

Aus dem Institut für Medizinische Psychologie der Universität
Tübingen

**Der Einfluss von Schlaf auf die Repräsentation und
Abstraktion langsamer visueller Sequenzen**

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

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

vorgelegt von

Hübner, Stefanie

2022

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1.Berichterstatter: Professor Dr. J. Born

2.Berichterstatter: Professor Dr. A. Bartels

Tag der Disputation: 30.06.2022

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	
1. Einleitung	1
1.1 Gedächtnis	1
1.1.1 Zeitliche Aspekte vom Gedächtnis	1
1.1.2 Formen des Langzeitgedächtnisses	2
1.1.3 Sequenzlernen	4
1.2 Schlaf	8
1.2.1 Schlafarchitektur	8
1.2.2 Schlafeffekte bei der seriellen Reaktionszeitaufgabe (SRTT)	9
1.2.3. Schlafeffekte auf das Sequenzlernen	10
1.3 Fragestellung und Hypothesen	12
2. Material und Methoden	13
2.1 Studiendesign	13
2.2 Probandenrekrutierung	14
2.3 Versuchsvorbereitung	14
2.4 Stimuli	15
2.5 Serielle Reaktionszeitaufgabe	16
2.6 Trainingsphase	17
2.7 Testphase	19
2.8 Statistische Auswertung	22
3. Ergebnisse	24
3.1 Reaktionszeiten beim Training	24
3.2 Fehlerquoten und Reaktionszeiten in den Tests vor und nach	

Konsolidierung in der L-S- Gruppe	26
3.3 Fehlerquoten und Reaktionszeiten in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L- Gruppe	29
3.4 Expliziteits-Tests.....	32
3.5 Fehlerquoten und Reaktionszeiten beim finalen Abruf in der L-S- Gruppe	34
3.6 Fehlerquoten und Reaktionszeiten beim finalen Abruf in der L-L- Gruppe	36
3.7 Kontrolltests.....	37
3.7.1 Tests vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung	37
3.7.2 Schlafparameter	38
4. Diskussion	41
4.1 Schlussfolgerung und Aussicht	45
5. Zusammenfassung.....	46
6. Literaturverzeichnis	48
7. Erklärung zum Eigenanteil der Dissertationsschrift	53
8. Veröffentlichung	54
9. Anhang	55
9.1 Fragebogen Probandenrekrutierung.....	55
9.2 Fragebogen 1. und 2.Versuchsteil.....	56
9.3 Fragebogen Tagesaktivitäten.....	58
9.4 Debriefing 1	59
9.5 Debriefing 2	61
10. Danksagung.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Aufbau Gedächtnis in Bezug zur Speicherdauer</i>	1
Abbildung 2: <i>Unterteilung des Langzeitgedächtnisses (modifiziert nach Squire 1992)</i>	3
Abbildung 3: <i>Versuchsaufbau</i>	18
Abbildung 4: <i>Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) im Training bei Schlaf L-S und Wach L-S</i>	25
Abbildung 5: <i>Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) im Training bei Schlaf L-L und Wach L-L</i>	25
Abbildung 6: <i>Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-S-Gruppe</i>	26
Abbildung 7: <i>Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-S-Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli</i>	28
Abbildung 8: <i>Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L-Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli</i>	30
Abbildung 9: <i>Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli</i>	31
Abbildung 10: <i>Auswertung Explizitheits-Tests</i>	33
Abbildung 11: <i>Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach L-S, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli</i>	34
Abbildung 12: <i>Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach</i>	35
Abbildung 13: <i>Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach L-L, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli</i>	36
Abbildung 14: <i>Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach</i>	36
Abbildung 15: <i>Kontrolltests</i>	38

Abbildung 16: Schlafparameter 39

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	- Varianzanalyse (engl., analysis of variance)
fMRT	- funktionelle Magnetresonanztomographie
FrACT	- Freiburg Visual Acuity Test
FTT	- Fingertippaufgabe (engl., finger tapping task)
L-S-Gruppe	- Long-Short-Gruppe
L-L-Gruppe	- Long-Long-Gruppe
MW	- Mittelwert
N_{gesamt}	- Gesamtzahl Probanden
$n_{\text{ausgewertet}}$	- Ausgewertete Probanden
RSI	- Reaktions-Stimulus-Intervall (engl., response-to-stimulus interval)
SEM	- Standardfehler (engl., standard error of the mean)
SOL	- Einschlaf latenz (engl., Sleep Onset Latency)
TIB	- Liegedauer (engl., Time in Bed)
WASO	- Wachdauer nach Schlafbeginn (engl., Wakefulness after Sleep Onset)

1. Einleitung

1.1 Gedächtnis

1.1.1 Zeitliche Aspekte vom Gedächtnis

Das Gedächtnis kann in Abhängigkeit von der Speicherdauer unterteilt werden (Abbildung 1). So unterscheidet man zwischen dem sensorischen Gedächtnis, dem Kurzzeitgedächtnis und dem Langzeitgedächtnis (Gruber, 2018).

