeigte in einer *S-R*-Studie mit einer Gewohnheitsaufgabe an Ratten, dass der Umgebungskontext einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Versuchstiere ohne Wechsel des Umgebungskontextes zeigten eine höhere Richtigkeit und schnellere Leistung als die Versuchstiere, deren Umgebungskontext sich veränderte. Diese benötigten länger, bis sie dieselbe Leistung erzielen konnten, wodurch gezeigt wurde, dass die generelle Reiz-Reaktions-Assoziation in verändertem Umgebungskontext noch intakt war aber zeitlich länger benötigte. Ein Umkehrlernen, also ein Wechsel des Aufgabenkontexts, dagegen war verbessert, wenn es in einem anderen Kontext als dem Trainingskontext stattfand (McDonald et al., 2001). Im Gegensatz zu der in unseren Versuchen verwendeten Priming-Aufgabe konzentrierten sie sich auf das langfristige Gewohnheitslernen.

S-R-Lernen zeigt kurzfristig bereits wenige Sekunden nach der Bahnung seine Effekte: Sowohl die Stimulus-Klassifikations-Assoziation als auch die Stimulus-Aktions-Assoziation sind verbessert. Diese Effekte sind additiv, beeinflussen sich also nicht gegenseitig – sie schließen sich weder gegenseitig aus, noch verstärken sie sich gegenseitig. Mittelfristig zeigt sich, dass auch 24 Stunden nach zweifacher Präsentation bei der Bahnung noch Stimulus-Klassifikations-Assoziationen nachweisbar sind. Für Stimulus-Aktions-Assoziationen war dies nicht der Fall. Langfristig zeigen sich auch nach einer Woche noch Spuren der Bahnungsassoziationen, wobei die Stärke dieser Effekte mit davon abhing, wie oft die Teilnehmer ähnliche Aufgaben in der Zwischenzeit durchgeführt hatten. S-R-Assoziationen bleiben mit bis zu einer Woche nach initialer Bahnung deutlich länger bestehen als zunächst angenommen. Dabei scheinen unterschiedliche Konsolidierungsprozesse für die unterschiedlichen Assoziationen durchlaufen zu werden und unterschiedlich lange bestehen zu bleiben (Moutsopoulou et al., 2018).

1.3 Schlaf und Gedächtnisbildung

Die bedeutende Rolle des Schlafes auf das deklarative und prozedurale Gedächtnis wurde in zahlreichen Studien belegt (Born et al., 2006; Diekelmann & Born, 2010; Walker & Stickgold, 2006). In Studien wird zumeist der Schlaf zwischen Enkodierung und Abruf untersucht, wobei sich ein positiver Effekt von Schlaf im Vergleich zum Wachsein erkennen lässt (Plihal & Born, 1997). Dabei ist auch die Schlafphase von Bedeutung: Hippokampal-vermittelte, deklarative Gedächtnisinformationen profitieren besonders von Non-REM-Schlaf. Nicht-hippokampale, prozedurale und emotionale Gedächtnisinformationen hingegen profitieren hingegen eher von REM-Schlaf (Born et al., 2006; Rasch & Born, 2013).

Durch die Reaktivierung von neu enkodierten Informationen während des SWS wird eine Integration ins Langzeitgedächtnis ermöglicht. Diese Kommunikation zwischen Neokortex und Hippocampus geschieht typischerweise während des SWS (Rasch & Born, 2013).

Die Rolle des Schlafes in der Gedächtniskonsolidierung wurde mit verschiedenen Theorien erklärt.

Die vor allem zu Beginn der Schlafforschung dominierende Interferenztheorie begründet den positiven Effekt von Schlaf mit einer passiven Schutzrolle. Vergessen komme dadurch zustande, dass neue Informationen erlernt würden und die alten Gedächtnisspuren überschreiben (Rasch & Born, 2013). Durch die Reizabschirmung während des Schlafes und damit keinen hinzukommenden Informationen (=keine Interferenzen) werden die neu erworbenen Gedächtnisinformationen geschützt (Ellenbogen et al., 2007a; Jenkins & Dallenbach, 1924; Rasch & Born, 2013). Dagegen spricht, dass sich ein zeitlicher Zusammenhang bei dem Effekt von Schlaf auf die Gedächtnisbildung zeigt. Ein kürzerer zeitlicher Abstand zwischen Schlaf und Enkodierung wirkt sich positiv auf die Gedächtnisleistung aus, auch wenn die Dauer der Schlafperiode und der Zeitpunkt des Abrufes gleich ist (Diekelmann & Born, 2010; Gais et al., 2006; Rasch & Born, 2013). Die Konsolidierung während des Schlafes fördert ebenso eine qualitative Veränderung der Informationen, die Informationsabstraktion, so dass zum Beispiel logische Kombinationen schneller erkannt werden können (Diekelmann & Born, 2010; Ellenbogen et al., 2007b; Wagner et al., 2004). Auch, dass das Schlafstadium – SWS oder REM-Schlaf – zu unterschiedlichen Ergebnissen führte zeigt, dass Schlaf nicht nur eine passive Rolle haben kann (Rasch & Born, 2013).

Die neuere Konsolidierungshypothese sieht Schlaf hingegen in einer aktiven Rolle. Dabei unterscheidet man ob der Schlaf nur eine geeignete Umgebung bietet, dass die ohnehin verfügbaren Konsolidierungsabläufe effektiver stattfinden können, weil im Schlaf weniger Interferenzen vorhanden sind (permissive Konsolidation) oder das nach heutigem Stand der Forschung aktuelle Konzept, in dem Schlaf als aktiver Prozess betrachtet wird, in welchem die Konsolidierung aktiv durch den Schlaf gefördert wird. Hierbei kommt der wiederholten Reaktivierung von neugelernten Informationen während des SWS und den Schlafspindeln eine zentrale Rolle zu (Ellenbogen et al., 2007a; Wei et al., 2018). Die Gedächtniskonsolidierung findet nicht in einem Schlafstadium isoliert statt, sondern in verschiedenen Schlafstadien, die sich durch

neurophysiologische Mechanismen unterscheiden (Diekelmann & Born, 2010). Es zeigte sich, dass im Rahmen der deklarativen Gedächtniskonsolidierung eine positive Korrelation mit SWS vorliegt, wobei das Erlernen von deklarativen Informationen somit vermehrt in den früheren Schlafphasen mit vermehrtem Tiefschlaf stattfindet (Plihal & Born, 1997).

Die Zwei-Prozess-Hypothese beschreibt, dass unterschiedliche Schlafstadien an der Konsolidierung unterschiedlicher Arten von Informationen beteiligt sind. Dabei wird angenommen, dass der SWS vor allem bei hippokampal-abhängigen, deklarativen Informationen eine wichtige Rolle spielt, wohingegen der REM-Schlaf bei prozeduralen Informationen eine wichtige Rolle spielt (Ackermann & Rasch, 2014; Rasch & Born, 2013; Rauchs et al., 2005).

Die sequenzielle Hypothese dagegen fokussiert auf die zyklische Abfolge von Non-REM- und REM-Schlaf. Sie geht davon aus, dass die erste Verarbeitung während SWS stattfindet (z.B. Relevanz) und die zweite Verarbeitung von den zuvor verarbeiteten Informationen während des REM-Schlafes (Ambrosini & Giuditta, 2001; Rasch & Born, 2013; Rauchs et al., 2005). Dafür spricht, dass Studien mit gezielter Störung des Schlafzyklus eine Verschlechterung des Lernerfolges im Vergleich zu Proband*innen mit normal ablaufenden Schlafzyklen zeigen (Ficca et al., 2000).

1.3.1 Kurzschlaf und Gedächtnis

In Studien konnte bereits gezeigt werden, dass auch Kurzschlaf sich positiv auf deklarative Gedächtnisinhalte auswirkt (Lahl et al., 2008; Tucker et al., 2006). So zeigt sich bereits nach einem 6-minütigen Kurzschlaf eine deutliche Verbesserung der deklarativen Merkfähigkeit (Diekelmann & Born, 2010; Lahl et al., 2008). Kurzschlaf mit viel SWS zeigt eine Verbesserung des deklarativen Gedächtnisses für Bilder- oder Wort-Paare (Diekelmann et al., 2009).

Auch für prozedurale Gedächtnisinhalte zeigt ein Kurzschlaf in Abhängigkeit von S2 eine ähnliche Verbesserung der Performance bei einer motorischen Lernaufgabe wie eine komplette Schlafnacht (Medrick & Drummond, 2009). Kurzschlaf, der sowohl SWS als auch REM-Schlaf beinhaltet, führte bei einer

prozeduralen Textur-Unterscheidungsaufgabe zu einem ähnlichen Lernerfolg wie eine ganze Nacht an Schlaf (Mednick et al., 2003).

Auch beim Kurzschlaf zeigen sich heterogene Ergebnisse bezüglich der Dauer des Kurzschlafes und der benötigten Schlafphasen um einen Lernerfolg zu erzielen: Während Lahl et al. (2008) zeigten, dass der 6-minütige Kurzschlaf der Wachgruppe überlegen war und somit bereits ab Schlafbeginn ein Konsolidierungsprozess ablaufen muss, der dann mit zunehmender Schlafdauer zunimmt, berichten Mednick et al. (2003) vor allem von einem Lernerfolg bei längerer Dauer wenn SWS und REM vorliegen. Auch Leong et al. (2023) berichten von einem größeren Lernerfolg bei einem 30-minütigen Kurzschlaf. Sie fanden keine Assoziation zwischen den Schlafphasen und der Erinnerungsleistung.

1.4 Virtuelle Realität

Eine Virtuelle Realität (VR) beschreibt eine Computertechnologie, in welcher eine virtuelle Umgebung wie in der realen Welt erkundet und mit der interagiert werden kann (Wölfel, 2023).

Die Einteilung der VR erfolgt in die nicht immersive VR und die immersive VR. Unter Immersion versteht man, wie gut der Nutzer in die VR eintauchen kann. Die Unterscheidung wird vor allem durch das Darstellungsmedium und die Immersion anhand dynamischer Anpassungen der Kopfposition gefällt, wobei nicht immersive VR meist auf Bildschirmen dargestellt werden und immersive VR mittels *Cave Automatic Virtual Environment* oder kopfgetragene Displays (*head-mounted displays, HMD*). Ein *HMD* ist meist kombiniert mit einem integrierten *Tracking*-System. Aufgrund der geschlossenen Bauform und der damit vollständigen Abgrenzung des Nutzers zur Umgebung sowie meist einer dynamischen Anpassung der Kopfposition kommt es zu einer guten Immersion (Dörner et al., 2019).

Bei der nicht immersiven VR nimmt der Anwender diese eher als Beobachter wahr und durch die nicht vollständige Umgebung der digitalen Inhalte bleibt der Anwender sich der Abgrenzung zwischen VR und echter Welt bewusst. Dies

geschieht zum Beispiel bei Betrachtung der virtuellen Umgebung auf einem Display als Ausgabegerät. Die immersive VR dagegen schafft die Wahrnehmung als Teilnehmer und vollständige Illusion der Anwesenheit in der Umgebung. Äußere Einflüsse sind weitestgehend ausgeschlossen, so dass ein geringeres Ablenkungspotential besteht (Wölfel, 2023).

In der Schlafforschung ist die VR auch bei Schlafproblemen Gegenstand aktueller Forschung: schlafgestörte Proband*innen zeigten eine Verbesserung der Schlafqualität bei beruhigender Nutzung von VR. Die 20-minütige Nutzung einer relaxierenden natur-basierenden VR mittels *HMD* und Audiosystem zeigte eine signifikante Verbesserung des Schlafes (Chitra & Eremita, 2023). Durch den verbesserten Schlaf zeigt sich dann auch eine kognitive Verbesserung (Wan et al., 2024).

1.4.1 VR-Krankheit

Die VR-Krankheit bezeichnet eine unerwünschte Nebenwirkung bei der Nutzung immersiver Medien. Sie zeigt eine Vielfalt von Symptomen wie allgemeines Unwohlsein, Übelkeit, Schwindel, Kopfschmerzen, Orientierungslosigkeit, Schläfrigkeit, Schweißausbrüche, Blässe und Erbrechen (Dörner et al., 2019). Bereits die visuelle Darstellung einer Bewegung reicht aufgrund der Diskrepanz zwischen Bild und Bewegung aus, um die VR-Krankheit auszulösen. Sie kann bereits während der VR-Nutzung auftreten, aber auch erst nach Absetzen des *Headsets* (Wölfel, 2023). Andere Auslöser für die VR-Krankheit können sogenannte unnatürliche Szenenbewegungen sein, zum Beispiel bei schnellen Kopfbewegungen, wenn die Latenzzeit des Bildes zu hoch ist oder eine ungenaue Kalibrierung, die mit einem unpassenden Sichtfeld, einem *Trackingfehler* oder ähnlichem einhergeht. Bereits die normale Nutzung von Bildschirmen kann zu einer Überanstrengung der Augen und damit zu Kopfschmerzen führen - dies kann aufgrund des kürzeren Abstandes zwischen Auge und Display bei einem *HMD* verstärkt sein (Dörner et al., 2019). Durch eine langsame Gewöhnung kann das Auftreten von VR-Krankheit vermieden werden (McCauley & Sharkey, 1992).

Als aktuell gängigste Erklärung für die Auslösung der VR-Krankheit gilt die Theorie der Sinneskonflikte. Wenn die Umgebung so verändert ist, dass eingehende Informationen verschiedener Sinnesmodalitäten (visuell, vestibulär, auditiv) nicht miteinander vereinbar sind, entsteht die VR-Krankheit (Dörner et al., 2019). Andere Erklärungsversuche begründen die VR-Krankheit damit, dass man mit ungewohnten Situationen nicht zurechtkommt und es zu einer Störung in der Körperhaltungskontrolle kommt (Ricchio & Stoffregen, 1991).

Zum Erfassen des Auftretens und des Schweregrades der VR-Krankheit kommen meist Fragebögen zum Einsatz. Der *Simulator Sickness* Fragebogen von Kennedy et al. (1993) wird hierbei besonders häufig verwendet (Chang et al 2020). Aufgrund der multiplen Fragen wurden auch kürzere Fragebögen entwickelt, wozu die Elendsskala (*Misery scale, MISC*) von Bos et al. (2005) zählt.

1.4.2 Immersives Lernen

Immersives Lernen bezeichnet eine Lernmethode, bei welcher digitale Technologien wie VR genutzt werden, um den Anwender beim Erlernen von verschiedenen Fähigkeiten, sowohl motorische als auch sensorische zu unterstützen (Wölfel, 2023; Zender et al., 2018). VR beim Lernen bietet multiple Vorteile: Gefahrensituationen, ethisch-kritische Situationen, physikalische Unzugänglichkeiten und Zeitreisen sind problemlos möglich (Freina & Ott, 2015; Zender et al., 2018). Immersive VR kann hierbei eine authentische Lernumgebung darstellen.

Die Studienlage zum immersiven Lernen stellt sich heterogen dar. Immersives Lernen kann zu einem besseren Wissenstransfer, besserem Wissensbehalt und besserer Aufgabenmotivation führen (Calvert & Abadia, 2020) und dem traditionellen Lernen überlegen sein (Coban et al., 2022). Andere Studien hingegen zeigen keinen signifikanten Unterschied zu einem normalen Lernprozess (Leder et al., 2019). Generell scheint der Erwerb von psychomotorischen Fähigkeiten in VR besser als der Erwerb deklarativen Wissens (Jensen & Konradsen, 2018; Radianti et al., 2020). Die VR-Krankheit

kann zu einer negativen Beeinflussung des Lernerfolges führen (Jensen & Konradsen, 2018). Flannery und Walles (2003) untersuchten mit situationstypischen und -untypischen Gegenständen Unterschiede zwischen einer VR-Gruppe und einer 2D-Gruppe. Es zeigte sich, dass die 2D-Gruppe bei der Wiedererkennung der Gegenstände zwar besser abschnitt als die VR-Gruppe, aber kein statistisch signifikanter Unterschied vorlag.

Zusätzliche Ablenkungen der multimodalen Umgebung könnten zu einer vermehrten Prozessierung und Selektion führen, was wiederum zu einer kognitiven Überbelastung führen kann. So kann zum Beispiel das Lernen zwischen verschiedenen Bildschirmen zu einer zusätzlichen Ablenkung führen und dadurch den Lernerfolg schwächen (Moreno & Mayer, 2007).

Makransky und Petersen (2021) beschreiben das kognitiv-affektive Modell des immersiven Lernen (*Cognitive Affective Model of Immersive Learning, CAMIL*). *CAMIL* geht grundsätzlich davon aus, dass Motivations- und Lernergebnisse aus weniger immersiven Medien auf Lernen in immersiveren Medien übertragbar sind. Zwei wichtige Faktoren hierfür sind die Präsenz und das Gefühl der Handlungsfähigkeit in der VR, denn diese wiederum beeinflussen das Interesse des Lernenden, die intrinsische Motivation, die Selbstwirksamkeit, die Verkörperung, die kognitive Belastung und die Selbstregulation. All dies wiederum beeinflusst den Erwerb von deklarativem, konzeptuellen und prozeduralem Wissen und damit den Lerntransfer und das Lernergebnis.

Die kognitive Belastung, besonders in einer immersiven VR-Umgebung, könnte aber erhöht sein und zu einem geringeren Lernerfolg führen: So wurde z.B. bei der Simulation einer Operation die Reaktionszeit auf einen auditorischen Reiz gemessen. Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Gruppe, die in immersiver VR lernte und der Gruppe, die in nicht-immersiver VR (zweidimensional, 2D) lernte, wobei die Gruppe der immersiven VR eine höhere kognitive Belastung zeigte. Dies könnte durch eine erhöhte Ablenkung durch die immersive VR begründet werden. Die VR-Gruppe benötigte im Mittel signifikant länger (533 Sekunden) als die 2D-Gruppe (409 Sekunden) und hatte einen im Mittel höheren Blutverlust (190 ml VR, 140 ml 2D) (Frederiksen et al., 2020). Im

Vergleich der kognitiven Belastung bei einer komplexen motorischen Aufgabe zeigte die immersive VR-Gruppe gegenüber der konventionellen VR-Gruppe ebenfalls eine höhere kognitive Belastung. Das explizite Lernen der immersiven VR-Gruppe war den Lernenden über Computerbildschirm unterlegen (Juliano et al., 2022).

1.5 Fragestellung

Die vorliegende Arbeit ist Teil eines Forschungsprojektes, in dem untersucht wird, welche Rolle aufgabenrelevante und nicht-aufgabenrelevante Kontextmerkmale für die Gedächtniskonsolidierung im Schlaf- und im Wachzustand spielen. Für die vorliegende Arbeit wurden nur Daten derjenigen Versuchsgruppen betrachtet, bei denen der Abruf des Erlernten im selben Umgebungskontext wie das ursprüngliche Lernen stattfand.

Dabei vergleicht die Arbeit die Gedächtnisleistung beim *S-R*-Lernen einer Schlafgruppe mit der einer Wachgruppe. Wir erwarten aufgrund früherer Ergebnisse mit einer ähnlichen Aufgabe, dass die durch Bahnung angelegten Gedächtnisspuren in der Schlafgruppe besser konsolidiert werden. Die Überprüfung dieser Hypothese ist notwendig, da ein solcher Effekt bisher nur für Nachtschlaf, nicht aber für Kurzschlaf während des Tages gezeigt wurde.

Weiterhin erwarten wir, dass Schlafmenge und -tiefe mit einem verbesserten Ergebnis im *S-R*-Lernen korreliert sind. Dieser Zusammenhang sollte sich sowohl im Hinblick auf die Dauer des Schlafs insgesamt sowie der einzelnen (Non-REM) Phasen zeigen, als auch im Sinne einer Korrelation zwischen Lernerfolg und Spindelzahl und -dichte.

Schließlich vergleichen wir explorativ, ob sich Lernen und Abruf in der VR-Umgebung von den Ergebnissen an einem normalen Computer-Bildschirm unterscheiden. Aufgrund der unklaren Ergebnisse in der Literatur kann keine klare Vorhersage über die Richtung dieses Unterschieds gemacht werden.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsteilnehmer*innen

2.1.1 Gruppengröße und -struktur

Für das Projekt wurde eine effektive Gruppengröße von $N = 66$ Proband*innen festgelegt, wofür in Summe $N = 68$ Proband*innen untersucht wurden. Die Berechnung der Stichprobengröße wurde mithilfe einer Power-Analyse basierend auf den Effektgrößen vorhergehender Studien (Miao et al., 2023) durchgeführt. An $N = 5$ Proband*innen wurde zuvor der Studienablauf erprobt und optimiert, die Daten dieser Proband*innen sind nicht in die Auswertung eingeflossen. Außerdem wurden Daten von $N = 2$ Proband*innen aufgrund einer zu geringen beziehungsweise keiner Schlafenszeit ausgeschlossen. Insgesamt eingeschlossen wurden damit 54 weibliche, 1 trans*weibliche und 11 männliche Proband*innen (Proband*innenkollektiv im Anhang: Tabelle 3).

Die Proband*innen wurden randomisiert in eine Schlaf- und eine Wachgruppe ($N = 33$ Schlaf, $N = 33$ Wach) unterteilt. Ebenso wurden die Proband*innen als äußere Kontextbedingung in die Wechsel- oder Wiederholungsgruppe randomisiert eingeteilt (siehe Abbildung 3). Die Umgebungskontexte waren vollständig voneinander getrennt, sodass 2D- und VR-Sitzungen jeweils in unterschiedlichen Schlaflaboren und von unterschiedlichen Versuchsleiterinnen durchgeführt wurden. Innerhalb der Umgebungskontexte wurden die Proband*innen erneut randomisiert in vier Gruppen (2D-2D, VR-VR, 2D-VR und VR-2D) unterteilt. Dabei bedeutet 2D-2D, dass die Proband*innen alle Sitzungen im Labor ohne VR durchführten und VR-VR, dass die Proband*innen alle Sitzungen mit VR durchführten. 2D-VR bedeutet, dass die Proband*innen die erste Sitzung im Labor ohne VR und die zweite Sitzung mit VR durchführten. VR-2D bedeutet, dass die Proband*innen die erste Sitzung mit VR durchführten und die zweite Sitzung im Labor ohne VR.

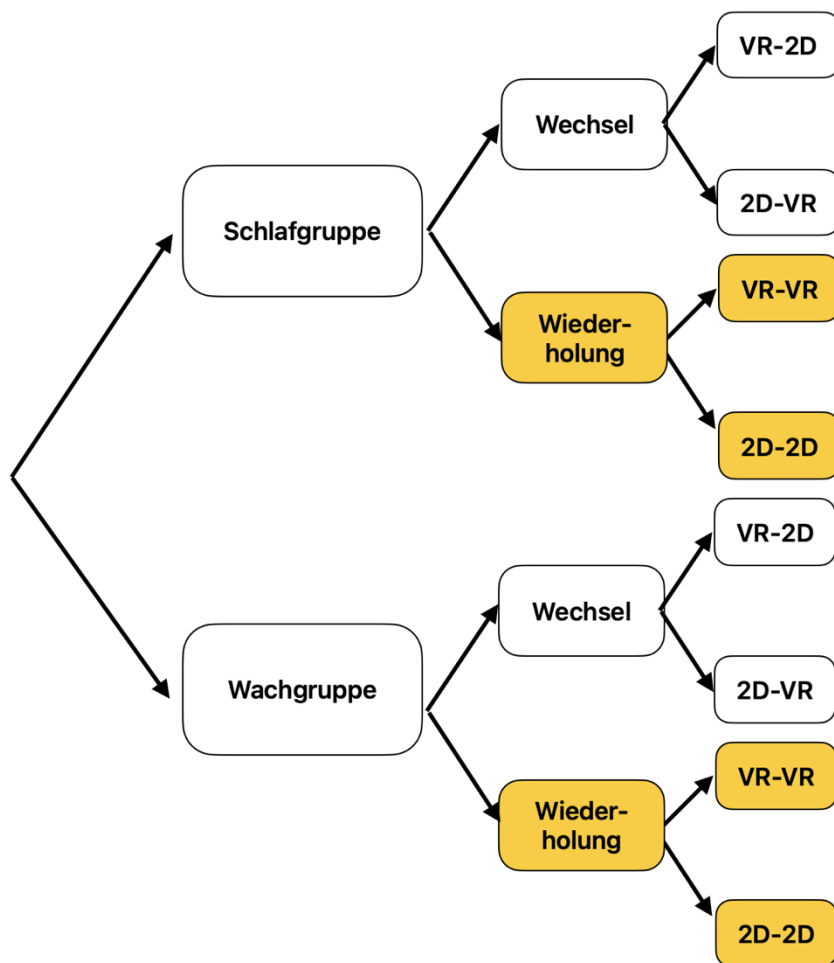


Abbildung 3: Einteilung Proband*innen in Umgebungs- und Aufgabenkontext. Unterteilung der Proband*innen des Gesamtprojektes in Schlaf- und Wachgruppe und äußeren Kontext „Wechsel“ oder „Wiederholung“. Für die vorliegende Arbeit wurden die gelb markierten Gruppen ausgewertet.

Für die vorliegende Arbeit wurden nur Proband*innen berücksichtigt, die ihren Umgebungskontext wiederholten (2D-2D, VR-VR).

Somit wurde für die vorliegende Arbeit für die finale Auswertung $N = 33$ Proband*innen berücksichtigt, wovon $N = 17$ der Schlaf- und $N = 16$ der Wachgruppe zugeteilt waren. $N = 17$ Proband*innen waren dem Umweltkontext 2D-2D zugeordnet, $N = 16$ dem Umweltkontext VR-VR. Von den 33 Proband*innen waren 25 weiblich, 1 trans*weiblich und 7 männlich.

Den Daten der Proband*innen wurden eine Versuchspersonennummer zugeordnet und diese mit einem zufälligen Zahlenwert (= *random seed*) verschlüsselt.

Die in die vorliegende Arbeit eingeschlossene Proband*innen waren zwischen 18 und 35 Jahre alt (Mittelwert $M = 22.69 \pm 2.94$ Jahre).

2.1.2 Ein- und Ausschlusskriterien

Die Proband*innen sollten zwischen 18 und 36 Jahre alt sein, einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus haben, keinen Alkohol- oder Koffeinkonsum ab 3 Tage vor dem Versuchstag sowie eine unkorrigierte oder mittels Kontaktlinsen korrigierte Sehschärfe (aufgrund *HMD*) besitzen.

Weiter waren Hörverlust $>40\%$, schwere körperliche Erkrankungen in den vier Wochen vor geplantem Beginn der Studienteilnahme, anamnestisch neurologische oder psychiatrische Erkrankungen, die eine stationäre oder längerfristige (> 1 Monat) ambulante Behandlung erforderten, Vorliegen eines Schädel-Hirn-Traumas mit Bewusstseinsverlust oder neurologischen Ausfällen Ausschlusskriterien. Ebenso ausgeschlossen wurden Personen, die zuvor bereits an Studien mit denselben Versuchsaufgaben teilgenommen hatten.

Alle Proband*innen gaben an, in der Lage zu sein, Mittagschlaf zu machen und rechtshändig zu sein. Der Visus lag laut den Proband*innen bei 100%, zum Teil mit Korrektur durch Kontaktlinsen. Schlafproband*innen wurden gebeten am Versuchstag, um 5:00 Uhr aufzustehen und dies per SMS zu bestätigen.

2.1.3 Rekrutierung

Die Rekrutierung erfolgte mittels Mailverteiler der Universität Tübingen (im Anhang: Dokument 11). Ein Ethikantrag wurde am 11.10.2023 von der Ethikkommission Tübingen unter der Projektnummer 537/2023BO2 ohne Einwände genehmigt.

Die Proband*innen konnten die Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile beenden. Als Aufwandsentschädigung erhielten die Proband*innen 70 € (12.50 €/h) per Überweisung.

2.2 Versuchsablauf

Alle Proband*innen trafen um 12:30 Uhr am jeweiligen Schlaflabor ein.

VR-Sitzungen und 2D-Sitzungen fanden in vollständig voneinander getrennten Schlaflaboren statt. Es fand keine Adaptationsnacht für die Schlafproband*innen statt (Studiendesign siehe Abbildung 4).

Zu Beginn der ersten Sitzung füllten die Proband*innen zunächst die Einverständniserklärung (im Anhang: Dokument 1) aus und beantworteten Fragen zu ihren persönlichen Daten. Hierbei wurden das Alter und Geschlecht sowie das höchste Bildungsniveau erfasst (im Anhang: Dokument 2). Anschließend folgte der *Edinburgh Handedness Inventory*-Fragebogen (*EHI*, im Anhang: Dokument 3) (Oldfield, 1971), um die Rechtshändigkeit der Proband*innen zu überprüfen. Dann wurde die Stanford Schläfrigkeitsskala (*Stanford Sleepiness Scale*, *SSS*) „Prä-Schlaf“ und die Müdigkeitssymptomskala (*Tiredness Symptom Scale*, *TSS*) vor dem Schlaf erfasst (Hoddes et al., 1973) (im Anhang: Dokument 4). Es folgte der *Pittsburgh Sleep Quality Index* (*PSQI*) (Buysse et al., 1989) (im Anhang: Dokument 5) um die Schlafqualität der Proband*innen zu erfassen und der *Morningness-eveningness Questionnaire* (*MEQ*) (Horne & Ostberg, 1976) (im Anhang: Dokument 6) um den Chronotyp der Proband*innen zu bestimmen. Ebenso füllten die Proband*innen den *Compliance & Health-Check* (im Anhang: Dokument 7) aus.

Die VR-Proband*innen setzten dann die VR-Brille auf. Nach Blickerfassung und Raumvermessung folgte eine Adaptation von circa 2 Minuten, in denen die Proband*innen sich mit der Wüstenumgebung und der VR-Brille vertraut machen konnten. Danach wurden die Proband*innen an den Startpunkt zurückgesetzt und ihnen wurde ein neunminütige, tonlose Tierdokumentation gezeigt, um eine etwaige Beeinflussung des Lernerfolges durch eine möglich auftretende VR-Krankheit zu verhindern.

Anschließend wurde der psychomotorische Vigilanztest (PVT) durchgeführt (Roach et al., 2006), bei den 2D-Proband*innen erfolgte dies direkt im Anschluss an die Fragebögen.

Gegen 13:15 Uhr begann die Enkodierungsphase. Zunächst führten die Proband*innen 16 Übungen durch, um sich an die Fragestellung der Klassifizierung im Hauptexperiment zu gewöhnen und sicher zu stellen, dass sie das Prinzip verstanden hatten. Die in den Übungen gezeigten Reize wurden nicht im Hauptexperiment gezeigt, sodass nicht einige Reize öfter enkodiert wurden als andere. Auf Wunsch konnten die Proband*innen die Übung einmalig wiederholen. Danach wurde das Hauptexperiment wie oben beschrieben durchgeführt.

VR-Proband*innen füllten im Anschluss noch den *Misery Scale (MISC*, im Anhang: Dokument 8) und *Simulator Sickness* Fragebogen (im Anhang: Dokument 9) aus.

Es folgte das Retentionsintervall. Der Schlafgruppe wurden nun die Elektroden der PSG (genaue Durchführung PSG siehe 2.3.3 Polysomnographie) angelegt. Danach wurde dessen Funktion überprüft und anschließend der zweistündige Mittagsschlaf abgehalten. Befanden sich die Proband*innen nach Abschluss der zwei Stunden in einer Tiefschlafphase, so wurde abgewartet, bis diese in S1 oder S2 übergingen, bevor die Proband*innen geweckt wurden.

Die Wachgruppe hatte anstelle des Anlegen des EEG eine Pause bis 14:00 Uhr. Danach durften die Proband*innen Standardaktivitäten im Sinne von Spazieren gehen oder Dokumentarfilme schauen von 14:00 Uhr bis 16:40 Uhr, jedoch nicht schlafen oder essen.

Nach dem Retentionsintervall verließen die Proband*innen das Schlaflabor und kehrten um 17:20 Uhr für die zweite Sitzung in dasselbe Schlaflabor zurück.

Die Abrufphase im Rahmen der zweiten Sitzung begann um 17:20 Uhr und startete erneut aus dem Ausfüllen der SSS „Post-Schlaf“ (im Anhang: Dokument 10). Bei der VR-Gruppe erfolgte erneut Blickerfassung, Raumvermessung und die Adaptation in der Umgebung, sowie die neunminütige Tierdokumentation.

Anschließend folgte, wie bei der 2D-Gruppe, der PVT und der zweite Teil des Hauptexperimentes mit drei Unteraufgaben.

Im Anschluss füllten VR-Proband*innen erneut den *MISC* und *Simulator Sickness* Fragebogen aus.

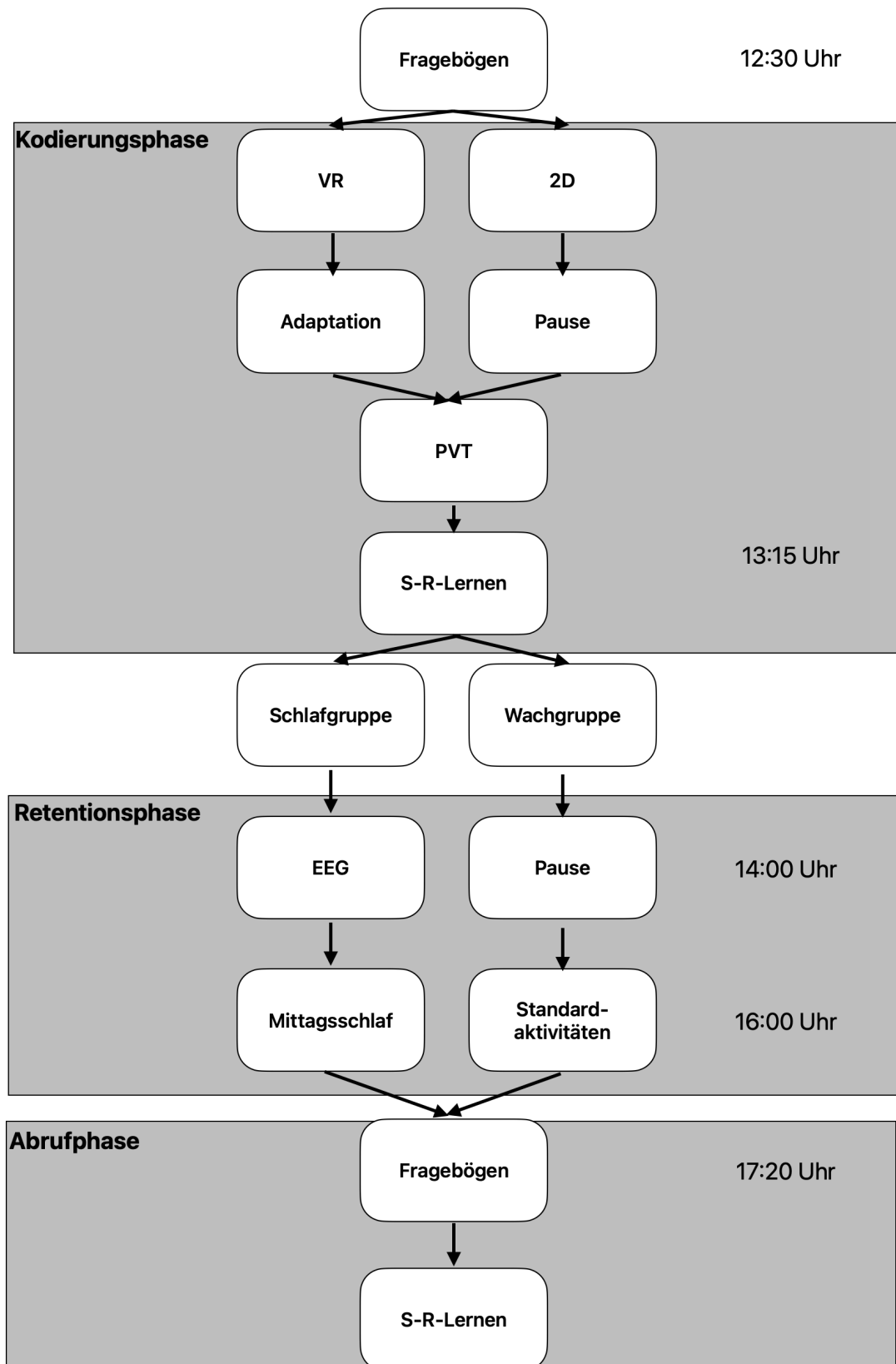


Abbildung 4: Studiendesign. Schematische Darstellung des Ablaufes der beiden Versuchssitzungen.

2.3 Versuchsaufgaben

2.3.1 *Stimulus-Response-Lernen*

In der Enkodierungsphase wurde den Proband*innen 144 Bilder von Alltagsobjekten gezeigt, die aus früheren *S-R*-Experimenten (Miao et al., 2023) ausgewählt wurden. Diese wurden zentriert vor weißem Hintergrund farbig präsentiert in einer Größe von 256 x 256 Pixeln. Bei 2D-Proband*innen erfolgt dies auf einem 1280 x 1024 Pixel, 19“ LCD-Monitor. Bei VR-Proband*innen erfolgt dies durch eine VR-Brille auf einem virtuellen Computerbildschirm. Die Proband*innen befanden sich in einem ruhigen, von natürlichem Licht abgedunkelten Raum, circa 50 cm vom Bildschirm wegsitzend. Als VR-Brille wurde die „Varjo Aero“-Brille verwendet. Die Auflösungsqualität wurde immer auf höchste Stufe (39 PPD) gestellt, sowie die Helligkeit immer auf „100“. Für diese Kalibrierung wurde das Programm „VarjoBase“ verwendet. Die Raumvermessung erfolgte mittels „SteamVR“.