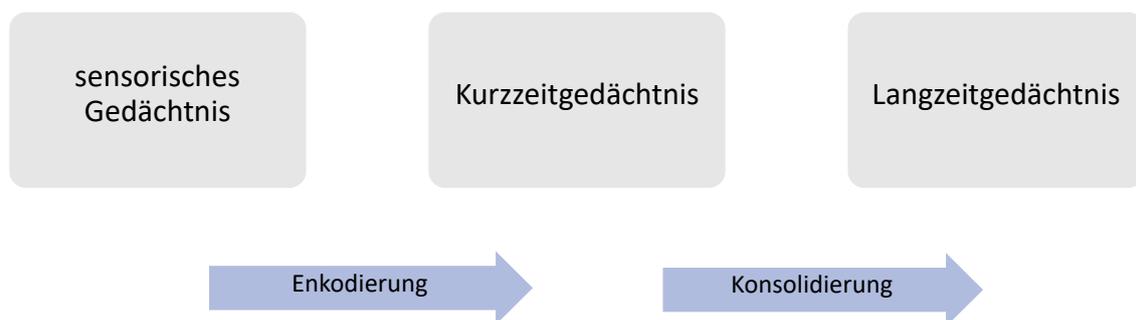


Abbildung 1: Aufbau Gedächtnis in Bezug zur Speicherdauer

Die initiale Verarbeitung von Reizen mithilfe unserer Sinnesorgane erfolgt durch das sensorische Gedächtnis. Während die Speicherdauer des sensorischen Gedächtnisses kurz ist, ist die Kapazität groß. Das ist darin begründet, dass viele Kortexareale parallel zueinander arbeiten. Unwichtige Informationen gehen dabei schnell wieder verloren, während relevante Informationen weiterverarbeitet werden und schließlich in das Kurzzeitgedächtnis gelangen (Behrends, Bischofberger, & Deutzmann, 2016b). Dieser Prozess wird als Enkodierung bezeichnet. Das Kurzzeitgedächtnis, häufig auch als Arbeitsgedächtnis bezeichnet, hat eine Speicherdauer von Sekunden bis Minuten, jedoch mit einer sehr begrenzten Kapazität. Diese umfasst, je nach

Literatur, drei bis vier Inhalte (Broadbent, 1975; Cowan, 2001) oder fünf bis neun Inhalte (Miller, 1956), wenn diese keinen Bezug zueinander haben. Große Bedeutung hat dabei der dorsolaterale präfrontale Kortex (Keele, Mayr, Ivry, Hazeltine, & Heuer, 2003). Besonders im alltäglichen Leben, z.B. beim Merken von Wort- oder Zahlenkombinationen, erfüllt es seine Aufgaben.

Informationen aus dem Kurzzeitgedächtnis können durch den Prozess der Konsolidierung in das Langzeitgedächtnis übergehen. Während der Konsolidierung kommt es dabei zu einer Verfestigung der vorher gelernten Informationen. Hierbei ist es unabhängig ob diese Informationen zuvor bewusst oder unbewusst gelernt wurden. Des Weiteren profitiert die Konsolidierung vom Schlaf (Diekelmann & Born, 2010). Die Gedächtniskonsolidierung ist jedoch keine messbare Größe, so dass man mit Hilfe von Enkodierung und Abruf auf die stattgefundene Konsolidierung schließen muss (Hallschmid & Born, 2006). Das Langzeitgedächtnis kann Informationen über Stunden bis Jahre abspeichern. Im Rahmen der Speicherung kommt es dabei zu einer Änderung der synaptischen Kommunikation. Dies geschieht aktivitätsabhängig. In diesem Zusammenhang spricht man auch von der synaptischen Plastizität. Es handelt sich hierbei um Veränderungen in der Kommunikation zwischen Neuronen. Während die Plastizität im Erwachsenenalter eingeschränkt ist, ist die Stabilität jedoch vergrößert (Behrends, Bischofberger, & Deutzmann, 2016a). Werden Informationen aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen, so spricht man vom Abruf. Dieser kann bewusst oder unbewusst erfolgen.

1.1.2 Formen des Langzeitgedächtnisses

Das Langzeitgedächtnis (Abbildung 2) lässt sich klassischerweise in das deklarative (explizite, bewusste) und das nicht-deklarative (implizite, unbewusste) Gedächtnis einteilen (L. R. Squire, 1992; Larry R. Squire & Dede, 2015).

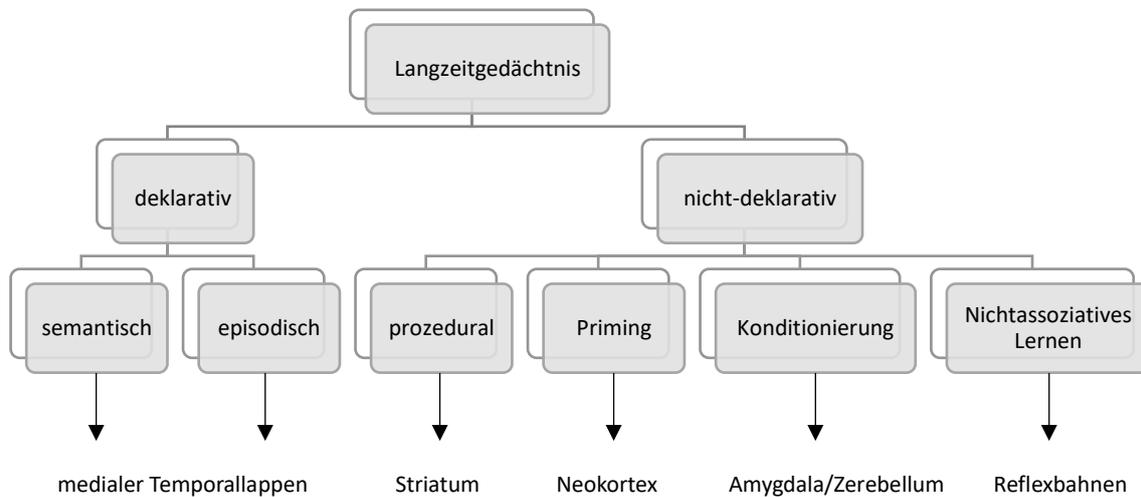


Abbildung 2: Unterteilung des Langzeitgedächtnisses (modifiziert nach Squire 1992)

Während es sich beim deklarativen Gedächtnis um bewusste Inhalte handelt, sind die Inhalte des nicht-deklarativen Gedächtnisses für das Bewusstsein schwer zugänglich. So können zum Beispiel Kindheitserfahrungen das Verhalten im Erwachsenenalter beeinflussen, ohne dass eine bewusste Erinnerung dazu besteht (Kessler, 2015).

Das deklarative Gedächtnis ist vom medialen Temporallappen und insbesondere vom Hippocampus abhängig (Larry R. Squire & Dede, 2015). Es lässt sich weiter in ein episodisches und ein semantisches Gedächtnis unterteilen. Während das episodische Gedächtnis persönliche Erlebnisse beinhaltet, speichert das semantische Gedächtnis allgemeine Fakten ab (Behrends et al., 2016a; Tulving, Endel Donaldson, 1972).

Das nicht-deklarative Gedächtnis hingegen ist vorwiegend hippocampusunabhängig und kann weiter unterteilt werden in ein prozedurales Gedächtnis, in Konditionierung, Priming und in das nichtassoziative Gedächtnis (Behrends et al., 2016a; L. R. Squire, 1992; Larry R. Squire & Dede, 2015).

Den jeweiligen Anteilen des nicht-deklarativen Gedächtnisses werden verschiedene Hirnareale zugeordnet. Das prozedurale Gedächtnis ist überwiegend vom Striatum abhängig und enthält Informationen zu

Bewegungsabläufen (z.B. Schwimmen, Fahrrad fahren, Laufen) (Hermeij, Mahlke, Schwake, & Sommer, 2010). Die Konditionierung hingegen, hängt von anderen Strukturen wie der Amygdala und dem Kleinhirn ab (Behrends et al., 2016a; Larry R. Squire, 2004).

1.1.3 Sequenzlernen

Das Sequenzlernen kann auf verschiedene Arten stattfinden. Unterscheiden kann man dabei nach der Geschwindigkeit der Stimuluspräsentation (langsam oder schnell), nach der Modalität (perzeptuell oder motorisch) oder ob das Lernen bewusst oder unbewusst (explizit oder implizit) erfolgt. Implizites Lernen kann dabei motorisch erfolgen (wie z.B. Laufen, Fahrrad fahren, Lernen einer Sequenz) und wird beeinflusst durch kognitive und soziale Fähigkeiten. Im Alltag nehmen wir Reize aus unserer Umgebung auf, verarbeiten sie, sammeln Erfahrungen und passen uns an die Umgebung an, indem wir lernen, zukünftige Ereignisse besser vorherzusagen (Janacsek & Nemeth, 2012). Das Lernen findet dabei nicht nur während des Übens (online), sondern auch zwischen den Übungsperioden (offline) statt. Es handelt sich hierbei um die Phase der Konsolidierung, in der es zu einer Speicherung und Stabilisierung der vorher erworbenen Fähigkeiten kommt. Die Konsolidierung erworbenen Sequenzwissens selbst, ist von vielen Faktoren abhängig (Janacsek & Nemeth, 2012).

Unser Gehirn versucht dabei Vorhersagen zu treffen und nutzt dabei alle Sinnesorgane. Auf Basis dieser Vorhersagen versucht es schließlich unser Verhalten anzupassen (Hawkins, George, & Niemasik, 2009).

Eine sehr häufig zitierte Aufgabe im visuomotorischen Bereich (Hoffmann & Engelkamp, 2016), bei der Vorhersageeffekte eine große Rolle spielen, ist die serielle Reaktionszeitaufgabe (SRTT, serial reaction time task) von Nissen & Bullemer (1987). Sie untersuchten hierbei inwiefern das Lernen einer vorhersagbaren Sequenz, im Gegensatz zu einer randomisierten Stimulusabfolge, zu kürzeren Reaktionszeiten führte. Sie teilten dafür ihre Probanden in zwei Gruppen ein (Kontroll- und Experimentalgruppe). Die

Probanden der ersten Gruppe (Kontrollgruppe) bekamen randomisierte (d.h. unvorhersagbare) Stimuli präsentiert, während den Probanden der zweiten Gruppe (Experimentalgruppe) die (vorhersagbare) Sequenz 4231324321, die sich ohne Unterbrechung mehrfach wiederholte, präsentiert wurde. Im Rahmen des Experimentes wurden den Probanden auf einem Computerbildschirm ein Sternchen an einer von vier möglichen Positionen, welche horizontal auf dem Bildschirm angeordnet waren (Position 1= ganz links, Position 2= 2. von links, Position 3= 3. von links, Position 4= ganz rechts), angezeigt. Zu jeder dieser Positionen gab es eine korrespondierende Taste auf der Tastatur. Die Aufgabe der Probanden bestand schließlich darin, auf den dargebotenen Reiz möglichst schnell und korrekt mit der entsprechenden Taste zu reagieren. Es zeigte sich schließlich in ihren Ergebnissen, dass sich die Reaktionszeit nur dann verkürzte, wenn den Probanden die vorhersagbare Sequenz 4231324321 präsentiert wurde. Wurde jedoch eine zufällige Abfolge präsentiert, verlängert sich die Reaktionszeit wieder. Dies bezeichneten sie als „negativen Transfer“ (Nissen & Bullemer, 1987).

Auf Grundlage dieser Ergebnisse modifizierten Reed und Johnson in ihren Untersuchungen die serielle Reaktionszeitaufgabe von Nissen und Bullemer. Sie wandelten die SRTT insofern ab, dass die vier verschiedenen Reize, in Bezug auf deren Anzahl, gleich häufig in einer 12-er Sequenz präsentiert wurden. Nachdem die Probanden diese feste Sequenz trainiert hatten, kam es zu einer Sequenzänderung, mit der Folge von langsameren Reaktionszeiten (Reed & Johnson, 1994).

Eine große Bedeutung scheint hierbei der mediale Temporallappen bzw. der Hippocampus zu spielen. Die Beteiligung dieser Hirnstrukturen wurde in mehreren Studien untersucht. Im Rahmen einer Studie von Tim Curran wurden dabei Patienten mit anterograder Amnesie, welche verursacht wird durch eine Schädigung des medialen Temporallappens und/oder der diencephalen Strukturen, untersucht. Die SRTT in dieser Studie wurde dabei so konzipiert, dass sie auf das Lernen von Informationen höherer Ordnung abzielte. Es zeigte sich hierbei zwar im Durchschnitt ein normaler Lerneffekt, jedoch deuteten die Ergebnisse darauf hin, dass Amnesiepatienten Informationen höherer Ordnung

nicht lernen konnten. Er schlussfolgerte, dass eine Schädigung des medialen Temporallappens und/oder der diencephalen Strukturen, zu einer assoziativen Lernstörung hinsichtlich des impliziten Sequenzlernen führte (Curran, 1997). Eine weitere Studie von Schendan et.al. bestätigt einerseits diese Schlussfolgerung, andererseits zeigten die Ergebnisse aber auch eine Beteiligung der mediotemporalen Lappenregion beim expliziten Sequenzlernen. Des Weiteren fanden sie auch Hinweise auf die Beteiligung des Hippocampus hinsichtlich der Bildung von Assoziationen höherer Ordnung, unabhängig davon ob das Lernen implizit oder explizit erfolgt war (Schendan, Searl, Melrose, & Stern, 2003).