Die virtuelle Umgebung war ein Programm, das von Xiu Miao geschrieben wurde, in welchem die Proband*innen sich frei in einer Wüstenumgebung bewegen konnten. In der Mitte dieser Umgebung befand sich ein Tisch mit Computerbildschirm, auf welchem die Aufgaben gezeigt wurden, wobei die Proband*innen weiterhin mit dynamischen Kopfbewegungen ihren Blick verändern konnten.

In der Enkodierungsphase führten die Proband*innen die *S-R*-Aufgabe durch. Die Fragestellung für die Proband*innen war, die Reize nach einem von zwei Merkmalen zu klassifizieren. Merkmal 1 war die reale Größe des Stimulus mit der Frage, ob diese größer oder kleiner als ein Basketball sei. Merkmal 2 war die Frage, ob der Stimulus einen technischen Mechanismus beinhaltet oder nicht.

Für die Hälfte der Stimuli wurde nach Größe, für die andere Hälfte nach Mechanik gefragt. Jeweils die Hälfte der Reize wird dabei mit einer bestimmten Aktionszuordnung präsentiert (z.B. Taste links für kleiner/mechanisch) und die andere Hälfte mit der anderen Aktionszuordnung (z.B. Taste rechts für kleiner/mechanisch). Die zu betätigenden Tasten waren immer „A“ für linke

Taste, „L“ für rechte Taste. Jeder Reiz wurde in der Enkodierungsphase zwei Mal in zufälliger Reihenfolge gezeigt. Hierbei wurden die Klassifikationszuordnung und die Aktionszuordnung nicht verändert, so dass initiale Reiz-Klassifikations- und Reiz-Reaktions-Assoziation entstanden.

Die in Summe 288 Reize wurden gleichmäßig auf 3 Blöcke mit je 96 Reizen unterteilt. Zwischen jedem Block gab es eine Pause von mindestens 30 Sekunden. Die Proband*innen konnten danach frei entscheiden, wann sie weitermachen wollten.

Vor jedem Stimulus erhielten die Proband*innen einen Hinweis in Form von zwei Buchstaben bezüglich des Merkmals, nachdem klassifiziert werden soll und welche Taste für welche Aussage steht (siehe Abbildung 5).

So bedeuteten die Buchstaben „K“ und „G“, dass die reale Größe des Stimulus im Verhältnis zu einem Basketball einzuschätzen war. Die Buchstaben stehen für „kleiner“ und „größer“. Dabei spielte die Reihenfolge der Buchstaben eine Rolle: Wenn der Hinweis „K + G“ angezeigt wurde, so stand die linke Taste für K und die rechte Taste für G. Wenn „G + K“ angezeigt wurde, so stand die linke Taste für G und die rechte Taste für K.

Analog dazu bedeuteten die Buchstaben „M“ und „N“, dass die Fragestellung war, ob ein technischer Mechanismus vorliegt oder nicht, die Buchstaben stehen für „mechanisch“ und „nicht mechanisch“. Wenn „N + M“ angezeigt wurde, stand die linke Taste für N und die rechte Taste für M. Wenn „M + N“ angezeigt wurde, so steht die linke Taste für M und die rechte Taste für N.

Die Proband*innen wurden während des gesamten Experimentes angewiesen, so schnell und genau wie möglich zu antworten.

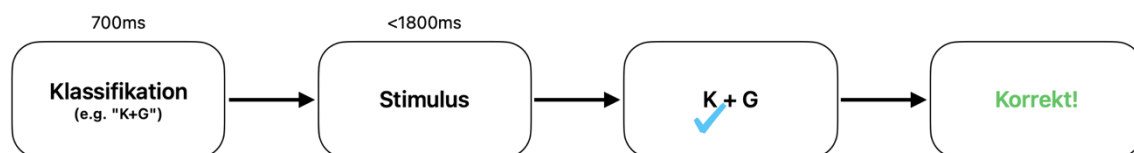


Abbildung 5: Ablauf S-R-Lernen in der Enkodierungsphase. *Bildung von Reiz-Reaktions- und Reiz-Klassifikations-Assoziationen.*

Bei jedem Durchgang startete die Präsentation mit dem Aufgabenhinweis mit den Buchstaben M/N (N/M) oder K/G (G/K), 200 Pixel links und rechts des Fixationskreuzes. Nach 700 ms verschwand der Hinweis und wurde sofort durch den Stimulus ersetzt. Dieser blieb maximal 1800 ms oder bis eine Antwort abgegeben wurde auf dem Bildschirm sichtbar. Nach einer Antwort folgte eine Rückmeldung („richtig“, „falsch“, „keine Antwort“) für 700 ms.

Die Enkodierungsphase benötigte circa 15 Minuten.

Die Abrufphase gliederte sich in drei Teile. Im ersten Teil war die Aufgabe analog zur Enkodierungsphase die Reize nach einem von zwei Merkmalen zu klassifizieren („S-R-Aufgabe“). Die 144 Reize wurden wieder gleichmäßig auf 3 Blöcke verteilt, mit einer Pause von mindestens 15 Sekunden zwischen den Blöcken. Hierbei wurde jeder Reiz nur einmal gezeigt.

Ein Drittel der Reize wurde dabei mit einer anderen Klassifikation, aber mit derselben Aktionszuordnung (*classification switch*), ein anderes Drittel mit derselben Klassifikation aber einer anderen Aktionszuordnung (*action switch*) und das letzte Drittel mit derselben Klassifikation und derselben Aktionszuordnung (*repeat*) präsentiert. Auch hier erhielten die Proband*innen eine Rückmeldung zu ihrer Antwort.

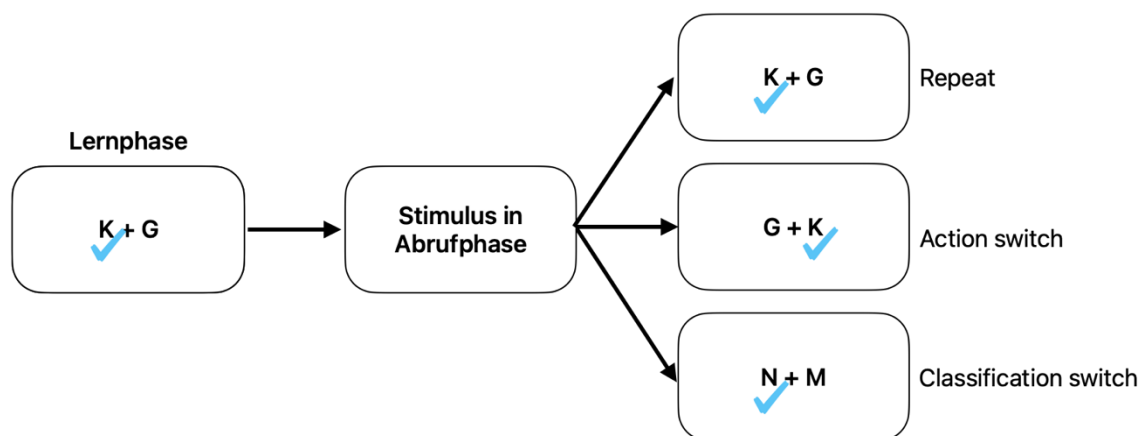


Abbildung 6: Schematische Darstellung der S-R-Aufgabe in der Abrufphase. Abfrage mit den unterschiedlichen Abruf-Bedingungen.

In der zweiten Aufgabe („Wiedererkennungsaufgabe“) mussten die Proband*innen angeben, ob die gezeigten Bilder bekannt („alt“, rechte Taste) oder unbekannt („neu“, linke Taste) aus der vorherigen Sitzung waren. Insgesamt

wurden den Proband*innen 144 unbekannte und 144 bekannte Reize in zufälliger Reihenfolge gezeigt. Nachfolgend wurde nach einer Beurteilung der Sicherheit der Richtigkeit der Antwort (sehr sicher, relativ sicher, unsicher, sehr unsicher) gefragt. Die 288 Reize wurden in drei gleichmäßige Blöcke unterteilt mit einer Pause von mindestens 30 Sekunden zwischen zwei Blöcken.

In der dritten Aufgabe („explizite Gedächtnisaufgabe“) wurden den Proband*innen alle Bilder aus der ersten Sitzung erneut gezeigt und sie sollten entscheiden, nach welcher Klassifikation in der ersten Sitzung gefragt war (Größe / Mechanik). Die Aktionszuordnung (links / rechts) variierte hierbei zufällig. Danach folgte erneut die Beurteilung der Sicherheit der Richtigkeit (sehr sicher, relativ sicher, unsicher, sehr sicher). Aufgeteilt in 3 Blöcke folgte auch hier jedem Block eine Pause von mindestens 30 Sekunden.

2.3.2 Kontrollvariablen

Als Kontrollvariablen wurden der PVT, der *EHI*, die *SSS*, der *PSQI*, der *MEQ* und bei VR-Proband*innen die *MISC* und die *Simulator Sickness-Fragebögen* erhoben.

2.3.2.1 Psychomotorischer Vigilanztest

Zu Beginn jeder Sitzung wurde mit Hilfe des PVT die individuelle Reaktionsgeschwindigkeit der Proband*innen gemessen. Auf einem schwarzen Bildschirm wurde eine graue Zahl mittig zentriert gezeigt und die Proband*innen angewiesen, so schnell wie möglich die Leertaste zu betätigen, wenn die graue Zahl begann hochzuzählen. Sobald dies erfolgte, wurde die jeweilige Reaktionsgeschwindigkeit angezeigt, wonach die Proband*innen ein Feedback zu ihrer Reaktionszeit erhielten. Der Abstand zwischen zwei Messungen variierte in der Länge zufällig. Die Durchführung des PVT benötigte ungefähr fünf Minuten (Roach et al., 2006).

2.3.2.2 *Edinburgh Handedness Inventory*

Mithilfe des *EHI* wurde die dominante Händigkeit der Proband*innen überprüft. Die Proband*innen beantworten hierbei 10 Fragen welche Hand bei Standardaktivitäten wie Zähneputzen oder Schreiben bevorzugt wird sowie je eine Frage zum bevorzugten Fuß und Auge (Oldfield, 1971).

2.3.2.3 *Stanford Schläfrigkeitsskala*

Die Proband*innen sollten ihre aktuelle Schläfrigkeit subjektiv mittels der SSS einschätzen. Diese führt ganzzahligen Werte von 1-7, wobei „1“=sehr wenig schläfrig und „7“=sehr stark schläfrig darstellen (Hoddes et al., 1973).

2.3.2.4 *Pittsburgh Sleep Quality Index*

Der *PSQI* erfasst die subjektive Schlafqualität der Proband*innen. Er erfasst Schlafgewohnheiten wie die Einschlafzeit, die reguläre Schlafdauer, übliche Aufsteh- und Bettzeit sowie über den Zeitraum der letzten vier Wochen aufgetretene Schlafstörungen, Schlafmittelkonsum und Tagesmüdigkeit. Die Fragen 1-4 stellen hierbei Freitextaufgaben dar (z.B. übliche Uhrzeit des zu Bettgehens). Die Fragen 5-10 stellen *Single Choice*-Fragen dar, wobei Frage 5 in mehrere Teilfragen untergliedert ist. Frage 10 erfasst das Schlafarrangement mit einem Partner, wobei diese Frage nicht in die quantitative Auswertung einfließt.

Für die Auswertung wurden die verbliebenen 9 Fragen zu insgesamt 7 Komponenten zusammengefasst, die jeweils einen Wert von 0-3 annehmen können.

Komponente 1: subjektive Schlafqualität (Frage 6)

Komponente 2: Schlafzeit (Frage 2 + Frage 5a)

Komponente 3: Schlafdauer (Frage 4)

Komponente 4: Schlaffeffizienz (Frage 1+ Frage 3+Frage 4)

Komponente 5: Schlafstörungen (Frage 5b-5j)

Komponente 6: Schlafmittelkonsum (Frage 6)

Komponente 7: Tagesmüdigkeit (Frage 8+ Frage 9)

Aus der Summe der 7 Komponenten ergibt sich der Gesamtwert des PSQI, der zwischen 0 und 21 Punkten beträgt. Bei gesunden Schläfern sollte dieser bis 5 Punkte liegen. Schlechte Schläfer liegen bei 6-10. Alle Werte über 10 deuten auf eine chronische Schlafstörung hin (Buysse et al., 1989).

2.3.2.5 Deutscher *Morningness-Eveningness Questionnaire*

Der D-MEQ-Fragebogen von Horne und Östberg erfasst den intraindividuellen Chronotyp der Proband*innen um den Verlauf von Tagesschläfrigkeit berücksichtigen zu können.

Hier beantworteten die Proband*innen 19 subjektive Fragen zu ihrem Schlafverhalten, individuellen Schlafpräferenzen wie der Aufstehzeitpunkt, ihrem Tagesverlauf und ihrer Leistungsfähigkeit. Ebenso wurden die Proband*innen gebeten, sich selbst in einen Chronotypen („Morgentyp“, „Abendtyp“ oder Mischformen) einzuschätzen. Hierfür stehen 14 *Simple Choice*-Fragen zur Verfügung und 5 Fragen mit Uhrzeitskala, auf der die Proband*innen zwischen 0 und 24 Uhr auswählen konnten. Für unterschiedliche Antworten werden unterschiedliche Punktzahlen vergeben.

Aus der Summe der vergebenen Punktzahlen ergibt sich der Gesamtwert des D-MEQ, wobei sehr niedrige Werte bei einem Abendtyp auftreten und sehr hohe Werte bei einem Morgentyp. Mittlere Punktzahlen ergeben den Neutraltyp oder moderate Abend-/Morgentypen (Horne & Ostberg, 1976).

2.3.2.6 *Misery Scale* und *Simulator Sickness*

Der *MISC* erfasst mögliche Symptome der VR-Krankheit. Den Proband*innen standen 11 Antwortmöglichkeiten zu vorliegenden Symptomen zur Verfügung mit unterschiedlich starken Abstufungen (Bos et al., 2005).

Der *Simulator Sickness* Fragebogen umfasst 8 Fragen zu aufgetretenen Symptomen, die jeweils mit „ja, sehr“, „ein wenig“ und „nein“ beantwortet werden

sollten. Hierbei erfasst wurden Kopfschmerzen, Augenüberanstrengung, Fokusschwierigkeiten, Schweiß und erhöhter Speichelfluss, Übelkeit, Schwindel, Verschwommensehen und Fokusschwierigkeiten. Der *Simulator Sickness*-Fragebogen wurde ursprünglich für Flugsimulatoren entwickelt (Kennedy et al., 1993). Auch wenn der *Simulator Sickness*-Fragebogen in VR gerne verwendet wird, ist seine Aussagekraft bezüglich der VR-Krankheit eingeschränkt, da es sich um einen subjektiven Fragebogen handelt und keine Baseline erhoben wird, also keine Erfassung bereits vorliegender Symptome vor der Nutzung der VR durchgeführt wird (Bimberg et al., 2020).

2.3.3 Polysomnographie

Zur Überwachung der Schlafphasen wurde von jeder Schlafproband*in während des Mittagschlafes ein EEG, ein EMG und ein EOG erstellt. Die Aufzeichnung erfolgte mithilfe der Software „BrainVision Recorder“ (Brain Products GmbH).

Für das EEG kamen 9 Elektroden (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4), in drei Dreierreihen angeordnet, nach Vermessung der Kopfoberfläche zum Einsatz. Die Ground-Elektrode befand sich mittig auf der Stirn. Die beiden Referenzelektroden wurden links (TP8) und rechts (TP9) am Processus mastoideus des Os temporale angebracht.

Für das EOG wurde eine Elektrode unterhalb lateral des rechten Auges (EOG1) und oberhalb lateral des linken Auges (EOG2) platziert.

Die Ableitung des EMG erfolgte rechts und links am Ansatz des Musculus mentalis am Kinn (EMG1, EMG2). Die Elektrodenpositionen wurden in der untenstehenden Abbildung (Abbildung 7) schematisch dargestellt.

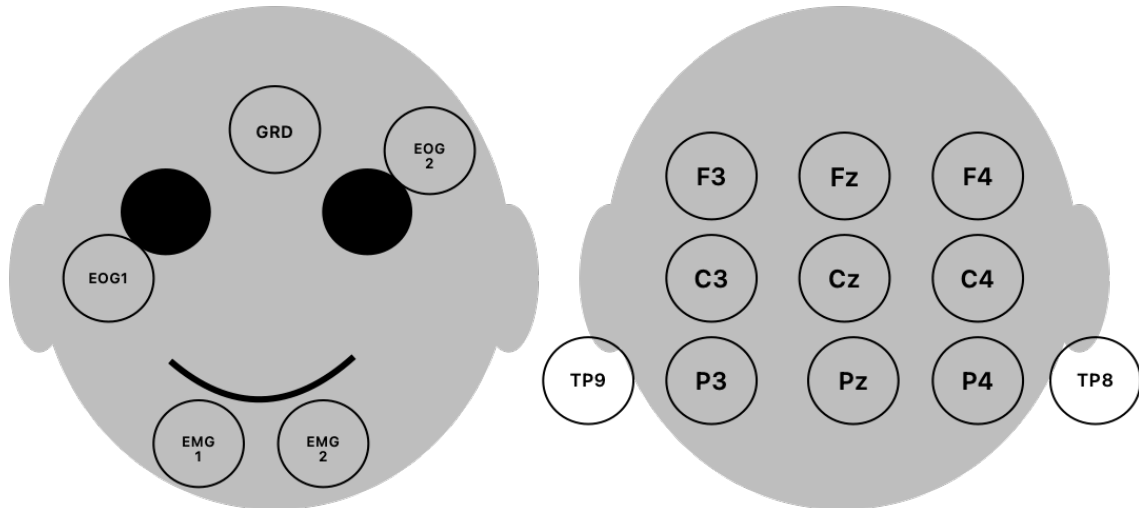


Abbildung 7: Elektrodenpositionen der PSG

Die Auswertung der PSG erfolgte manuell nach den Standardkriterien von Rechtschaffen und Kales. Dabei wurde die Gesamtzeit des Schlafes sowie die unterschiedliche Zeit in den Schlafstadien für jede Schlafproband*in analysiert. Ebenso wurde die Spindelzahl pro Schlafproband*in bestimmt.

2.4 Datenauswertung

Die S-R-Ergebnisse wurden mit MatLab erfasst.

Die Erhebung und Auswertung der Kontrollvariablen erfolgte vor Ort, um die Schlaffähigkeit der Proband*innen, die subjektive Vigilanz und andere Einflussfaktoren wie Kaffeekonsum und damit die Teilnahmefähigkeit an der Studie beurteilen und gegebenenfalls ausschließen zu können.