Da es sich bei den impliziten Gedächtnisaufgaben häufig um eine Kombination aus Wahrnehmung und motorischem Lernen handelt, stellte sich die Frage, welcher dieser beiden Komponenten zu einer Aktivierung des mediotemporalen Region führte. Hinsichtlich dieser Fragestellung wurde in einer weiteren Studie von Rose et. al. die SRTT so modifiziert, dass es eine reine wahrnehmungsbezogene und eine reine motorische Variante gab. Neuronale Aufzeichnungen erfolgten mittels der funktionellen Magnetresonanztomographie (=fMRT). Eine bilaterale Aktivierung des Hippocampus wurde hierbei bei der Wahrnehmungssequenz festgestellt, nicht jedoch bei der rein motorischen Sequenz (Rose, Haider, Salari, & Büchel, 2011).

Einige Forscher gehen davon aus, dass zwei neurokognitive Sequenzlernsysteme unterschieden werden können. Sie unterscheiden hierbei zwischen einem dorsalen und einem ventralen System. Zum dorsalen System gehört der parietale Kortex, welcher vom motorischen Kortex ergänzt wird. Während das dorsale System nur implizit lernt, lernt das ventrale System, bestehend aus temporalem und lateralem präfrontalem Kortex, implizit oder explizit (Keele et al., 2003).

Nissen und Bullemer (1987) berichteten über die Störung des Lernens einer impliziten motorischen Sequenz durch Hinzufügen einer sekundären Aufgabe. Als Auslöser für diesen Effekt vermuteten sie die eingeschränkte Aufmerksamkeit, die durch das Hinzufügen der sekundären Aufgabe entstanden war. Neuere Vorschläge vermuteten nicht die Aufmerksamkeitslast

als möglichen Faktor, sondern dass die sekundäre Aufgabe das Timing beeinflusst. Basierend auf dieser Hypothese führten Willingham, Greenberg, & Thomas (1997) weitere Untersuchungen durch. Sie führten im Rahmen ihrer Studie 6 Experimente durch, bei denen sie im unterschiedlichen Maße die RSI manipulierten. In Experiment 3 legten sie zwei verschiedene zeitliche Intervalle zwischen den Stimuli fest. Sie unterschieden dabei ein kurzes zeitliches Intervall mit 500 ms zwischen den Stimuli (S für engl. „short“) von einem langen zeitlichen Intervall mit 1500 ms (L für engl. „long“). Während die eine Gruppe mit kurzen Intervallen zwischen den Stimuli („short“) trainiert und mit langen Intervallen („long“) getestet (Short-Long- oder S-L-Gruppe) wurde, wurde die andere Gruppe mit langen Intervallen trainiert und mit kurzen Intervallen getestet (Long-Short- oder L-S-Gruppe). In der L-S-Gruppe fanden sie Hinweise auf Lernen der Sequenz im Test (Transferphase; mit kurzen Intervallen), nicht jedoch beim Training (mit langen Intervallen). Bei der S-L-Gruppe konnten sie in der Transferphase kein Sequenzwissen nachweisen. Als Ursache dafür sahen sie die langen Intervalle an, jedoch nicht das Lernen an sich. Des Weiteren stellten sie in der S-L-Gruppe eine Zunahme der Reaktionszeiten in der Transferphase fest und schlossen nach Befragung der Probanden auf fehlende Motivation. In den sich anschließenden Experimenten 4 und 5 versuchten sie diese Probanden zu motivieren. Im Experiment 4 wurde eine 2-minütige Pause zwischen der Trainings- und Transferphase eingebaut, sowie eine zusätzliche Belohnung für die besten Probanden ausgesprochen. Außerdem bekamen die Probanden die zusätzliche Aufgabe, die Versuchsblöcke zu zählen. Die Ergebnisse aus dem Experiment 4 stehen im Widerspruch mit den Ergebnissen aus Experiment 3, da die Probanden der L-S-Gruppe bereits im Training (mit langen Intervallen) einen Lerneffekt zeigten. In Experiment 5 war der Versuchsaufbau identisch mit dem von Experiment 4, mit der Änderung, dass die Probanden keine Kenntnis über die Anzahl der Blöcke in der Trainingsphase hatten und diese auch nicht zählen mussten. Zu Beginn der Trainingsphase, zur Steigerung der Motivation, erhielten sie die Information, dass es sich um drei weitere Versuchsblöcke handelte und sich das zeitliche Intervall zwischen den Stimuli ändern würde. Probanden der L-S-Gruppe zeigten hier im Training (mit

langen Intervallen) ebenfalls einen Lerneffekt. Während bei langen Intervallen, also nur unter bestimmten Voraussetzungen, ein Lerneffekt sichtbar wurde, war dieser bei kurzen Intervallen in allen drei Experimenten zu sehen. Die Befunde ließen sie darauf schließen, dass eine Sequenz nicht nur mit kurzen, sondern auch mit langen Intervallen gelernt werden kann (auch wenn sich das nicht im Verhalten zeigt). Ein kurzes Intervall sei jedoch hilfreich, um diesen Lerneffekt auf Verhaltensebene sichtbar zu machen.

1.2 Schlaf

1.2.1 Schlafarchitektur

Der Schlaf lässt sich in verschiedene Schlafstadien einteilen. Dabei unterscheidet man nach Rechtschaffen & Kales (1968) die Schlafstadien S1-S4 (auch als Non-REM-Schlaf bezeichnet) und den REM-Schlaf (engl., Rapid Eye Movement). Dabei werden die Phasen S3 und S4 häufig zusammen als „Tiefschlaf“ bezeichnet.

Die einzelnen Schlafstadien lassen sich mittels Elektroenzephalografie voneinander unterscheiden. Das Schlafstadium 1 ist gekennzeichnet durch α - (8-12 Hz) und θ -Wellen (4-7 Hz), das Schlafstadium 2 zeigt Schlafspindeln (10 Hz) und K-Komplexe. In den Schlafstadien 3 und 4 sind langsame δ -Wellen (1-4 Hz) erkennbar und werden deshalb auch als Slow-Wave-Sleep (SWS) bezeichnet (Behrends, Bischofberger, & Deutzmann, 2012).