Bei Betrachtung der Reaktionszeiten und der Wechselkosten wurden für die S-R-Aufgabe nur solche Durchgänge betrachtet, in denen der Stimulus in allen drei Präsentationen (zweimal Enkodierungsphase, einmal Abruf) korrekt beantwortet wurde, um Störungen durch Fehler bei früheren Präsentationen ausschließen zu können. Dabei wurden die unterschiedlichen Arten von Wechselbedingungen (*classification switch*, *action switch*) gemeinsam mit der

Repeat-Bedingung verglichen, da sich bei getrennten Analysen kein Unterschied zwischen den jeweiligen Wechselkosten zeigte.

$N = 2$ Proband*innen wurde hier für die Analyse exkludiert, da ihre Reaktionszeiten mehr als zwei Standardabweichungen über oder unter ihrer individuellen, im PVT ermittelten, mittleren Reaktionszeit lagen. Für die übrigen Versuchspersonen wurde der Einfluss von schnellem Raten und Aufmerksamkeitsschwankungen dadurch reduziert, dass Versuchsdurchgänge ausgeschlossen wurden, die außerhalb von zwei Standardabweichungen um den individuellen Mittelwert in den einzelnen Versuchsbedingungen lagen.

Für die Wiedererkennungsaufgabe und die explizite Gedächtnisaufgabe wurde jeweils $N = 1$ Proband*in ausgeschlossen, da ihre Ergebnisse mehr als zwei Standardabweichungen über oder unter dem Gruppenmittelwert lagen. Auch hier wurden nur solche Durchgänge betrachtet, die während der Enkodierung zweifach korrekt beantwortet wurden.

2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mithilfe des Statistikprogramms *Graphpad* ausgewertet und dargestellt.

Zur Überprüfung der Normalverteilung der jeweiligen Variablen wurde der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt.

Nach Gegebenheit einer Normalverteilung wurde mit parametrischen, unabhängigen, zweiseitigen t-Tests gearbeitet. Bei keiner gegebenen Normalverteilung wurde mit non-parametrischen, zweiseitigen Mann-Whitney-Tests gearbeitet.

Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0.05$ festgelegt.

3 Ergebnisse

3.1 Auswertung der Polysomnographie

Die Auswertung der Schlafdaten zeigte eine durchschnittliche Gesamtschlafzeit aller Schlafproband*innen von 112.76 ± 10.52 Minuten. Dabei verbrachten die Proband*innen ($N = 17$) im Durchschnitt 101.58 ± 7.99 Minuten in der Non-REM-Phase, davon durchschnittlich 23.47 ± 14.21 Minuten in N1, 53.38 ± 14.30 Minuten im N2 und 24.73 ± 15.09 Minuten in N3 und 11.17 ± 8.69 Minuten in der REM-Phase.

Zwei Proband*innen erreichten nicht die REM-Phase, eine Proband*in erreichte nicht den SWS.

	VR		2D	
	M	SD	M	SD
S1	27.43	16.85	19.94	11.23
S2	50.94	20.18	55.56	6.47
SWS	23.88	12.65	25.50	17.73
Non-REM gesamt	102.25	7.93	101.00	8.48
REM gesamt	7.68	4.93	14.28	10.34
Gesamtschlafzeit	109.93	10.74	115.27	10.26

Tabelle 1: Übersicht der Schlafdauer und Schlafstadien

Durchschnittlich Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Stadien S1, S2, SWS sowie Non-REM und REM gesamt, unterteilt in Umgebungskontexte VR (N = 8) und 2D (N = 9) in Minuten

Unterteilt in die Umgebungskontexte (siehe Tabelle 1) zeigte sich, dass die 2D-Gruppe im Durchschnitt geringfügig länger schlief mit 115.27 ± 10.26 Minuten im Vergleich zur VR-Gruppe mit 109.93 ± 10.74 Minuten. Dabei zeigte die VR-Gruppe einen durchschnittlich geringfügig höheren Non-REM-Anteil mit 102.25 ± 7.93 Minuten und $93.25 \pm 4.16\%$ im Vergleich zur 2D-Gruppe mit

101.00 ± 8.48 Minuten und 88.01 ± 8.23%. Obwohl die 2D-Gruppe etwas länger schlief, verbrachte sie etwas weniger Zeit im Non-REM-Schlaf.

Im Vergleich der Mittelwerte der Schlafparameter ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Umgebungsbedingungen, weder für die Gesamtschlafzeit ($t(15) = 1.096$, $p = 0.3113$) noch für den Anteil des Non-REM-Schlafes ($t(15) = 0.3125$, $p = 0.7590$).

3.2 Ergebnisse S-R-Aufgabe

Zur Auswertung der S-R-Aufgabe wurden $N = 31$ Proband*innen betrachtet. $N = 2$ Proband*innen wurden von der Auswertung ausgeschlossen, da ihre Reaktionszeiten mehr als zwei Standardabweichungen über oder unter ihrer individuellen, mittleren Reaktionszeit lagen.

3.2.1 Wechselkosten in Abhängigkeit von Schlaf und Versuchsumgebung

Zur Untersuchung des Einflusses von Schlaf auf das S-R-Lernen wurden die Wechselkosten der Reaktionszeiten in der S-R-Aufgabe in drei Aufgabenkontexten analysiert: *repeat*, *action switch* und *classification switch*.

Hierdurch sollen Effekte negativer Bahnung, die sich in einer erhöhten Reaktionszeit bei Abfrage eines bekannten Stimulus im Aufgabenkontext *action switch* oder mit *classification switch* zeigen würden, betrachtet werden. Je höher die Wechselkosten, desto stärker die ursprünglich angelegte S-R-Assoziation. Für die Analyse wurden die kombinierten Wechselkosten betrachtet.

Wir erwarten, dass im Schlaf eine intensivere Konsolidierung der neu angelegten Gedächtnisspuren stattfinden kann und daher die Wechselkosten erhöht sind. Ebenso betrachten wir, ob sich zwischen den beiden Lernumgebungen, 2D und VR, ein Unterschied in der Konsolidierung der S-R-Assoziationen ergibt.

Zur Ermittlung der kombinierten Wechselkosten wurde die Reaktionszeit (*reaction time*, RT) der Proband*innen in Millisekunden in den unterschiedlichen Aufgabenkontexten *repeat*, *action switch* und *classification switch* erfasst und nach folgender Formel berechnet:

$$\frac{RT \text{ action switch} + RT \text{ classification switch}}{2} - RT \text{ repeat} = \text{kombinierte Wechselkosten}$$

Die sich daraus ergebenden kombinierten Wechselkosten der Reaktionszeit wurden dann für Schlaf- und Wachgruppe bei nicht-normalverteilten Daten mittels *Mann-Whitney*-Test analysiert, wobei sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen ergab ($U = 80$, $p = 0.1278$), aber insgesamt leicht erhöhte Wechselkosten bei der Schlafgruppe vorlagen. Die Proband*innen zeigten beim Abruf eines Stimulus mit verändertem Aufgabenkontext im Median eine durchschnittliche Verlängerung der Reaktionszeit um 13.46 ± 30.58 ms in der Schlafgruppe und lediglich um eine Verlängerung um $5.62 \pm 28,74$ ms in der Wachgruppe.

Bei der Betrachtung der kombinierten Wechselkosten zwischen 2D- und VR-Gruppe ergab sich bei normalverteilten Daten mittels Zweistichproben-t-Test kein signifikanter Unterschied ($t(29) = 0.1825$, $p = 0.8564$). Auch die Mittelwerte der beiden Gruppen lagen im Vergleich nah beieinander – der Umgebungskontext scheint keinen Einfluss auf die Stärke der *S-R*-Assoziation zu haben.

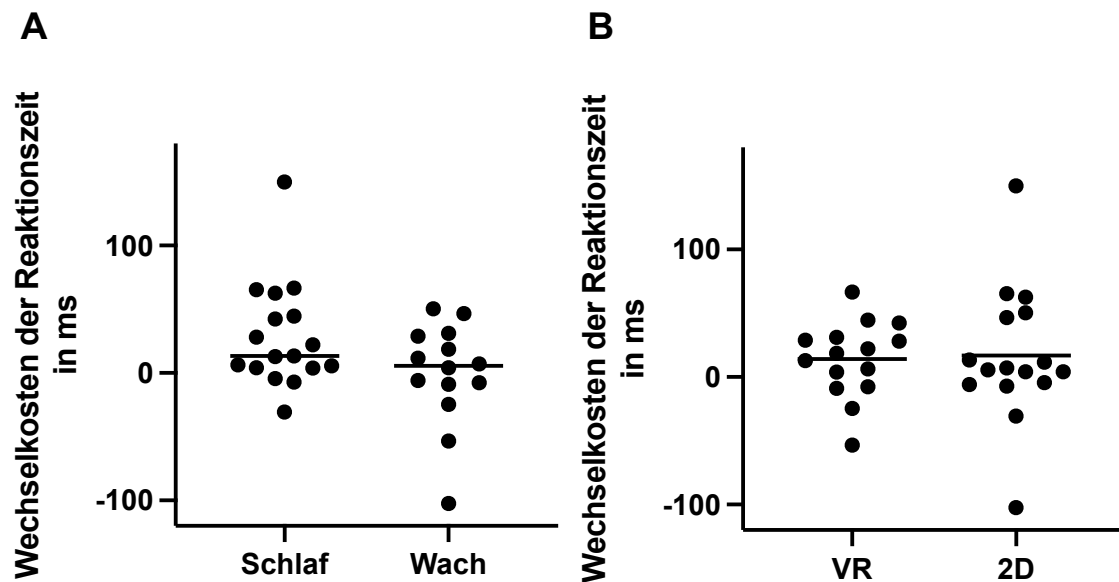


Abbildung 8: Vergleich der kombinierten Wechselkosten der Reaktionszeit

(A) Vergleich zwischen Schlaf- ($N = 17$) und Wach-Gruppe ($N = 14$) mit Median $M = 13.46 \pm 30.58$ ms (Schlafgruppe) und $M = 5.62 \pm 28.64$ ms (Wachgruppe). $U = 80$, $p = 0.1278$

(B) Vergleich zwischen VR-Gruppe ($N = 15$) und 2D-Gruppe ($N = 16$) mit Mittelwerten $M = 14.07 \pm 29.90$ (VR-Gruppe) und Mittelwert $M = 16.93 \pm 53.39$ (2D-Gruppe). $t(29) = 0.1825$, $p = 0.8564$

3.2.2 Einfluss von Mittagschlaf und Lernumgebung auf S-R-Lernen

Bei Betrachtung der S-R-Aufgabe zeigte sich wie erwartet in der Schlafgruppe eine signifikant höhere Richtigkeit ($t(29) = 2.347$, $p = 0.026$) als in der Wachgruppe: Die verbesserte Leistung der Schlafgruppe weist darauf hin, dass Schlaf eine effektivere Konsolidierung der S-R-Assoziationen ermöglicht.

Zur Beurteilung eines Vor- oder Nachteils einer Lernumgebung wurde die Richtigkeit der S-R-Aufgabe zusätzlich noch unabhängig von der Unterteilung in Schlaf- und Wachgruppe für 2D- und VR-Gruppe mittels Mann-Whitney-Test analysiert, wobei sich kein signifikanter Unterschied zwischen 2D- und VR-Gruppe ergab und auch keine Tendenz eines Vor- oder Nachteils einer Lernumgebung.

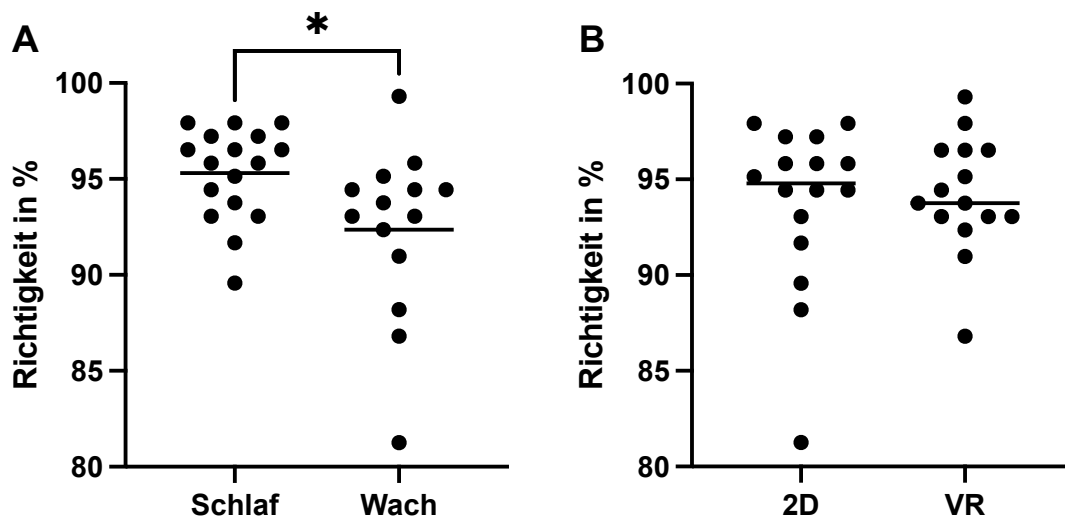


Abbildung 9: Einfluss von Schlaf auf S-R-Lernen

(A) Vergleich der Richtigkeit der S-R-Aufgabe zwischen Schlaf- ($N = 17$) und Wach-Gruppe ($N = 14$) mit Mittelwert $M = 95.30 \pm 0.02$ % (Schlafgruppe) und $M = 92.36 \pm 0.04$ % (Wachgruppe). $t(29) = 2.347$, $p = 0.026$

(B) Vergleich der Richtigkeit der S-R-Aufgabe zwischen 2D- ($N = 16$) und VR-Gruppe ($N = 15$) mit Median $M = 94.79$ % (2D-Gruppe) und $M = 93.75 \pm 3.12$ % (VR-Gruppe). $U = 112$, $p = 0.7620$

3.2.3 Einfluss von Schlafmenge und -tiefe auf S-R-Lernen

Bei der Überprüfung eines Zusammenhangs zwischen der Schlafmenge und dem Einfluss von Schlafspindeln auf eine verbesserte Leistung in der S-R-Aufgabe wurden die Schlafdaten von $N = 17$ Schlafproband*innen, unabhängig von der Lernumgebung, berücksichtigt.

Zwischen der Gesamtschlafdauer der Proband*innen und der jeweiligen Genauigkeit der unterschiedlichen Aufgaben ergab sich keine statistische Signifikanz.

Für die Auswertung eines Zusammenhangs zwischen der Spindeldichte und dem Lernerfolg wurde die Spindelzahl je Schlafphase bestimmt und die Spindeldichte pro Proband*in und pro Region berechnet. Hierfür wurde der Mittelwert der Spindelzahl pro Region und pro Schlafphase berechnet und anschließend mit der individuellen Schlafzeit der jeweiligen Schlafphase multipliziert. Anhand der

Spindelzahlen wurde dann die totale Non-REM-Spindeldichte mittels folgender Formel berechnet:

$$\frac{\text{Spindelzahl N2} + \text{Spindelzahl N3}}{\text{Schlafdauer N2} + \text{Schlafdauer N3}} = \text{Non-REM-Spindeldichte}$$

Es ergaben sich im Durchschnitt für Frontal 1.65 ± 0.95 Spindeln pro Minute, für Zentral 1.68 ± 0.96 Spindeln pro Minute und für Parietal 1.73 ± 0.89 Spindeln pro Minute.

	VR		2D	
	M	SD	M	SD
Frontal	1.28	0.49	1.98	1.16
Zentral	1.33	0.38	1.99	1.22
Parietal	1.33	0.41	2.08	1.06

Tabelle 2: Übersicht der durchschnittlichen Spindeldichten pro Minute und pro Region

Durchschnittlich Mittelwerte (M) der Spindeldichten pro Minute, unterteilt in Umgebungskontext und Region

Die sich für die Proband*innen individuell daraus ergebenden Werte für Frontal, Zentral und Parietal wurden dann in einer Korrelation den kombinierten Wechselkosten gegenübergestellt. Für die frontalen und die parietalen Bereiche lag eine positive Korrelation mit $p = 0.0014$ (frontal) respektive $p = 0.0321$ (parietal) vor. Für die zentrale Spindeldichte lag keine Korrelation vor.

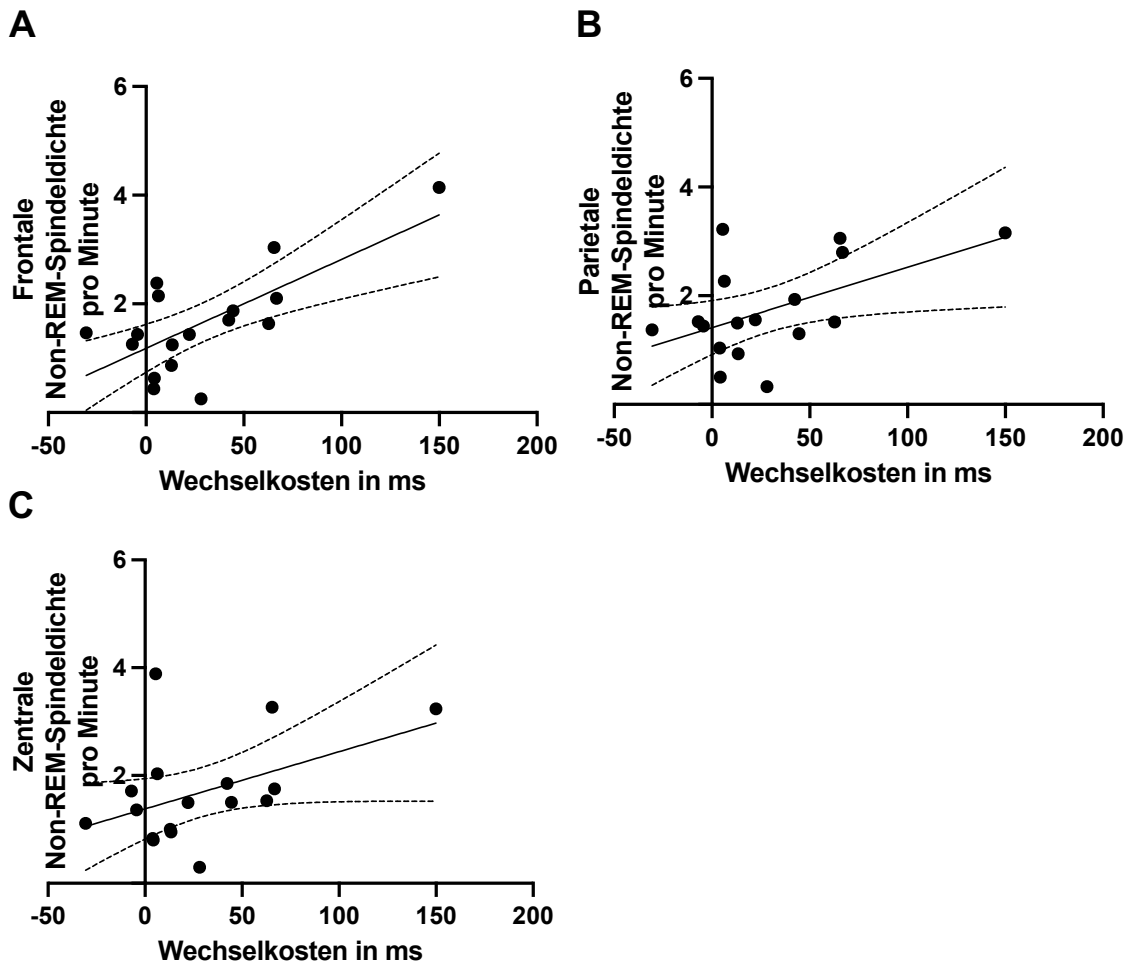


Abbildung 10: Korrelation Non-REM-Spindeldichte und Wechselkosten

(A) Korrelation zwischen frontaler Spindeldichte pro Minute und Wechselkosten in ms je Proband*in ($N = 17$), $p = 0.0014$, Pearson $r = 0.7107$

(B) Korrelation zwischen parietalen Spindeldichte pro Minute und Wechselkosten in ms je Proband*in ($N = 17$), $p = 0.0324$, Pearson $r = 0.5199$

(C) Korrelation zwischen zentraler Spindeldichte pro Minute und Wechselkosten in ms je Proband*in ($N = 17$), $p = 0.0645$, Pearson $r = 0.4580$

3.3 Wiedererkennungs- und explizite Gedächtnisaufgabe

Zur Auswertung der Wiedererkennungsaufgabe und der expliziten Gedächtnisaufgabe wurde $N = 1$ Proband*in aufgrund abweichender Ergebnisse um mehr als zwei Standardabweichungen über oder unter dem Gruppenmittelwert ausgeschlossen und die Auswertung somit mit $N = 32$ Proband*innen durchgeführt. Es wurden nur solche Durchgänge betrachtet, welche während der Enkodierung korrekt beantwortet wurden und nach den Aufgabenkontexten *classification switch* oder *action switch* gefragt wurde.

Zur Beurteilung der Rolle des Schlafes bei der Wiedererkennungsaufgabe und der expliziten Gedächtnisaufgabe in der Abrufphase zwischen Schlaf- und Wachgruppe mittels t-Tests untersucht.

Im Gegensatz zur S-R-Aufgabe ergab sich bei der Wiedererkennungsaufgabe kein signifikanter Unterschied zwischen der Schlaf- und Wachgruppe – beide schnitten ähnlich gut ab.

In der expliziten Gedächtnisaufgabe wiederum ergab sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($t(30) = 2.287, p = 0.0294$) zwischen Schlaf- und Wachgruppe. Auch hier ist die Schlafgruppe der Wachgruppe überlegen.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass Schlaf die Gedächtniskonsolidierung fördert und die explizite Erinnerung an die Enkodierung dieser Assoziationen unterstützt. Gleichzeitig zeigt sich kein Vorteil des Schlafes für die Wiedererkennung der enkodierten Objekte gegenüber der Wachgruppe.

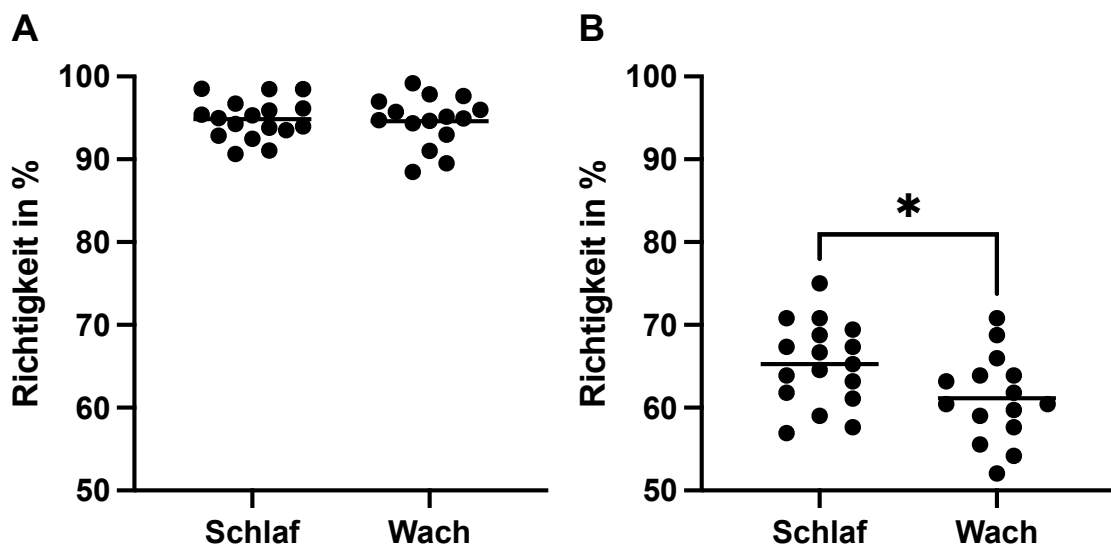


Abbildung 11: Einfluss des Schlafes auf Wiedererkennungs- und explizite Gedächtnisaufgabe

(A) Vergleich der Richtigkeit der Wiedererkennungsaufgabe zwischen Schlaf- ($N = 17$) und Wach-Gruppe ($N = 15$) mit Mittelwerten $M = 94.85 \pm 2.39$ % (Schlaf-Gruppe) und Mittelwert $M = 94.61 \pm 3.03$ % (Wach-Gruppe). $t(30) = 2.498, p = 0.8044$

(B) Vergleich der Richtigkeit der expliziten Gedächtnisaufgabe zwischen Schlaf- ($N = 17$) und Wach-Gruppe ($N = 15$) mit Mittelwerten $M = 65.28 \pm 4.99$ % (Schlaf-Gruppe) und Mittelwert $M = 61.16 \pm 5.18$ % (Wach-Gruppe). $t(30) = 2.287, p = 0.0294$

Bei der Untersuchung des Einflusses des Kontextes auf die beiden Aufgaben lagen die Genauigkeit der 2D- und VR-Gruppe nah beieinander. Es zeigte sich

erneut keine statistisch signifikante Relevanz zwischen den beiden unterschiedlichen Lernumgebungen.

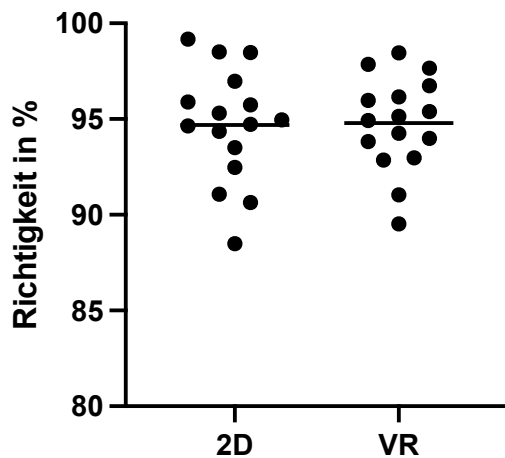


Abbildung 12: Einfluss der Lernumgebung auf Wiedererkennungsaufgabe

Vergleich der Richtigkeit der Wiedererkennungsaufgabe zwischen 2D- ($N = 16$) und VR-Gruppe ($N = 16$) mit Mittelwerten $M = 94.68 \pm 2.96 \%$ (2D-Gruppe) und Mittelwert $M = 94.80 \pm 2.44 \%$ (VR-Gruppe). $t(30) = 0.1191$, $p = 0.9060$

In der expliziten Gedächtnisaufgabe schnitt die 2D-Gruppe im Mittel geringfügig besser ab als die VR-Gruppe, es zeigte sich aber keine statistisch signifikante Relevanz ($t(30) = 0.6875$, $p = 0,4971$).

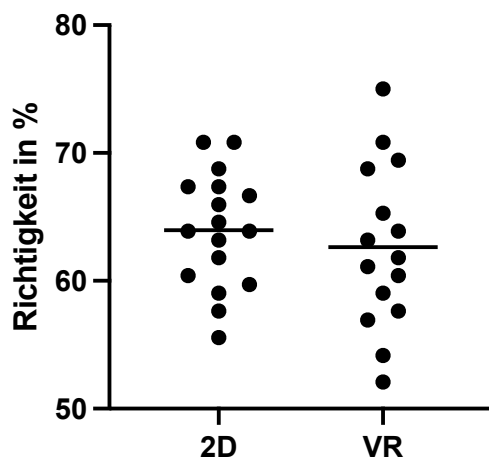


Abbildung 13: Einfluss der Lernumgebung auf explizite Gedächtnisaufgabe

Vergleich der Richtigkeit der expliziten Gedächtnisaufgabe zwischen 2D- ($N = 17$) und VR-Gruppe ($N = 15$) mit Mittelwerten $M = 63.97 \pm 4.49 \%$ (2D-Gruppe) und Mittelwert $M = 62.64 \pm 6.40 \%$ (VR-Gruppe). $t(30) = 0.6875$, $p = 0.4971$

Zusammenfassend lässt sich kein Vor- oder Nachteil einer Lernumgebung feststellen: Weder in der S-R-Aufgabe, noch bei der Objekterkennung und der

expliziten Gedächtnisaufgabe schnitt eine Lernumgebungsgruppe besser ab als die andere.

3.4 Kontrollvariablen

Zu Beginn der ersten Sitzung zeigte sich in der SSS „Prä-Schlaf“ in einem t-Test ein signifikanter Unterschied zwischen Schlaf- und Wachgruppe, wobei die Wachgruppe im Mittel ($M = 2.333$) weniger müde als die Schlafgruppe ($M = 3.176$) war ($t(30) = 2.242, p = 0.0325$). Zu Beginn der zweiten Sitzung hingegen zeigte sich in der SSS „Post-Schlaf“ in einem Mann-Whitney-Test ein sehr signifikanter Unterschied zwischen Schlaf- und Wachgruppe ($U = 12, p < 0.0001$). Der Median der Schlafgruppe lag bei 1.5, während der Median der Wachgruppe bei 3.0 lag. Somit war zu Beginn der ersten Sitzung die Schlafgruppe signifikant müder als die Wachgruppe, zu Beginn der zweiten Sitzung die Wachgruppe signifikant müder als die Schlafgruppe.

Die Analyse des PVT in der Abrufphase zeigt im t-Test zwischen Schlaf- und Wachgruppe ($p = 0.0628, t(31) = 1.930$) zwar leichte Unterschiede mit einer minimal schnelleren mittleren Reaktionsgeschwindigkeit der Schlafgruppe ($M = 0.3178$) (Wachgruppe $M = 0.3388$) aber keine statistische Signifikanz. Dieser ergab sich dafür hochsignifikant zwischen VR- und 2D-Gruppe: Die Reaktionszeit der VR-Gruppe ist deutlich erhöht gegenüber der Reaktionszeit der 2D-Gruppe ($U = 62, p = 0.0069$).

4 Diskussion

Ziel der Studie war es, den Einfluss der Umgebungsbedingung, VR oder 2D, sowie den Einfluss eines Mittagsschlafes in der Gedächtniskonsolidierung von *S-R*-Aufgaben zu untersuchen.

Dafür wurden mittels eines *S-R*-Experimentes verschiedene Bild-Klassifikations-Aktions-Sets, die zuvor bereits in *S-R*-Experimenten verwendet wurden (Miao et al., 2023), in VR oder 2D enkodiert. Nach einem Retentionsintervall mit oder ohne zweistündigen Mittagsschlaf wurde der Lernerfolg für die *S-R*-Aufgabe sowie die Wiedererkennungsaufgabe und die explizite Gedächtnisaufgabe betrachtet.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass Mittagsschlaf die Integration des Aufgabenkontext von Objekten sowie *S-R*-Assoziationen fördert - Kurzschlaf hatte einen signifikanten Einfluss auf den Lernerfolg der *S-R*-Aufgabe sowie bei Wechsel des Aufgabenkontext höhere Wechselkosten als die Wachgruppe. Die totale Schlafmenge zeigte keine Korrelation mit dem Lernerfolg. Zwischen der frontalen und parietalen Spindeldichte und den Wechselkosten ergab sich eine positive Korrelation: Je höher die Spindeldichte, desto höher die Wechselkosten. Die Lernumgebungen zeigten dabei keinen Unterschied.

Ebenso zeigte sich in der expliziten Gedächtnisaufgabe in der Schlafgruppe eine signifikant bessere Leistung als in der Wachgruppe. In der Wiedererkennungsaufgabe hingegen zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen Schlaf- und Wachgruppe. Auch hier ergab sich für keine Lernumgebung einen Lernvorteil.

4.1 *S-R*-Lernen

4.1.1 Mittagsschlaf fördert *S-R*-Lernen

Die zentrale Rolle von Schlaf auf kognitive Prozesse wie die Gedächtniskonsolidierung und damit die Festigung von Erinnerungen ist bekannt (Diekelmann & Born, 2010; Rasch & Born, 2013; Walker & Stickgold, 2006). Auch, dass der immer mehr an Bedeutung gewinnende Kurzschlaf bei der Gedächtniskonsolidierung eine Rolle spielt (Medrick & Drummond, 2009; Walker

& Stickgold, 2005). Bereits ein kurzer, 6-minütiger Schlaf kann mit einer Verbesserung des Lernerfolges einhergehen (Lahl et al., 2008). Ein längerer Kurzschlaf, der sowohl SWS als auch REM-Schlaf beinhaltet, kann sogar einen Lernerfolg erzielen, der dem eines nächtlichen Schlafes ähnelt (Mednick et al., 2003). In dieser Studie wurde untersucht, ob die schlafabhängige Gedächtniskonsolidierung auch bei Kurzschlaf während des Tages erzielt werden kann. Wir erwarteten, dass die Gedächtnisinhalte bei Kurzschlaf besser konsolidiert werden können.

In unserem Experiment haben wir uns für einen Mittagsschlaf im Zeitfenster des natürlichen „Nachmittagstiefs“ entschieden, da hier die größte Einschlafneigung besteht (Medrick & Drummond, 2009). Idealerweise sollten Proband*innen im zweistündigen Zeitfenster einen kompletten Schlafzyklus durchlaufen. Mit einer durchschnittlichen Schlafdauer von 112.76 ± 10.52 Minuten gelang dies bei allen außer zwei Proband*innen, welche die REM-Phase nicht erreichten, eine Proband*in davon erreichte nicht den SWS. Wir haben uns nicht für eine zeitliche Begrenzung des Kurzschlafes zum Ausschluss bestimmter Schlafphasen entschieden (Genzel et al., 2015; Medrick & Drummond, 2009).

In der *S-R*-Aufgabe wurde den Proband*innen in der Enkodierungsphase der jeweilige Stimulus mit verschiedenen Abstraktionen nach Horner und Henson (2009) beigebracht: der Klassifikation (Mechanik / Größe), deren Entscheidung (mechanisch / nicht-mechanisch bzw. größer / kleiner) und die motorischen Aktion (links / rechts). In der Abrufphase wurden diese im selben Aufgabenkontext (*repeat*) oder in verändertem Aufgabenkontext (*action / classification switch*) erneut abgerufen. Der Abruf erfolgte dabei im selben Umgebungskontext wie die Enkodierung, weshalb eine erfolgreichere Konsolidierung der *S-R*-Assoziationen in der Schlaf- als in der Wachgruppe erwartet wurde (Sawangjit et al., 2022).

Dies zeigte sich auch in unseren Ergebnissen: Wenn auch nicht signifikant, zeigte sich eine stärkere Verlängerung der Reaktionszeit bei Wechsel des Aufgabenkontextes in der Schlafgruppe. Zeigte man den Proband*innen bekannte Bilder in der Abrufphase in einem veränderten Aufgabenkontext

benötigte die Schlafgruppe, die die Bilder und ihren zugehörigen Aufgabenkontext besser im Mittagsschlaf konsolidieren konnte, länger für eine Antwort.

Die Wechselkosten sind höher aufgrund des Verknüpfungskonfliktes: Bei verändertem Aufgabenkontext muss die bestehende S-R-Verknüpfung zunächst gelöst werden (Colzato et al., 2006; Horner & Henson, 2009; Rogers & Monsell, 1995). Unsere Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass Schlaf die Gedächtniskonsolidierung der S-R-Assoziationen begünstigt und daher bei einem Wechsel des Aufgabenkontextes erhöhte Wechselkosten auftreten.

Ebenso zeigen unsere Daten einen signifikanten Unterschied beim Lernerfolg nach einem bis zu zweistündigen Kurzschlaf bei der S-R-Aufgabe, eine aktive Konsolidierung der Stimuli erfolgt im Kurzschlaf bereits bei kürzerer Schlafdauer als dem Nachtschlaf. Die Schlafgruppe zeigte eine signifikante Verbesserung der Richtigkeit in der Abrufphase. Dies deckt sich mit vorangegangenen Studien, die belegen, dass Schlaf mit einer erheblichen Verbesserung der Leistung gegenüber der Wachgruppe einhergeht (Ellenbogen et al., 2007a; Miao et al., 2023; Wagner et al., 2004; Wilhelm et al., 2011). Durch den zweistündigen Kurzschlaf konnten die Proband*innen genauere Ergebnisse erzielen als die Wachgruppe.

Die Gesamtschlafzeit, also die Schlafmenge, zeigte in unserer Studie keine Korrelation zum Lernerfolg. Den Schlafspindeln während des SWS kommt mit der Reaktivierung von neugelernten Informationen eine zentrale Rolle zu (Ellenbogen et al., 2007a). Sie sollen eine verbesserte Abrufleistung nach dem Schlaf ermöglichen (Rasch & Born, 2013). Unsere Ergebnisse zeigen eine signifikante Korrelation zwischen parietalen und frontalen Spindeldichten und erhöhten Wechselkosten. Dies zeigt, dass die Schlafspindeln zu einer verbesserten Konsolidierung der Assoziationen zwischen Stimuli und Aufgabenkontext führen (Colzato et al., 2006; Horner & Henson, 2009; Rasch & Born, 2013; Rogers & Monsell, 1995). Die Spindelparameter unserer Studie wurden nicht nach Schlafstadien getrennt sondern für den Non-REM-Schlaf insgesamt betrachtet.

4.1.2 Rolle des Umgebungskontext

Immersive VR konnte bereits in anderen Studien zu einer Verbesserung des Lernerfolges führen (Calvert & Abadia, 2020; Coban et al., 2022), andere Studien zeigten aber auch, dass das unbewusste Lernen in VR-Umgebung dem Lernen in 2D-Umgebung unterlegen ist, wobei zwischen dem generellen Lernerfolg der beiden Lernumgebungen kein Unterschied zu finden war (Flannery & Walles, 2003). Bei Auftreten der VR-Krankheit kann der Lernerfolg eingeschränkt sein (Jensen & Konradsen, 2018). Zusätzliche Ablenkungen können den Lernerfolg negativ beeinflussen, da ein Teil der kognitiven Kapazität für die äußere Prozessierung verwendet wird (Moreno & Mayer, 2007). Dies könnte der 2D-Lernumgebung einen Vorteil verschaffen. Nach der CAMIL-Theorie könnte die kognitive Mehrbelastung zu einer Verschlechterung des Lernerfolges führen, gleichzeitig aber durch die intrinsische Motivation und das geförderte Interesse des Probanden auch gesteigert werden (Makransky & Petersen, 2021).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine immersive, virtuelle Realität erzeugt mit dynamischen Kopfpositionsanpassungen, welche die Proband*innen um eine möglichst gute Immersion zu ermöglichen zunächst erkunden durften (Dörner et al., 2019). Wir haben untersucht, inwiefern sich das *S-R*-Lernen zwischen VR und 2D unterscheidet.