In einem Schlafzyklus laufen alle dieser Stadien nacheinander ab, jedoch mit unterschiedlicher Länge sowie aufsteigender und absteigender Reihenfolge. Ein Schlafzyklus dauert ca. 1,5 h und wiederholt sich, je nach Schlafdauer, 5-6 mal in der Nacht. Zudem nimmt die Häufigkeit der Tiefschlafphasen zum Ende der Nacht ab, während die REM-Schlafphasen zum Ende der Nacht länger werden (Behrends et al., 2012; Diekelmann & Born, 2010).

1.2.2 Schlafeffekte bei der seriellen Reaktionszeitaufgabe (SRTT)

Bereits 1924 zeigten James Jenkins und Karl Dallenbach in ihrer Studie die Bedeutung des Schlafes für das Gedächtnis. Die Probanden bekamen dabei die Aufgabe sinnlose Silben zu lernen, welche später in unterschiedlichen Zeitabständen von ein, zwei, vier oder acht Stunden abgefragt wurden. Um zu ermitteln, wie sich Schlaf auf das Gedächtnis auswirkt, teilten sie ihre Probanden in zwei Gruppen ein. Während der eine Teil der Probanden zwischen den Abfragen schlief (Schlafprobanden), verrichtete der andere Teil der Probanden normale Tätigkeiten, wie z.B. arbeiten, Musik hören etc. (Wachprobanden). Sie fanden dabei heraus, dass Probanden der Schlafgruppe weniger vergessen hatten als die Probanden der Wachgruppe (Jenkins & Dallenbach, 1924; Kaufmann, Zehnder, & Vanderheiden, 2009).

Doch welchen Einfluss haben dabei die verschiedenen Schlafstadien bei der Gedächtniskonsolidierung?

In älteren Studien bediente man sich zunächst der Möglichkeit den REM-Schlaf zu unterbrechen (REM-Schlaf-Deprivation). Während man bei Tierversuchen durch die Deprivation eine Beeinträchtigung feststellte (Smith, 1985), waren die Ergebnisse im Humanbereich umstritten (Born & Gais, 2000) (Wagner & Born, 2008).

Barrett & Ekstrand (1972) benutzten daraufhin die Methode den Tiefschlaf (1. Nachthälfte) und den REM-Schlaf (2. Nachthälfte), wie er auch überwiegend physiologisch stattfindet, aufzuspalten. Im Bereich des deklarativen Gedächtnisses stellten sie hierbei einen wesentlich größeren Konsolidierungseffekt in der Tiefschlafphase als in der REM-Schlaf-Phase fest. Plihal & Born (1997) übertrugen dies schließlich auf das non-deklarative Gedächtnis. Während die Tiefschlafphase die Gedächtniskonsolidierung des deklarativen Gedächtnisses positiv beeinflusst, wirkt sich der REM-Schlaf positiv auf das non-deklarative Gedächtnis aus.

Des Weiteren scheint Schlaf hinsichtlich der Einsicht bzw. Erkenntnis eine bedeutende Rolle zu spielen. Steckt hinter der Sequenz eine abstrakte Regelmäßigkeit, so wird sie nur von den Probanden bemerkt, die zuvor

geschlafen hatten (Wagner, Gais, Haider, Verleger, & Born, 2004). Auch im motorischen Bereich scheint Schlaf die Fähigkeiten zu fördern. Um motorische Fähigkeiten zu testen wird z.B. der finger tapping task (FTT) verwendet. Im Rahmen der FTT wird dabei zunächst eine Hand trainiert und anschließend die Fähigkeit der Übertragung auf die andere Hand untersucht. In diesem Zusammenhang können zwei Arten von Übertragungen unterschieden werden. Handelt es sich um eine gleichbleibende räumliche Sequenz bezeichnet man dies als extrinsische bzw. effektor-unabhängige Übertragung (Cohen, Pascual-Leone, Press, & Robertson, 2005; Grafton, Hazeltine, & Ivry, 1998, 2002; Verwey & Clegg, 2005; Verwey & Wright, 2004). Wird jedoch eine Spiegelsequenz, mit dementsprechend gleichbleibenden Fingerbewegungen, verwendet, handelt es sich um eine intrinsische bzw. effektor-abhängige Übertragung (Soechting & Flanders, 1989).

Kann Schlaf diese beiden Arten von Übertragungen positiv beeinflussen? Hinsichtlich dieser Fragestellung erfolgten Untersuchungen von Witt et. al. (2010). Zunächst trainierten die Probanden eine Sequenz mit der linken Hand. Unmittelbar im Anschluss erfolgte eine Übertragung auf die rechte Hand. Die Übertragung erfolgte dabei einerseits als ursprüngliche Sequenz (extrinsische Transformation), andererseits als Spiegelsequenz (intrinsische Transformation). Sie verglichen diese Ergebnisse mit einer neuen, vorher nicht gelernten, Sequenz. In beiden Probandengruppen (Wach- und Schlafprobanden) zeigten sich in der Trainingsphase Transfereffekte bei der extrinsischen Transformation, nicht jedoch bei der intrinsischen. Ein erneuter Test erfolgte 12 Stunden später. Während die Übertragung bei Wachprobanden nicht mehr nachweisbar war, blieb sie bei Probanden der Schlafgruppe erhalten. Sie schlussfolgerten, dass Schlaf in der Lage ist diesen Transfer zu konsolidieren.

1.2.3. Schlafeffekte auf das Sequenzlernen

Robertson, Pascual-Leone und Press (2004) verwendeten in ihrer Studie ebenfalls eine SRTT. Dabei konnten sie feststellen, dass Schlaf bei Probanden

nur dann einen Leistungszuwachs (in Form von einer verkürzten Reaktionszeit) zur Folge hatte, wenn sie Wissen über die Sequenz hatten, dementsprechend explizit gelernt hatten. Wurde die Sequenz jedoch implizit gelernt, so war ein Leistungszuwachs sowohl bei Wach- als auch bei Schlafprobanden zu verzeichnen.