Unsere Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Lernumgebungen. Die Wechselkosten der Reaktionszeit zeigten kaum Unterschiede zwischen VR und 2D, auch der Lernerfolg der Richtigkeit beim Abruf der *S-R*-Aufgabe zeigte kaum einen Unterschied zwischen den beiden Umgebungen – die Bahnung und Gedächtniskonsolidierung wurde nicht durch die Lernumgebung beeinflusst.

Auffällig war eine signifikant langsamere Reaktionszeit im PVT der VR-Gruppe gegenüber der 2D-Gruppe. Da die ausgewerteten Proband*innen beide Sitzungen im selben Umgebungskontext durchführten, kann ein theoretischer Einfluss einer möglicherweise langsameren VR-Umgebung unbetrachtet bleiben.

4.2 Wiedererkennungs- und explizite Gedächtnisaufgabe

Neben der *S-R*-Aufgabe wurde die Gedächtnisleistung in einer Wiedererkennungsaufgabe und einer expliziten Gedächtnisleistung untersucht.

Bei der expliziten Gedächtnisaufgabe zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Richtigkeit der Schlaf- und Wachgruppe, wobei die Schlafgruppe der Wachgruppe überlegen war.

Bei der Wiedererkennungsaufgabe lag kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Schlaf- und Wachgruppe vor. Dies deckt sich mit vorangegangenen Studien wie z.B. Diekelmann et al. (2008), die weniger Schlafeffekt bei Wiedererkennungsaufgaben als bei freien oder hinweisgestützten Reproduktionsaufgaben fanden.

Manche Studien zeigen, dass das explizite Lernen in VR-Umgebung der konventionellen Umgebung unterlegen ist (Juliano et al., 2022). Bei beiden Aufgaben zeigte sich bei uns kein Einfluss der Lernumgebung auf die Richtigkeit der Ergebnisse: Bei beiden Aufgaben schnitten VR- und 2D-Gruppe ähnlich ab.

4.3 Bedeutung und Ausblick

Kurzschlaf ermöglicht eine Reduktion der benötigten Studiendauer. In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass ein zweistündiger Kurzschlaf bereits zu einer Verbesserung der kognitiven Leistung führen konnte und *S-R*-Assoziationen signifikant besser konsolidieren konnte. Zukünftige Studien könnten sich damit befassen, die optimale Dauer einer Kurzschlafphase für den Lernerfolg zu untersuchen.

Die Lernumgebung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf den Lernerfolg. Im Rahmen der Erforschung und Weiterentwicklung virtueller Realität sind Verbesserungen möglich, sodass eine Steigerung der Immersion zu einer Verbesserung des Lernerfolges führen könnten.

4.4 Qualitative Beurteilung der Studie

Aufgrund der zufälligen Zuordnung der Proband*innen ist eine gleichmäßige Verteilung der interindividuellen Unterschiede der Proband*innen wie Schlafqualität, Mittagsschlaffähigkeit und generellem Lernvermögen zu erwarten und keine größeren Verzerrungen erwartbar.

Trotzdem ist eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf die Gesamtbevölkerung aufgrund des selektiven Proband*innenkollektiv schwierig, da es sich hier um junge, gesunde Proband*innen handelt, die sich in Alter und Bildungsgrad ähnlich sind. Die Plastizität des Gedächtnisses nimmt im Laufe des Alters ab (Rasch & Born, 2013), sodass eine Übertragung der Ergebnisse vor allem auf ältere Bevölkerungsgruppen schwierig ist.

Bei zukünftigen Studien wäre eine bessere Berücksichtigung der Geschlechterverteilung denkbar, um einen Einfluss des Geschlechtes ausschließen zu können.

Um 2D-Proband*innen um einen zeitgleichen Testtag-Ablauf zur VR-Gruppe ermöglichen zu können, hatten diese während der Adaptation der VR-Proband*innen eine Pause, welche die VR-Proband*innen nicht hatten. Ebenso hatte die Wachgruppe eine weitere Pause um circa eine halbe Stunde gegenüber der Schlafgruppe, in welcher das EEG angelegt wurde.

Die zweistündige Standardaktivität der Proband*innen der Wachgruppe soll verhindern, dass diese sich in der Zeit aktiv mit den vorangegangenen Aufgaben beschäftigen. Hierfür wurden Tierdokumentationen ausgewählt, die thematisch von der Aufgabe und Umgebung abweichend waren. Allerdings führt die Dokumentation zur Aufnahme von neuen Informationen und somit zu Interferenzen, die die Schlafgruppe nicht hat (Jenkins & Dallenbach, 1924).

Die Beurteilung der Mittagsschlaffähigkeit der Proband*innen erfolgte in Selbstauskunft durch diese selbst. Wie gut und regelmäßig die Proband*innen tatsächlich Mittagsschlaf halten, wurde nicht anderweitig überprüft. Einige Proband*innen zeigten Probleme mit dem Kurzschlaf in Laborbedingungen, was die Quantität und Qualität des Schlafes beeinflussen könnte. Da kein

Adaptations-Mittagsschlaf, analog zu einer Adaptationsnacht in Nachtschlafstudien, stattfand, konnten die Proband*innen bezüglich ihrer Mittagsschlaffähigkeit nicht objektiv beurteilt und ausgeschlossen werden und die Proband*innen sich nicht an die Laborbedingungen gewöhnen. Da alle außer zwei Proband*innen keine Probleme mit dem Mittagsschlaf zeigten und sowohl SWS als auch REM-Schlafphasen zeigten, ist kein größerer Einfluss auf die Ergebnisse zu erwarten.

Der signifikante Unterschied zwischen VR- und 2D-Gruppe beim PVT könnte an einer Verzögerung durch die VR-Brille entstehen, welchen wir nicht beachtet hatten. Da es sich um den Abruf im selben Kontext handelt, hat diese Verzögerung keinen Einfluss auf die vorliegenden Ergebnisse. Um bei folgenden Studien einen Einfluss dieser Verzögerung ausschließen zu können, wäre eine technische Bestimmung dieser Verzögerung denkbar, welche dann von der Reaktionszeit der VR-Proband*innen abgezogen wird.

5 Zusammenfassung

Schlaf fördert die Integration von Informationen. Die positiven Effekte auf das deklarative Gedächtnis soll bereits bei sehr kurzem Schlaf erreicht werden. Anhand des vorliegenden Studiendesigns sollte untersucht werden, inwiefern Kurzschlaf auch einen positiven Einfluss auf das *S-R*-Lernen haben kann. Zusätzlich wurde untersucht, ob eine veränderte Lernumgebung das Lernverhalten beeinflusst.

Unterteilt in Schlaf- und Wachgruppe, sowie in zwei Lernumgebungen, VR und 2D, kamen die Proband*innen für einen Versuchstag mit zwei Sitzungen in das Schlaflabor. In der *S-R*-Aufgabe, in welcher die Stimuli der ersten Sitzung entweder im selben Aufgabenkontext (*repeat*), mit veränderter motorischer Bewegung (*action switch*) oder veränderter Klassifikation (*classification switch*) gezeigt wurden, zeigten sich erhöhte Wechselkosten für *action switch* und *classification switch* sowie eine höhere Richtigkeit der Schlafgruppe. Zwischen den Schlafspindeln und den erhöhten Wechselkosten ergab sich für die frontalen und die parietalen Bereiche eine positive Korrelation: Wird der Aufgabenkontext geändert, benötigen die Proband*innen länger, um den Stimulus zu beantworten, aufgrund einer vorliegenden negativen Bahnung. In der Wiedererkennungsaufgabe sollten die Reize von Distraktoren in einer Alt-Neu-Entscheidung unterschieden werden. Abschließend sollten sie in der expliziten Gedächtnisaufgabe die Klassifikation beim erstmaligen Durchführen wiedergeben. Die statistische Analyse bezüglich des Einflusses von Kurzschlaf und den Einfluss der Lernumgebung auf die *S-R*-Assoziationen und den Lernerfolg erfolgte mittels t-Tests oder Mann-Whitney-Test.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein zweistündiger Mittagschlaf einen signifikanten Einfluss auf die Konsolidierung der *S-R*-Assoziationen hat, was sich sowohl in einer höheren Richtigkeit der Antworten als durch erhöhte Wechselkosten zeigt. Die Lernumgebung dagegen zeigt eine geringe Relevanz für den Lernerfolg: Keine Lernumgebung ist der anderen gegenüber signifikant schlechter gestellt. Zwischen den frontalen und parietalen Schlafspindeln und dem Lernerfolg liegt eine positive Korrelation vor.

6 Literaturverzeichnis

- Ackermann, S., & Rasch, B. (2014). Differential effects of non-REM and REM sleep on memory consolidation? *Curr Neurol Neurosci Rep*, 14(2), 430.
<https://doi.org/10.1007/s11910-013-0430-8>
- Alger, S. E., Chambers, A. M., Cunningham, T., & Payne, J. D. (2015). The role of sleep in human declarative memory consolidation. *Curr Top Behav Neurosci*, 25, 269-306. https://doi.org/10.1007/7854_2014_341
- Ambrosini, M. V., & Giuditta, A. (2001). Learning and sleep: the sequential hypothesis. *Sleep Med Rev*, 5(6), 477-490. <https://doi.org/10.1053/smr.2001.0180>
- Astori, S., Wimmer, R. D., & Lüthi, A. (2013). Manipulating sleep spindles--expanding views on sleep, memory, and disease. *Trends Neurosci*, 36(12), 738-748.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.001>
- Bimberg, P., Weissker, T., & Kulik, A. (2020). *On the Usage of the Simulator Sickness Questionnaire for Virtual Reality Research*.
<https://doi.org/10.1109/VRW50115.2020.00098>
- Borbély, A. A., & Achermann, P. (1999). Sleep homeostasis and models of sleep regulation. *J Biol Rhythms*, 14(6), 557-568.
<https://doi.org/10.1177/074873099129000894>
- Born, J., Rasch, B., & Gais, S. (2006). Sleep to remember. *Neuroscientist*, 12(5), 410-424. <https://doi.org/10.1177/1073858406292647>
- Bos, J. E., MacKinnon, S. N., & Patterson, A. (2005). Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view. *Aviat Space Environ Med*, 76(12), 1111-1118.
- Brooks, A., & Lack, L. (2006). A brief afternoon nap following nocturnal sleep restriction: which nap duration is most recuperative? *Sleep*, 29(6), 831-840.
<https://doi.org/10.1093/sleep/29.6.831>
- Buysse, D. J., Reynolds, C. F., 3rd, Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res*, 28(2), 193-213. [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(89\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0165-1781(89)90047-4)
- Calvert, J., & Abadia, R. (2020). Impact of Immersing University and High School Students in Educational Linear Narratives Using Virtual Reality Technology. *Computers & Education*, 159, 104005.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104005>
- Carskadon, M. A., Dement, W. C., Mitler, M. M., Roth, T., Westbrook, P. R., & Keenan, S. (1986). Guidelines for the multiple sleep latency test (MSLT): a standard measure of sleepiness. *Sleep*, 9(4), 519-524.
<https://doi.org/10.1093/sleep/9.4.519>
- Chitra, J., & Eremita, M. (2023). Effect of Virtual Reality on Sleep-Deprived Individuals. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 45, 025371762311773.
<https://doi.org/10.1177/02537176231177388>
- Coban, M., Bolat, Y. I., & Goksu, I. (2022). The potential of immersive virtual reality to enhance learning: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 36, 100452.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100452>
- Colzato, L., Warrens, M., & Hommel, B. (2006). Priming and binding in and across perception and action: A correlational analysis of the internal structure of event

- files. *Quarterly journal of experimental psychology* (2006), 59, 1785-1804. <https://doi.org/10.1080/17470210500438304>
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nat Rev Neurosci*, 11(2), 114-126. <https://doi.org/10.1038/nrn2762>
- Diekelmann, S., Landolt, H. P., Lahl, O., Born, J., & Wagner, U. (2008). Sleep loss produces false memories. *PLoS One*, 3(10), e3512. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003512>
- Diekelmann, S., Wilhelm, I., & Born, J. (2009). The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation. *Sleep Med Rev*, 13(5), 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2008.08.002>
- Dobbins, I. G., Schnyer, D. M., Verfaellie, M., & Schacter, D. L. (2004). Cortical activity reductions during repetition priming can result from rapid response learning. *Nature*, 428(6980), 316-319. <https://doi.org/10.1038/nature02400>
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., & Jung, B. (2019). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität: Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität* (2. Auflage ed.). Springer Verlag GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>
- Ellenbogen, J., Hu, P. T., Payne, J. D., Titone, D., & Walker, M. P. (2007b). Human relational memory requires time and sleep. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104(18), 7723-7728. <https://doi.org/10.1073/pnas.0700094104>
- Ellenbogen, J., Payne, J., & Stickgold, R. (2007a). The role of sleep in declarative memory consolidation: passive, permissive, active or none? *Current opinion in neurobiology*, 16, 716-722. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.10.006>
- Ficca, G., Lombardo, P., Rossi, L., & Salzarulo, P. (2000). Morning recall of verbal material depends on prior sleep organization. *Behav Brain Res*, 112(1-2), 159-163. [https://doi.org/10.1016/s0166-4328\(00\)00177-7](https://doi.org/10.1016/s0166-4328(00)00177-7)
- Flannery, K. A., & Walles, R. (2003). How Does Schema Theory Apply to Real versus Virtual Memories? *CyberPsychology & Behavior*, 6(2), 151-159. <https://doi.org/10.1089/109493103321640347>
- Fogel, S. M., & Smith, C. T. (2011). The function of the sleep spindle: a physiological index of intelligence and a mechanism for sleep-dependent memory consolidation. *Neurosci Biobehav Rev*, 35(5), 1154-1165. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.12.003>
- Frederiksen, J. G., Sørensen, S. M. D., Konge, L., Svendsen, M. B. S., Nobel-Jørgensen, M., Bjerrum, F., & Andersen, S. A. W. (2020). Cognitive load and performance in immersive virtual reality versus conventional virtual reality simulation training of laparoscopic surgery: a randomized trial. *Surg Endosc*, 34(3), 1244-1252. <https://doi.org/10.1007/s00464-019-06887-8>
- Freina, L., & Ott, M. (2015). *A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives*. <https://doi.org/10.12753/2066-026X-15-020>
- Gais, S., Lucas, B., & Born, J. (2006). Sleep after learning aids memory recall. *Learn Mem*, 13(3), 259-262. <https://doi.org/10.1101/lm.132106>
- Genzel, L., Spooemaker, V. I., Konrad, B. N., & Dresler, M. (2015). The role of rapid eye movement sleep for amygdala-related memory processing. *Neurobiol Learn Mem*, 122, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2015.01.008>

- Godden, D., & Baddeley, A. (1980). When does context influence recognition memory? *British Journal of Psychology*, 71(1), 99-104. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1980.tb02735.x>
- Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of Psychology*, 66(3), 325-331. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1975.tb01468.x>
- Goel, N., Abe, T., Braun, M. E., & Dinges, D. F. (2014). Cognitive workload and sleep restriction interact to influence sleep homeostatic responses. *Sleep*, 37(11), 1745-1756. <https://doi.org/10.5665/sleep.4164>
- Goel, N., Rao, H., Durmer, J. S., & Dinges, D. F. (2009). Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Semin Neurol*, 29(4), 320-339. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1237117>
- Grandner, M. A. (2017). Sleep, Health, and Society. *Sleep Med Clin*, 12(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2016.10.012>
- Henson, R. N., Eckstein, D., Waszak, F., Frings, C., & Horner, A. J. (2014). Stimulus-response bindings in priming. *Trends Cogn Sci*, 18(7), 376-384. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.03.004>
- Hoddes, E., Zarcone, V., Smythe, H., Phillips, R., & Dement, W. C. (1973). Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology*, 10(4), 431-436. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1973.tb00801.x>
- Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int J Chronobiol*, 4(2), 97-110.
- Horner, A., & Henson, R. (2009). Bindings Between Stimuli and Multiple Response Codes Dominate Long-Lag Repetition Priming in Speeded Classification Tasks. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 35, 757-779. <https://doi.org/10.1037/a0015262>
- Iber, C., Ancoli-Israel, S., Chesson, A. L., & Quan, S. (2007). The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications. *Westchester, IL: American Academy of Sleep Medicine*.
- Jäncke, L. (2013). *Lehrbuch Kognitive Neurowissenschaften*. Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG, Bern. <https://elibrary.hogrefe.com/book/99.110005/9783456950044>
- Jenkins, J. G., & Dallenbach, K. M. (1924). Obliviscence during Sleep and Waking. *The American Journal of Psychology*, 35(4), 605-612. <https://doi.org/10.2307/1414040>
- Jensen, L., & Konradsen, F. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>
- Juliano, J. M., Schweighofer, N., & Liew, S. L. (2022). Increased cognitive load in immersive virtual reality during visuomotor adaptation is associated with decreased long-term retention and context transfer. *J Neuroeng Rehabil*, 19(1), 106. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01084-6>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Mg, L. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3, 203-220.
- Lahl, O., Wispel, C., Willigens, B., & Pietrowsky, R. (2008). An ultra short episode of sleep is sufficient to promote declarative memory performance. *J Sleep Res*, 17(1), 3-10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2008.00622.x>