Im Jahre 2006 wurde eine Studie veröffentlicht, bei der man der Frage nachging, ob Schlaf Einfluss auf explizites Wissen, bei vorher implizit gelernten Fähigkeiten, hat. Es zeigte sich bei dieser Untersuchung ein Leistungszuwachs im Bereich des expliziten Wissens bei Schlafprobanden im Vergleich mit Wachprobanden (Fischer, Drosopoulos, Tsen, & Born, 2006).

Nachdem man die Erkenntnis darüber erlangt hatte, dass Schlaf die Umwandlung von implizitem zu explizitem Wissen begünstigt, wurden in diesem Bereich weitere Untersuchungen durchgeführt.

Im Jahre 2011 veröffentlichten S. Drosopoulos, D. Harrer und J. Born (2011) die Ergebnisse ihrer durchgeführten Studie. In ihrer Studie nahmen insgesamt 40 Probanden teil, die zunächst in zwei Gruppen mit jeweils 20 Teilnehmern aufgeteilt wurden. Alle 40 Teilnehmer führten die serielle Reaktionszeitaufgabe (SRTT) durch, jedoch bekam im Anschluss daran, nur die eine Gruppe die Information, dass eine Regelmäßigkeit in der SRTT vorhanden war.

Anschließend erfolgte, mit jeweils zehn Teilnehmern, die weitere Aufteilung der Probanden in Schlaf- und Wachprobanden. Mit Hilfe einer Generierungsaufgabe wurde das Wissen nach zwei Nächten abgefragt. Es zeigte sich hierbei eine Leistungssteigerung sowohl bei den Schlaf- wie auch bei den Wachprobanden. Sie zeigten mit ihrer Studie, dass Schlaf die Umwandlung in explizites Wissen erleichtert, jedoch das Bewusstsein keine entscheidende Rolle dabei zu spielen scheint (Drosopoulos et al., 2011).

Kürzlich wurde ein Review-Artikel von Lerner & Gluck (2019) veröffentlicht. Sie untersuchten dabei die Ergebnisse von Studien der letzten zwei Jahrzehnte und kamen zu dem Fazit, dass die Extraktion von versteckten Regelmäßigkeiten stark abhängig von der angewendeten Aufgabe sei. Sie wiesen zudem darauf hin, dass die breite Wirkung von Schlaf nicht als allgemein kognitiver Prozess missverstanden werden sollte.

1.3 Fragestellung und Hypothesen

Das Ziel dieser Studie war die Untersuchung eines möglichen Schlafeffektes auf das implizite Lernen einer Sequenz bestehend aus zwölf Stimuli. Dabei sollte die Sequenz in einem langen (2,000 +/- 500 ms) Intervallmodus erlernt werden, die Abfrage erfolgte je nach Gruppenzuordnung in einem kurzen (200 +/- 50 ms) bzw. langen Intervall (2,000 +/- 500 ms).

Dabei wurden folgende Hypothesen zu Beginn der Studie gestellt:

- 1) höhere Fehlerquoten und langsamere Reaktionszeiten für Stimuli, die von der gelernten Sequenz abwichen, im Vergleich zu vorhersagbaren Folgestimuli
- 2) größerer Unterschied hinsichtlich der Reaktionszeiten und Fehlerquoten zwischen abweichenden Stimuli und Folgestimuli nach Schlaf im Vergleich zu Wachprobanden
- 3) besserer Transfer vom Kontext mit langen Intervallen zum Kontext mit kurzen Intervallen in der Schlafgruppe verglichen mit der Wachgruppe
- 4) Lerneffekte in der Schlafgruppe bei Abfrage mit einem langen Intervall, ausgedrückt durch eine niedrigere Fehlerquote und schnellere Reaktionszeiten für vorhersagbare Stimuli im Vergleich zu Wachprobanden

2. Material und Methoden

2.1 Studiendesign

An der Studie nahmen insgesamt 64 Probanden ($N_{\text{gesamt}}=64$) teil. Diese wurden auf insgesamt vier Gruppen aufgeteilt. Zunächst wurden die Probanden auf zwei Experimentalgruppen verteilt, wobei der Frauen- und Männeranteil in den jeweiligen Gruppen gleich stark vertreten war. Die Zuordnung unterlag ansonsten dem Zufallsprinzip. Innerhalb dieser Gruppen erfolgte eine weitere Aufteilung, mit gleicher Gruppenstärke, in eine Wach- sowie in eine Schlafgruppe. Auch hier erfolgte die Zuordnung zufällig.

Die Studie gliederte sich in zwei Versuchsteile. Der erste Versuchsteil („Trainingsphase“) wurde von den Wachprobanden um 08.30 Uhr, von den Schlafprobanden um 20.30 Uhr absolviert und enthielt die experimentellen Tests „Training“ sowie der Test „vor Konsolidierung“. Am gleichen Tag bzw. bei Schlafprobanden am darauffolgenden Tag, fand der 2. Versuchsteil, die Testphase, statt. Probanden der Wachgruppe stellten sich am gleichen Tag um 20.30 Uhr im Labor vor, während die Probanden der Schlafgruppe sich am nächsten Tag um 08.30 Uhr im Labor einfanden. Während der Testphase wurde der Test „nach Konsolidierung“ sowie der „finale Abruf“ absolviert.

Beide Experimentalgruppen lernten während der Trainingsphase eine Sequenz in einem langen Intervall (long bzw. langer Intervallmodus= $2,000 \pm 500$ ms) zwischen den Antworten und den folgenden Reizen (engl. response-to-stimulus= RSI). In der Testphase erfolgte lediglich in der L-S-Gruppe der Test „nach Konsolidierung“ in einem kurzen Intervallmodus (short bzw. kurzer Intervallmodus= 200 ± 50 ms), alle weiteren Tests fanden im ursprünglichen Intervall statt (long bzw. langer Intervallmodus= $2,000 \pm 500$ ms).

2.2 Probandenrekrutierung

Die Probandenrekrutierung erfolgte über Aushänge in den Universitätsgebäuden sowie über den studentischen E-Mail-Verteiler der Eberhard Karls Universität Tübingen.