- Leder, J., Horlitz, T., Puschmann, P., Wittstock, V., & Schütz, A. (2019). Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making. *Safety Science, 111*, 271-286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.021>
- Leong, R. L. F., Lau, T., Dicom, A. R., Teo, T. B., Ong, J. L., & Chee, M. W. L. (2023). Influence of mid-afternoon nap duration and sleep parameters on memory encoding, mood, processing speed, and vigilance. *Sleep, 46*(4). <https://doi.org/10.1093/sleep/zsad025>
- Lovato, N., & Lack, L. (2010). The effects of napping on cognitive functioning. *Prog Brain Res, 185*, 155-166. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53702-7.00009-9>
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review, 33*(3), 937-958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
- Marr, D. (1971). Simple memory: a theory for archicortex. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 262*(841), 23-81. <https://doi.org/10.1098/rstb.1971.0078>
- McCauley, M. E., & Sharkey, T. J. (1992). Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1*(3), 311-318. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.311>
- McDonald, R. J., King, A. L., & Hong, N. S. (2001). Context-specific interference on reversal learning of a stimulus-response habit. *Behav Brain Res, 121*(1-2), 149-165. [https://doi.org/10.1016/s0166-4328\(01\)00160-7](https://doi.org/10.1016/s0166-4328(01)00160-7)
- Mednick, S., Nakayama, K., & Stickgold, R. (2003). Sleep-dependent learning: a nap is as good as a night. *Nat Neurosci, 6*(7), 697-698. <https://doi.org/10.1038/nm1078>
- Medrick, S. C., & Drummond, S. P. A. (2009). Napping. In L. R. Squire (Ed.), *Encyclopedia of Neuroscience* (pp. 1-6). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.00075-9>
- Miao, X., Müller, C., Lutz, N. D., Yang, Q., Waszak, F., Born, J., & Rauss, K. (2023). Sleep consolidates stimulus-response learning. *Learn Mem, 30*(9), 175-184. <https://doi.org/10.1101/lm.053753.123>
- Milner, C. E., & Cote, K. A. (2009). Benefits of napping in healthy adults: Impact of nap length, time of day, age, and experience with napping. *Journal of Sleep Research, 18*(2), 272-281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2008.00718.x>
- Moreno, R., & Mayer, R. (2007). Interactive multimodal learning environments: Special issue on interactive learning environments: Contemporary issues and trends. *Educational Psychology Review, 19*(3), 309-326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>
- Moutsopoulou, K., Pfeuffer, C., Kiesel, A., Yang, Q., & Waszak, F. (2018). How long is long-term priming? Classification and action priming in the scale of days. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 72*. <https://doi.org/10.1177/1747021818784261>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia, 9*(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Plihal, W., & Born, J. (1997). Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *J Cogn Neurosci, 9*(4), 534-547. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.4.534>

- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education, 147*, 103778. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiol Rev, 93*(2), 681-766. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>
- Rauchs, G., Desgranges, B., Foret, J., & Eustache, F. (2005). The relationships between memory systems and sleep stages. *J Sleep Res, 14*(2), 123-140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2005.00450.x>
- Rechtschaffen, A., Bergmann, B. M., Everson, C. A., Kushida, C. A., & Gilliland, M. A. (1989). Sleep deprivation in the rat: X. Integration and discussion of the findings. *Sleep, 12*(1), 68-87.
- Rechtschaffen, A. K., A. . N.I.H. (1968). A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects.
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological Psychology, 3*(3), 195-240. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2
- Roach, G. D., Dawson, D., & Lamond, N. (2006). Can a shorter psychomotor vigilance task be used as a reasonable substitute for the ten-minute psychomotor vigilance task? *Chronobiol Int, 23*(6), 1379-1387. <https://doi.org/10.1080/07420520601067931>
- Rogers, R., & Monsell, S. (1995). Costs of a Predictable Switch Between Simple Cognitive Tasks. *Journal of Experimental Psychology: General, 124*, 207-231. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.124.2.207>
- Rundo, J. V., & Downey, R., 3rd. (2019). Polysomnography. *Handb Clin Neurol, 160*, 381-392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64032-1.00025-4>
- Sawangjit, A., Harkotte, M., Oyanedel, C. N., Niethard, N., Born, J., & Inostroza, M. (2022). Two distinct ways to form long-term object recognition memory during sleep and wakefulness. *Proc Natl Acad Sci U S A, 119*(34), e2203165119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2203165119>
- Schabus, M., Gruber, G., Parapaties, S., Sauter, C., Klösch, G., Anderer, P., Klimesch, W., Saletu, B., & Zeitlhofer, J. (2004). Sleep spindles and their significance for declarative memory consolidation. *Sleep, 27*(8), 1479-1485. <https://doi.org/10.1093/sleep/27.7.1479>
- Schnyer, D. M., Dobbins, I. G., Nicholls, L., Davis, S., Verfaellie, M., & Schacter, D. L. (2007). Item to decision mapping in rapid response learning. *Memory & Cognition, 35*(6), 1472-1482. <https://doi.org/10.3758/BF03193617>
- Scoville, W. B., & Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 20*, 11-21. <https://doi.org/10.1136/jnnp.20.1.11>
- Smith, S. M., & Vela, E. (2001). Environmental context-dependent memory: A review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review, 8*(2), 203-220. <https://doi.org/10.3758/BF03196157>
- Squire, L. R., & Zola, S. M. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proc Natl Acad Sci U S A, 93*(24), 13515-13522. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.24.13515>
- Stuck, B., Maurer, J., Schredl, M., & Weeß, H. (2013). *Praxis der Schlafmedizin* (Vol. 2nd Edition). Springer Verlag.

- Troester, M. M., Quan, S. F., Medicine, A. A. o. S., & Berry, R. B. (2023). *The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events, Version 3*. American Academy Of Sleep Medicine.
<https://books.google.de/books?id=uKSczwEACAAJ>
- Tucker, M. A., & Fishbein, W. (2008). Enhancement of declarative memory performance following a daytime nap is contingent on strength of initial task acquisition. *Sleep*, 31(2), 197-203. <https://doi.org/10.1093/sleep/31.2.197>
- Tucker, M. A., Hirota, Y., Wamsley, E. J., Lau, H., Chaklader, A., & Fishbein, W. (2006). A daytime nap containing solely non-REM sleep enhances declarative but not procedural memory. *Neurobiol Learn Mem*, 86(2), 241-247.
<https://doi.org/10.1016/j.nlm.2006.03.005>
- Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology / Psychologie canadienne*, 26(1), 1-12. <https://doi.org/10.1037/h0080017>
- Tulving, E., & Schacter, D. L. (1990). Priming and human memory systems. *Science*, 247(4940), 301-306. <https://doi.org/10.1126/science.2296719>
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427(6972), 352-355. <https://doi.org/10.1038/nature02223>
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2005). It's practice, with sleep, that makes perfect: implications of sleep-dependent learning and plasticity for skill performance. *Clin Sports Med*, 24(2), 301-317, ix. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2004.11.002>
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annu Rev Psychol*, 57, 139-166. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.56.091103.070307>
- Wan, Y., Gao, H., Zhou, K., Zhang, X., Xue, R., & Zhang, N. (2024). Virtual reality improves sleep quality and associated symptoms in patients with chronic insomnia. *Sleep Medicine*, 122, 230-236.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sleep.2024.08.027>
- Wei, Y., Krishnan, G. P., Komarov, M., & Bazhenov, M. (2018). Differential roles of sleep spindles and sleep slow oscillations in memory consolidation. *PLoS Comput Biol*, 14(7), e1006322. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006322>
- Wilhelm, I., Diekelmann, S., Molzow, I., Ayoub, A., Mölle, M., & Born, J. (2011). Sleep selectively enhances memory expected to be of future relevance. *J Neurosci*, 31(5), 1563-1569. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3575-10.2011>
- Wölfel, M. (2023). *Immersive Virtuelle Realität: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer-Verlag GmbH, Berlin.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-662-66908-2>
- Worley, S. L. (2018). The Extraordinary Importance of Sleep: The Detrimental Effects of Inadequate Sleep on Health and Public Safety Drive an Explosion of Sleep Research. *P t*, 43(12), 758-763.
- Zender, R., Weise, M., von der Heyde, M., & Söbke, H. (2018). *Lehren und Lernen mit VR und AR-Was wird erwartet? Was funktioniert?*
- Zielinski, M. R., McKenna, J. T., & McCarley, R. W. (2016). Functions and Mechanisms of Sleep. *AIMS Neurosci*, 3(1), 67-104.
<https://doi.org/10.3934/Neuroscience.2016.1.67>

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie des Universitätsklinikums Tübingen unter Betreuung von PD Dr. Karsten Rauss durchgeführt. Die Konzeption der Studie erfolgte durch PD Dr. Karsten Rauss und Xiu Miao, naturwissenschaftlicher Doktorand.

Hiermit erkläre ich, Anna-Lena Johanna Weber, Verfasser der hier vorliegenden Dissertation mit dem Titel „Schlafabhängiges Stimulus-Response-Lernen in Virtueller Realität und im Labor“, dass ich den Eigenanteil an dieser Arbeit selbstständig und eigenständig erbracht habe.

Die Rekrutierung sowie die Versuche wurden nach Einarbeitung durch Herr Xiu Miao eigenständig durchgeführt. Die Durchführung der Versuche erfolgte in Kooperation mit Frau Jessica Dahmen, zweite Doktorandin. Die statistische Auswertung erfolgte in zwei vollständig voneinander getrennten Datensätzen, wobei jede Doktorandin zur Hälfte eigene Daten und zur anderen Hälfte von der Kollegin erhobene Daten ausgewertet hat.

Die Durchführung der Datenanalyse wurde von mir eigenständig durchgeführt. Dabei kamen die oben genannten wissenschaftlichen Methoden und Werkzeuge zum Einsatz. Die Auswertung der Polysomnographie erfolgte durch Xiu Miao.

Die gesamte schriftliche Ausarbeitung der Dissertation, einschließlich der Zitation relevanter wissenschaftlicher Literatur wurde von mir eigenständig geleistet.

Ich versichere hiermit, dass alle in der Dissertation verwendeten Quellen ordnungsgemäß zitiert und angegeben wurden. In Anspruch genommene Unterstützung durch Dritte, wie beispielsweise Betreuenden und Kolleg*innen wurden entsprechend dokumentiert.

Ort, Datum

Anna-Lena Johanna Weber

8 Veröffentlichungen

Teile der vorliegenden Dissertationsschrift werden von Miao et al. (*under review*) in den nächsten Monaten veröffentlicht.

9 Danksagung

Zunächst möchte ich ein großes Dankeschön an alle Proband*innen richten, die an dieser Studie teilgenommen und mit frühem Aufstehen und Koffeinverzicht dieses Projekt ermöglicht haben.

Ebenso möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater, PD. Dr. Karsten Rauss sowie meinem Betreuer, Xiu Miao, für die hervorragende Betreuung während der Promotion bedanken. Dank eurer umfangreichen Einarbeitung, einem offenen Ohr bei jedem Hilferuf und einer schnellen Antwort auf alle Fragen konnte ich einen spannenden Einblick in die Schlafforschung gewinnen!

Für die großartige und reibungslose Zusammenarbeit möchte ich mich bei meiner Kollegin, Jessica Dahmen bedanken – das Schlaflabor war deutlich unterhaltsamer zu zweit und ich hätte mir keinen besseren Partner für dieses Projekt wünschen können.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, allen voran bei meinen Eltern – Ihr habt mich bei jedem meiner Vorhaben unterstützt und mir Rückenwind gegeben und mir so ein unbeschwertes Leben, Lernen; Studium und die Dissertation ermöglicht.

10 Anhang

Dokument 1: Einwilligungserklärung

Einwilligungserklärung

zum Umgang mit den in einer Studie erhobenen Daten

Ich erkläre, dass ich mit der im Rahmen der Studie erfolgenden Erhebung und Verarbeitung von Daten und ihrer verschlüsselten (pseudonymisierten) Weitergabe einverstanden bin.

Ich stimme zu, dass bevollmächtigte Personen zum Zwecke der Überprüfung der Daten Einblick in meine persönliche Krankenakte nehmen dürfen und entbinde den behandelnden Arzt insoweit von seiner ärztlichen Schweigepflicht.

Mir ist bewusst, dass die Ergebnisse dieser Studie in medizinischen Fachzeitschriften veröffentlicht werden, allerdings in anonymisierter Form, so dass ein direkter Bezug zu meiner Person nicht hergestellt werden kann.

Ich wurde darüber informiert, dass ich jederzeit Auskunft über meine gespeicherten Daten und die Berichtigung von fehlerhaften Daten verlangen kann.

Ich weiß, dass ich jederzeit, beispielsweise beim Widerruf der Studienteilnahme, verlangen kann, dass meine bis dahin erhobenen Daten gelöscht oder unverzüglich anonymisiert werden.

Ich erkläre, dass ich über die Erhebung und Verarbeitung meiner in dieser Studie erhobenen Daten und meine Rechte angemessen informiert wurde.

Ich stimme der Verwendung der im Rahmen dieser Studie erhobenen Daten in der oben beschriebenen Form zu. Für die Einsichtnahme bevollmächtigter Personen befreie ich im erforderlichen Umfang meine behandelnden Ärzte und das Studienteam von der Schweigepflicht.

Ich bin ausdrücklich damit einverstanden, dass das Studienteam auch nach Studienende zu mir Kontakt aufnehmen darf, um zu fragen, ob ich einverstanden bin, dass die im Rahmen der Studie erhobenen Daten auch für konkrete künftige Forschungsvorhaben der Klinik bzw. des Instituts genutzt und weiterverarbeitet werden können.

Ja Nein

Datum und Unterschrift
(Studienteilnehmer)

Datum und Unterschrift
(Aufklärender Wissenschaftler)

Dokument 2: Demographische Daten

Informationen Experiment „VR, Schlaf und Gedächtnis“

Titel der Studie:	„VR, Schlaf und Gedächtnis“
Verantwortliche Institution:	Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie, Universitätsklinikum Tübingen
Ort der Durchführung:	Otfried-Müller-Str. 25, 72076, Tübingen
Leiter/Leiterin der Studie:	Jan Born

Teilnehmerin/Teilnehmer

Name und Vorname in Druckbuchstaben: _____

Geburtsdatum: _____

Alter: _____

Geschlecht: weiblich männlich diverse

Händigkeit: links rechts

Höchstes Bildungsniveau: Hauptschule Realschule Abitur Uni

Dokument 3: Edinburgh Handedness Inventory

Probanden-Code:

Uhrzeit:

Universitäts-Nummer:	PL:	Abt:
Code Nr.:		
Name:		
Datum:		

Edinburgh Handedness Inventory

Bitte geben Sie an, welche Hand Sie bei den folgenden Aktivitäten bevorzugen, indem Sie in die entsprechende Spalte ein Kreuz machen. Wo die Handbevorzugung so groß ist, daß Sie nie versuchen würden, die andere Hand zu benutzen, machen Sie bitte zwei Kreuze. Falls Sie sich wirklich nicht schlüssig sind, machen Sie ein Kreuz in beide Spalten.

Einige Aktivitäten erfordern zwei Hände. In diesem Fall ist der Teil der Aufgabe, für den die Bevorzugung gefragt ist, in Klammern gesetzt.

Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten. Nur wenn Sie keinerlei Erfahrung mit dem Objekt oder der Aufgabe haben, lassen Sie die Spalte frei.

		links	rechts
1	schreiben		
2	zeichnen		
3	werfen		
4	Schere		
5	Zahnbürste		
6	Messer (ohne Gabel)		
7	Löffel		
8	Besen (obere Hand)		
9	Zündholz anzünden (Zündholz)		
10	Schachtel öffnen (Deckel)		
i	Mit welchem Fuß treten Sie bevorzugt einen Gegenstand?		
ii	Welches Auge benutzen Sie, wenn Sie nur eines benutzen?		

Dokument 4: Stanford Sleepiness Scale & Total Symptom Score Prä-Schlaf

Fragebögen zur akuten Schläfrigkeit (SSS & TSS) Prä-Schlaf

VP-Nr: _____

Wählen Sie bitte diejenige Aussage, die am besten den Grad Ihrer Schläfrigkeit (bzw. Wachheit) beschreibt. Zutreffendes bitte ankreuzen.

Bitte nur ein Kästchen ankreuzen!

1.	Fühle mich aktiv und vital; aufmerksam; vollkommen wach	<input type="checkbox"/>
2.	Bin voll da, jedoch nicht auf dem Höhepunkt; kann mich konzentrieren	<input type="checkbox"/>
3.	Entspannt; wach; nicht voll aufmerksam; ansprechbar	<input type="checkbox"/>
4.	Etwas dösig; nicht auf dem Höhepunkt; etwas schlapp	<input type="checkbox"/>
5.	Dösig; verliere das Interesse wach zu bleiben; verlangsamt	<input type="checkbox"/>
6.	Schläfrig; möchte mich hinlegen; kämpfe gegen den Schlaf; benebelt	<input type="checkbox"/>
7.	Fast träumend; schlafe bald ein; kein Bemühen mehr, wach zu bleiben	<input type="checkbox"/>

Bitte kreuzen Sie die zutreffende Antwort in jeder Zeile an!

Zur Zeit spüre ich...	Ja	Nein
Schweregefühl im Kopf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brennen der Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tränen der Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwere der Augenlider	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schweregefühl in den Beinen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allgemeine Kraftlosigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frösteln	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geräuschempfindlichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gähnen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interesselosigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konzentrationsmangel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reizbarkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Herabgesetzte Kommunikationsbereitschaft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bewegungsdrang	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Schlafqualitäts-Fragebogen (PSQI)

1

VP: _____

Die folgenden Fragen beziehen sich auf Ihre üblichen Schlafgewohnheiten und zwar nur während der letzten vier Wochen. Ihre Antworten sollten möglichst genau sein und sich auf die Mehrzahl der Tage und Nächte während der letzten vier Wochen beziehen. Beantworten Sie bitte alle Fragen.

1. Wann sind Sie während der letzten vier Wochen gewöhnlich abends zu Bett gegangen?

übliche Uhrzeit:

2. Wie lange hat es während der letzten vier Wochen gewöhnlich gedauert, bis Sie nachts eingeschlafen sind?

in Minuten:

3. Wann sind Sie während der letzten vier Wochen gewöhnlich morgens aufgestanden?

übliche Uhrzeit:

4. Wieviele Stunden haben Sie während der letzten vier Wochen pro Nacht tatsächlich geschlafen?

(Das muß nicht mit der Anzahl der Stunden, die Sie im Bett verbracht haben, übereinstimmen.)

Effektive Schlafzeit (Stunden) pro Nacht:

Kreuzen Sie bitte für jede der folgenden Fragen die für Sie zutreffende Antwort an. Beantworten Sie bitte alle Fragen.

5. Wie oft haben Sie während der letzten vier Wochen schlecht geschlafen, ...

- a) ... weil Sie nicht innerhalb von 30 Minuten einschlafen konnten?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
 Weniger als einmal pro Woche
 Einmal oder zweimal pro Woche
 Dreimal oder häufiger pro Woche

- b) ... weil Sie mitten in der Nacht oder früh morgens aufgewacht sind?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
 Weniger als einmal pro Woche
 Einmal oder zweimal pro Woche
 Dreimal oder häufiger pro Woche

- c) ... weil Sie aufstehen mußten, um zur Toilette zu gehen?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
 Weniger als einmal pro Woche
 Einmal oder zweimal pro Woche
 Dreimal oder häufiger pro Woche

d) ... weil Sie Beschwerden beim Atmen hatten?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

e) ... weil Sie husten mußten oder laut geschnarcht haben?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

f) ... weil Ihnen zu kalt war?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

g) ... weil Ihnen zu warm war?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

h) ... weil Sie schlecht geträumt hatten?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

i) ... weil Sie Schmerzen hatten?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

j) ... aus anderen Gründen?

Bitte beschreiben:

Und wie oft während des letzten Monats konnten Sie aus diesem Grund schlecht schlafen?

- Während der letzten vier Wochen gar nicht
- Weniger als einmal pro Woche
- Einmal oder zweimal pro Woche
- Dreimal oder häufiger pro Woche

6. Wie würden Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes während der letzten vier Wochen beurteilen?

- Sehr gut
- Ziemlich gut
- Ziemlich schlecht
- Sehr schlecht

7. **Wie oft haben Sie während der letzten vier Wochen Schlafmittel eingenommen (vom Arzt verschriebene oder frei verkäufliche)?**
- Während der letzten vier Wochen gar nicht
 - Weniger als einmal pro Woche
 - Einmal oder zweimal pro Woche
 - Dreimal oder häufiger pro Woche
8. **Wie oft hatten Sie während der letzten vier Wochen Schwierigkeiten wachzubleiben, etwa beim Autofahren, beim Essen oder bei gesellschaftlichen Anlässen?**
- Während der letzten vier Wochen gar nicht
 - Weniger als einmal pro Woche
 - Einmal oder zweimal pro Woche
 - Dreimal oder häufiger pro Woche
9. **Hatten Sie während der letzten vier Wochen Probleme, mit genügend Schwung die üblichen Alltagsaufgaben zu erledigen?**
- Keine Probleme
 - Kaum Probleme
 - Etwas Probleme
 - Große Probleme
10. **Schlafen Sie allein in Ihrem Zimmer?**
- Ja
 - Ja, aber ein Partner/Mitbewohner schläft in einem anderen Zimmer
 - Nein, der Partner schläft im selben Zimmer, aber nicht im selben Bett
 - Nein, der Partner schläft im selben Bett

Dokument 6: Fragebogen zum Chronotyp (D-MEQ)



Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund, Ardeystr. 67, D-44139 Dortmund

Fragebogen zum Chronotyp (D-MEQ) Datum:

Name/Vorname: **Pb. Nr.:**

Strasse:

Wohnort:

Fon:.....

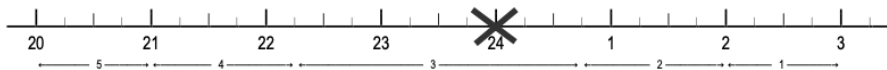
e-mail:.....

1. Bitte lesen Sie jede Frage sorgfältig durch, bevor Sie antworten.
2. Beantworten Sie bitte alle Fragen, auch dann wenn Sie sich bei einer Frage unsicher sind.
3. Beantworten Sie die Fragen in der vorgegebenen Reihenfolge.
4. Beantworten Sie die Fragen so schnell wie möglich. Es sind die ersten Reaktionen auf die Fragen, die uns mehr interessieren als eine lange überlegte Antwort.
5. Beantworten Sie jede Frage ehrlich. Es gibt keine richtige oder falsche Antwort.

----- Beantwortungsbeispiele -----

- a) Um wieviel Uhr werden Sie abends müde und haben das Bedürfnis, schlafen zu gehen ?

Hier sind **Zeitpunkte** gefragt. Kreuzen Sie bitte die für Sie zutreffende Zeit an. z.B.,



- b) Wenn Sie um 23 Uhr zu Bett gehen sollten, wie müde wären Sie dann ?

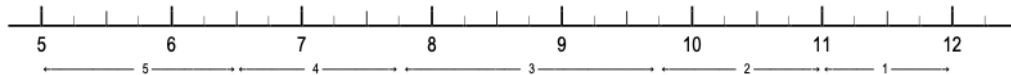
Kreuzen Sie bitte jeweils nur eine Antwortmöglichkeit an.

- | | |
|----------------------|---------------------------------------|
| Überhaupt nicht müde | <input type="checkbox"/> 0 |
| Etwas müde | <input type="checkbox"/> 2 |
| Ziemlich müde | <input checked="" type="checkbox"/> 3 |
| Sehr müde | <input type="checkbox"/> 5 |

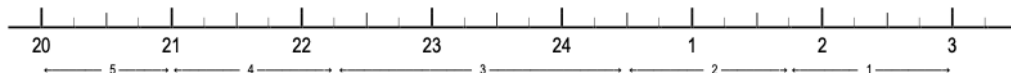
Griefahn B, Künemund C, Bröde P, Mehnert P, 2001: Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. Somnologie 5: 71-80

bitte wenden ➡

1. Wenn es nur nach Ihrem eigenen Wohlbefinden ginge und Sie Ihren Tag völlig frei einteilen könnten, wann würden Sie dann aufstehen ?



2. Wenn es nur nach Ihrem eigenen Wohlbefinden ginge und Sie Ihren Abend völlig frei gestalten könnten, wann würden Sie dann zu Bett gehen ?



3. Wie sehr sind Sie von Ihrem Wecker abhängig, wenn Sie morgens zu einer bestimmten Zeit aufstehen müssen ?

- Überhaupt nicht abhängig 4
 Etwas abhängig 3
 Ziemlich abhängig 2
 Sehr abhängig 1

4. Wie leicht fällt es Ihnen üblicherweise morgens aufzustehen ?

- Überhaupt nicht leicht 1
 Nicht sehr leicht 2
 Ziemlich leicht 3
 Sehr leicht 4

5. Wie wach fühlen Sie sich morgens in der ersten halben Stunde nach dem Aufwachen ?

- Überhaupt nicht wach 1
 Ein bisschen wach 2
 Ziemlich wach 3
 Sehr wach 4

6. Wie ist Ihr Appetit in der ersten halben Stunde nach dem Aufwachen ?

- Sehr gering 1
 Ziemlich gering 2
 Ziemlich gut 3
 Sehr gut 4

7. Wie müde fühlen Sie sich morgens in der ersten halben Stunde nach dem Aufwachen ?

- Sehr müde 1
 Ziemlich müde 2
 Ziemlich frisch 3
 Sehr frisch 4

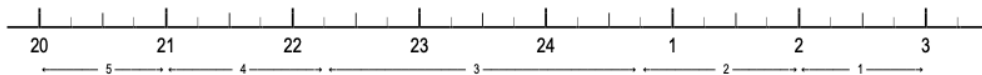
8. Wenn Sie am folgenden Tag keinerlei Verpflichtungen haben, wann gehen Sie dann – verglichen mit Ihrer üblichen Schlafenszeit – zu Bett ?

Selten oder nie später 4
 Weniger als eine Stunde später 3
 1 – 2 Stunden später 2
 Mehr als 2 Stunden später 1

9. Sie haben beschlossen, sich körperlich zu betätigen. Ein Freund rät Ihnen, zweimal wöchentlich eine Stunde zu trainieren; für ihn sei die beste Zeit zwischen 7 und 8 Uhr. Ausgehend von Ihrem eigenen Wohlbefinden, wie schätzen Sie Ihre Leistungsfähigkeit zu dieser Zeit ein ?

Ich wäre gut in Form 4
 Ich wäre ziemlich in Form 3
 Es wäre ziemlich schwierig für mich 2
 Es wäre sehr schwierig für mich 1

10. Um wieviel Uhr werden Sie abends müde und haben das Bedürfnis, schlafen zu gehen ?



11. Sie möchten für einen zweistündigen Test, von dem Sie wissen, dass er mental sehr beansprucht, in Bestform sein. Wenn es nur nach Ihrem eigenen Wohlbefinden ginge und wenn Sie Ihren Tag völlig frei einteilen könnten, welchen der vier Test-Zeiträume würden Sie wählen ?

8 – 10 Uhr 6
 11 – 13 Uhr 4
 15 – 17 Uhr 2
 19 – 21 Uhr 0

12. Wenn Sie um 23 Uhr zu Bett gehen sollten, wie müde wären Sie dann?

Überhaupt nicht müde 0
 Etwas müde 2
 Ziemlich müde 3
 Sehr müde 5

13. Aus irgendeinem Grund sind Sie einige Stunden später als gewöhnlich zu Bett gegangen. Es besteht jedoch keine Notwendigkeit, am nächsten Morgen zu einer bestimmten Zeit aufzustehen. Welcher der folgenden Fälle wird bei Ihnen am ehesten eintreten ?

Ich werde zur üblichen Zeit wach und schlafe nicht wieder ein 4
 Ich werde zur üblichen Zeit wach und döse danach noch ein wenig 3
 Ich werde zur üblichen Zeit wach, schlafe dann aber wieder ein 2
 Ich wache erst später als üblich auf 1

14. In einer Nacht müssen Sie für eine Nachtwache zwischen 4 und 6 Uhr wach sein. Am darauffolgenden Tag haben Sie keine weiteren Verpflichtungen. Welche der nachfolgenden Alternativen sagt Ihnen am ehesten zu ?

- Ich werde erst nach der Nachtwache zu Bett zu gehen 1
- Ich werde vorher ein Nickerchen machen und nach der Nachtwache schlafen 2
- Ich werde vorher richtig schlafen und hinterher noch ein Nickerchen machen 3
- Ich werde nur vorher schlafen 4

15. Sie müssen zwei Stunden körperlich schwer arbeiten und können sich Ihren Tag völlig frei einteilen. Wenn es nur nach Ihrem eigenen Wohlbefinden ginge, welche der folgenden Zeiten würden Sie wählen ?

- 8 – 10 Uhr 4
- 11 – 13 Uhr 3
- 15 – 17 Uhr 2
- 19 – 21 Uhr 1

16. Sie haben sich zu einem anstrengenden körperlichen Training entschlossen. Ein Freund rät Ihnen, zweimal wöchentlich eine Stunde zu trainieren; für ihn sei die beste Zeit zwischen 22 und 23 Uhr. Ausgehend von Ihrem eigenen Wohlbefinden, wie schätzen Sie Ihre Leistungsfähigkeit zu dieser Zeit ein ?

- Ich wäre gut in Form 1
- Ich wäre ziemlich in Form 2
- Es wäre ziemlich schwierig für mich 3
- Es wäre sehr schwierig für mich 4

17. Angenommen, Sie können Ihre Arbeitszeit frei wählen und Ihre Arbeitszeit beträgt 5 Stunden pro Tag (einschließlich der Pausen), die Tätigkeit ist interessant und wird nach Erfolg bezahlt. Welche 5 aufeinanderfolgenden Stunden würden Sie wählen ?

24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
----- 1 -----					----- 5 -----					----- 4 -----					----- 3 -----					----- 2 -----					----- 1 -----				

18. Zu welcher Tageszeit fühlen Sie sich Ihrer Meinung nach am besten ? (Bitte nur 1 Feld ankreuzen !)

24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
----- 1 -----					----- 5 -----					----- 4 -----					----- 3 -----					----- 2 -----					----- 1 -----				

19. Man spricht bei Menschen von 'Morgen-' und 'Abendtypen'. Zu welchem der folgenden Typen zählen Sie sich ?

- Eindeutig 'Morgentyp' 6
- Eher 'Morgen-' als 'Abendtyp' 4
- Eher 'Abend-' als 'Morgentyp' 2
- Eindeutig 'Abendtyp' 0

Geschlecht: weiblich männlich

Alter: Jahre



IfADo
Griefahn et al. 2001

Vielen Dank

Dokument 7: Compliance & Health-Check

Compliance & Health-Check

Vp-Nr. ____

1. Haben Sie heute Koffein zu sich genommen? Falls ja: wann? Wie viel? In welcher Form?

2. Haben sie heute Nikotin zu sich genommen? Falls ja: wann? Wie viel? In welcher Form?

3. Haben sie heute Alkohol zu sich genommen? Falls ja: wann? Wie viel? In welcher Form?

4. Hatten Sie in den letzten 7 Tagen Ein-/Durchschlaf-/Aufwachprobleme? Störungen des Schlaf-Wach-Rhythmus? Beeinträchtigte Schlafqualität?

5. Nahmen Sie letzte Woche vor dem Schlafengehen irgendwelche Substanzen ein (Alkohol, Cannabis, Medikamente, etc.)? Wenn ja, welche, wie oft, wie viel?

6. Wie stressreich/belastend empfanden Sie Ihre letzte Woche?
Gar nicht Etwas Mittel Stark
7. Wie ist Ihre momentane Befindlichkeit?
Sehr schlecht Etwas schlecht Gut Sehr gut
8. Als wie stressig empfanden sie den heutigen Tag bisher?
Sehr stressig Etwas stressig Gar nicht stressig
9. Wie würden Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes von letzter Nacht beurteilen?
Sehr gut Ziemlich gut Ziemlich schlecht Sehr schlecht

Falls Sie „schlecht“ gewählt haben, bitte erläutern sie kurz warum:

Dokument 8: MISC

MISC

Welche Symptome hast du? (Bitte nur ein Kästchen ankreuzen!)

- keine Probleme
- Unwohlsein (keine typischen Symptome)
- folgende Symptome vage ausgeprägt: Schwindel, Hitzegefühl, Kopfschmerz, seltsames Gefühl im Magen, Schwitzen und andere
- folgende Symptome gering ausgeprägt: Schwindel, Hitzegefühl, Kopfschmerz, seltsames Gefühl im Magen, Schwitzen und andere
- folgende Symptome mittelstark ausgeprägt: Schwindel, Hitzegefühl, Kopfschmerz, seltsames Gefühl im Magen, Schwitzen und andere
- folgende Symptome schwer ausgeprägt: Schwindel, Hitzegefühl, Kopfschmerz, seltsames Gefühl im Magen, Schwitzen und andere
- geringe Übelkeit
- mittelstarke Übelkeit
- schwere Übelkeit
- Würgereiz
- Erbrechen

Dokument 9: Simulator Sickness

Simulator Sickness

Hast du Kopfschmerzen bekommen?

ja,sehr ein wenig nein

Fühlen sich deine Augen überanstrengt an?

ja,sehr ein wenig nein

Fällt es dir schwer, dich zu fokussieren?

ja,sehr ein wenig nein

Musst du vermehrt schwitzen oder hast du einen erhöhten Speichelfluss?

ja,sehr ein wenig nein

Ist dir schlecht bzw. hast du das Gefühl, dich übergeben zu müssen?

ja,sehr ein wenig nein

Ist dir schwindelig oder schwummrig?

ja,sehr ein wenig nein

Siehst du verschwommen?

ja,sehr ein wenig nein

Fällt es dir schwer, dich auf die Aufgabe zu konzentrieren?

ja,sehr ein wenig nein

Dokument 10: Stanford Sleepiness Scale & Total Symptom Score Post-Schlaf

Fragebögen zur akuten Schläfrigkeit (SSS & TSS) Post-Schlaf

VP-Nr: _____

Wählen Sie bitte diejenige Aussage, die am besten den Grad Ihrer Schläfrigkeit (bzw. Wachheit) beschreibt. Zutreffendes bitte ankreuzen.

Bitte nur ein Kästchen ankreuzen!

1.	Fühle mich aktiv und vital; aufmerksam; vollkommen wach	<input type="checkbox"/>
2.	Bin voll da, jedoch nicht auf dem Höhepunkt; kann mich konzentrieren	<input type="checkbox"/>
3.	Entspannt; wach; nicht voll aufmerksam, ansprechbar	<input type="checkbox"/>
4.	Etwas dösig; nicht auf dem Höhepunkt; etwas schlapp	<input type="checkbox"/>
5.	Dösig; verliere das Interesse wach zu bleiben; verlangsamt	<input type="checkbox"/>
6.	Schläfrig; möchte mich hinlegen; kämpfe gegen den Schlaf; benebelt	<input type="checkbox"/>
7.	Fast träumend; schlafe bald ein; kein Bemühen mehr, wach zu bleiben	<input type="checkbox"/>

Bitte kreuzen Sie die zutreffende Antwort in jeder Zeile an!

Zur Zeit spüre ich...	Ja	Nein
Schweregefühl im Kopf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brennen der Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tränen der Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwere der Augenlider	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schweregefühl in den Beinen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allgemeine Kraftlosigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frösteln	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geräuschempfindlichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gähnen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interesselosigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konzentrationsmangel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reizbarkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Herabgesetzte Kommunikationsbereitschaft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bewegungsdrang	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dokument 11: Anwerbetext

Liebe Studierende, liebe Kolleginnen und Kollegen,

am Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie suchen wir Teilnehmerinnen und Teilnehmer für ein Experiment, in dem grundlegende Beziehung zwischen Schlaf und Gedächtnis untersucht werden. Die Studie umfasst zwei Sitzungen am selben Tag von ca. 5,5 Stunden Dauer. Die Aufgabe wird entweder am Computer oder mit VR-Brillen durchgeführt. Als Aufwandsentschädigung erhalten Sie 70 Euro (12.5 Euro/Stunde).

Je nach Versuchsbedingung beinhaltet die erste Sitzung entweder einen 2-stündigen Mittagsschlaf oder Standard-Aktivitäten wie das Anschauen eines Dokumentarfilms. In der Schlafbedingung wird Gehirn- und Muskelaktivität mittels Elektroden erfasst.

Für die Versuchsteilnahme gelten folgende **Voraussetzungen**:

- Alter zwischen 18 und 36 Jahren
- normale Sehschärfe, ggf. durch (nur) Kontaktlinsen
- keine schwerwiegenden neurologischen oder psychiatrischen Krankheiten.
- rechtshändig

Personenbezogene Angaben werden pseudonymisiert und nur zum Zwecke dieser Studie verarbeitet. Auf die Freiwilligkeit der Teilnahme wird ausdrücklich hingewiesen.

Interessiert? Für eine unverbindliche Anfrage melden Sie sich gerne bei:

email@medizin.uni-tuebingen.de

Mit freundlichen Grüßen,

Studienleitung:

PD Dr. Karsten Rauss

Tabelle 3: Proband*innenkollektiv

Nummerierung	Proband*innen- nummer	Geschlecht	Kontext	Gruppe
1	3	Weiblich	2D	Schlaf
2	4	Männlich	2D	Schlaf
3	6	Weiblich	VR	Schlaf
4	9	Weiblich	VR	Wach
5	10	Weiblich	2D	Wach
6	11	Weiblich	VR	Wach
7	12	Weiblich	2D	Wach
8	13	Männlich	2D	Schlaf
9	15	Weiblich	VR	Wach
10	17	Weiblich	2D	Wach
11	18	Männlich	2D	Schlaf
12	20	Weiblich	2D	Wach
13	21	Weiblich	2D	Wach
14	24	Weiblich	VR	Schlaf
15	28	Männlich	2D	Schlaf
16	30	Weiblich	VR	Wach
17	31	Weiblich	VR	Wach
18	34	Weiblich	VR	Schlaf
19	39	Weiblich	VR	Schlaf
20	43	Weiblich	VR	Schlaf
21	45	Weiblich	VR	Wach
22	46	Weiblich	2D	Wach

Nummerierung	Proband*innen- nummer	Geschlecht	Kontext	Gruppe
23	47	Weiblich	VR	Schlaf
24	48	Männlich	2D	Schlaf
25	49	Weiblich	VR	Wach
26	50	Männlich	VR	Schlaf
27	51	Weiblich	2D	Schlaf
28	58	Weiblich	2D	Wach
29	61	Weiblich	VR	Schlaf
30	64	Weiblich	VR	Wach
31	70	Männlich	2D	Schlaf
32	71	Trans*weiblich	2D	Wach
33	74	Weiblich	2D	Schlaf