Gesucht wurden rechtshändige weibliche und männliche Probanden im Alter von 20-40 Jahren mit allgemeiner Hochschulreife und einem regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus. Schichtarbeit bzw. Nachtschichten sollten in den letzten sechs Wochen nicht abgeleistet worden sein. Des Weiteren sollten die Probanden sowohl neurologisch wie auch psychologisch gesund sein und keine Medikamente einnehmen (Ausnahme: „Pille“). Die Probanden wurden zudem angehalten, während der Studienteilnahme auf Alkohol und Koffein zu verzichten. Ausgeschlossen von der Studie wurden Probanden, die über einen längeren Zeitraum ein Musikinstrument gespielt hatten, sowie professionelle Maschinenschreiber.

Die weiterführende Auswahl der Probanden erfolgte über einen zuvor per E-Mail zugesendeten Fragebogen (siehe Anhang 9.1 „Fragebogen Probandenrekrutierung“).

2.3 Versuchsvorbereitung

Nach Auswertung der zugeschickten Fragebögen erhielten die Probanden, je nach Gruppenzugehörigkeit, ihre zwei Termine mit einer Dauer von jeweils 90 Minuten. Zusätzlich wurden sie darauf hingewiesen, den Koffeinkonsum vor den Versuchstagen bereits einzuschränken sowie an den Versuchstagen selbst auf Koffein zu verzichten. Verwiesen wurde auch auf einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus sowie auf den Verzicht von Mittagsschlaf.

Nach Ankunft des Probanden im Labor erfolgte eine Überprüfung von Ein- und Ausschlusskriterien mittels des bereits zugesendeten Fragebogens.

Die Atmosphäre in den Versuchsräumen wurde möglichst reizarm gehalten. Das Zimmer wurde mit Vorhängen abgedunkelt, Fenster geschlossen sowie eine individuell bequeme Sitzposition mittels verstellbarem Bürostuhl und Kinn-

Stütze eingestellt. Die Position der Computertastatur wurde ebenfalls vom Probanden selbst festgelegt. Diese wurde, wie auch die Sitzposition, vor Versuchsbeginn eingestellt und blieb während der Versuche unverändert. Der Bildschirmabstand (gemessen zwischen dem Computerbildschirm und der Augenpartie des Probanden) wurde mit Hilfe des Versuchsleiters auf 57 cm eingestellt.

2.4 Stimuli

Bei dem durchgeführten Experiment handelte es sich um eine Computeraufgabe, welche in mehrere Abschnitte gegliedert wurde. Um einerseits den Komfort für den Probanden zu verbessern und andererseits eine stabile Kopfhaltung zu gewährleisten, wurde zusätzlich eine Kinn-Stütze verwendet.

Zentral präsentierte sich auf dem Bildschirm ein Kreuz. Dieses diente dem Probanden zur Fixierung. Peripher um dieses Kreuz konnten graustufige Gabor-Stimuli an sechs verschiedenen Positionen erscheinen. Die Ausrichtung der verwendeten Gabor-Stimuli lag bei 45° oder 135° . Die sich darstellende Stimulusgröße lag bei einem Sehwinkel von 5° , die Exzentrizität bei einem Sehwinkel von $7,5^\circ$ (Spannweite 5° - 10° des Sehwinkels) und die räumliche Frequenz bei 1,5 Zyklen pro Grad. Jedem Stimulus wurde eine Taste auf der Tastatur zugeordnet (Abbildung 3). Die Aufgabe des Probanden bestand darin, auf diesen Reiz (in Form eines Stimulus), durch Drücken der korrespondierenden Taste, möglichst schnell und korrekt zu reagieren. Der entsprechende Stimulus verschwand auch erst dann, wenn die korrekte Taste gedrückt wurde. Erfolgte ein falscher Tastendruck, blieb der entsprechende Stimulus so lange bestehen, bis die korrekte Taste vom Probanden gedrückt wurde. Das Intervall zwischen den einzelnen Stimuli war in der Trainings- sowie in der Testphase für die L-L-Gruppen lang („long“, 2,000 +/- 500 ms). Die L-S-Gruppen absolvierten den Test „nach Konsolidierung“ in einem kurzen Intervallmodus („short“, 200 +/- 50 ms), alle weiteren Tests entsprachen dem Intervallmodus der L-L-Gruppen.

2.5 Serielle Reaktionszeitaufgabe

In unserem Experiment verwendeten wir eine 12er-Sequenz, welche dem Probanden unbekannt war. Zudem wurde jedem Probanden eine individuelle Sequenz zugewiesen. Die verwendete Sequenz entsprach folgenden Kriterien:

- 1) die verwendeten Stimuli traten an den sechs Positionen gleich häufig auf
- 2) keine Abfolge von Trillern (z.B. 1 - 5 - 1)
- 3) keine Sequenzen mit oder gegen den Uhrzeigersinn (z.B. 4 - 5 - 6), das heißt, Stimuli traten an nicht mehr als an zwei benachbarten Positionen in einer Reihe auf
- 4) keine doppelten Voraussagen, das heißt, Stimuli an einem gegebenen Ort sagten keine Stimuli an einem anderen Ort mehr als einmal innerhalb der Sequenz voraus
- 5) einseitige Vorhersagen, das heißt, ein Stimulus an einem gegebenen Ort sagte zwei Stimuli an einem anderen Ort voraus, die jedoch ihrerseits niemals den ersten Ort voraussagten

Die verwendete Sequenz folgte damit einer Regelmäßigkeit zweiter Ordnung (Rosenthal, Andrews, Antoniadis, Kennard, & Soto, 2016).

Zur Verstärkung des Lernens wurde die Stimulusorientierung mit der Sequenz verknüpft, dabei durfte dieselbe Orientierung nur einmal mit demselben Ort verknüpft werden. Zusätzlich durfte dieselbe Orientierung nicht mehr als zweimal hintereinander auftreten.

Jeder experimentelle Block enthielt achtmal die 12-er Sequenz sowie zwei zufällig ausgewählte Teile der Sequenz, welche jeweils zu Beginn und zum Ende jedes Blockes präsentiert wurden (insgesamt: 108 Stimuli). Diese zwei zufällig ausgewählten Teile sollten das Risiko des Erkennens der Regelmäßigkeit minimieren.

In den Tests „vor und nach Konsolidierung“ wurden zusätzlich pro Sequenzwiederholung einmal abweichende Stimuli in Bezug zur ursprünglichen Ortssequenz eingeführt.

2.6 Trainingsphase

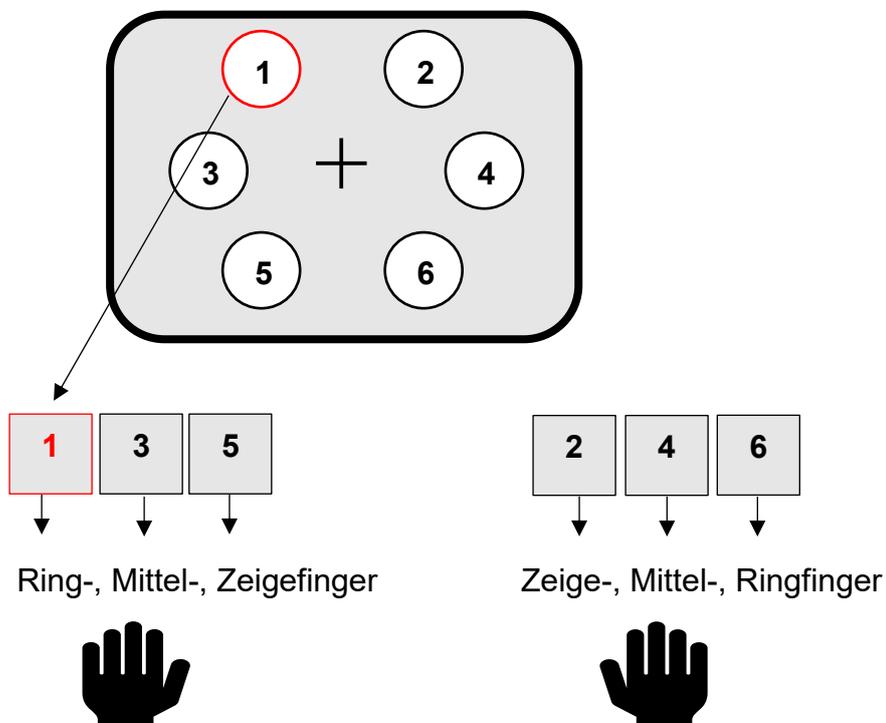
Die Trainingsphase, bestehend aus den experimentellen Teilen „Training“ und dem Test „vor Konsolidierung“, fand bei den Wachprobanden um 8.30 Uhr, bei den Schlafprobanden um 20.30 Uhr statt.

Nach Ankunft des Probanden im Labor wurde ein weiterer Fragebogen erhoben (siehe Anhang 9.2). Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf den vorherigen Schlaf-Wach-Rhythmus sowie auf den letzten Koffeinkonsum gelegt.

Nach Kontrolle auf Eignung des Probanden erfolgten weitere Vortests. Mithilfe des Freiburg Visual Acuity Tests (Freiburg Vision Test, FrACT) (Bach, 2007) wurde die Sehstärke sowie Kontrastsensitivität bestimmt. Nach erfolgreichem FrACT erfolgte ein Augendominanztest (Dolman Method) (Chaurasia & Mathur, 1976; Cheng, Yen, Lin, Hsia, & Hsu, 2004). Anschließend absolvierte der Proband einen ca. fünf minütigen Vigilanztest (Diekelmann, Wilhelm, Wagner, & Born, 2013). Im Rahmen dessen musste der Proband bei andauernder Aufmerksamkeit auf einen Reiz, in Form eines roten Punktes (dieser stellte sich auf der linken oder rechten Bildschirmseite dar), so schnell und korrekt wie möglich mit einem Tastendruck reagieren. Zum Abschluss der Vorversuche schätzte der Proband mithilfe der Stanford Schläfrigkeitsskala (Stanford Sleepiness Scale) seine augenblickliche Schläfrigkeit ein (Hoddes, Dement, & Zarcone, 1972).

Anschließend folgte der experimentelle Teil. Nach einer ausführlichen Einweisung bekam der Proband die Aufgabe das Kreuz in der Mitte zu fixieren sowie die Finger auf die entsprechenden Tasten zu legen (Abbildung 3). Erneut wurde darauf hingewiesen, auf den entsprechenden Reiz, in Form eines Stimulus, möglichst schnell und korrekt mit dem entsprechenden Tastendruck zu reagieren. Die Einführung in das Experiment erfolgte mithilfe eines einminütigen Übungsblockes. Präsentiert wurden hierbei randomisierte Stimuli in einem langen Intervall (long bzw. langer Intervallmodus = $2,000 \pm 500$ ms). Zur Motivationssteigerung wurde nach Beendigung des Übungsblockes, sowie später auch bei allen weiteren Blöcken, die durchschnittliche Reaktionszeit in ms angegeben. Nach einem erneuten Verweis „auf eine möglichst schnelle und

korrekte Reaktion“ im weiteren Verlauf des Experimentes, begann der Test „Training“. Das Training umfasste fünf Blöcke. Zwischen den einzelnen Blöcken erfolgten kurze Erholungspausen mit einer Dauer von einer Minute. Die Erholungspausen sollten dazu genutzt werden, die Kinn-Stütze kurzfristig zu verlassen sowie die Augen vom Bildschirm abzuwenden. Das Experiment konnte anschließend eigenhändig vom Probanden wieder gestartet werden. Die Blöcke des Trainings bestanden aus strukturierten Stimuli (=Standardstimuli) und enthielten die vom Probanden implizit zu erlernende Sequenz. Diese setzte sich aus zwölf Stimuli, welche deterministisch aufeinander folgten, zusammen.



Standardsequenz: ① ② ⑥ ⑤ ③ ④ ⑥ ③ ① ④ ② ⑤

Abweichende Sequenz: ① ② ⑥ ⑤ ③ ④ ⑥ ③ ⑤ ④ ② ⑤

Abbildung 3: Versuchsaufbau

Nach Abschluss des Trainings erhielt der Proband eine Ruhepause von 30 Minuten. Diese fand im Versuchslabor statt und wurde von Entspannungsmusik begleitet. Weitere Reize in Form von Handy, Lesen oder ähnliches, sollten in

der Pause möglichst vermieden werden.

Nach Ablauf der Pause wurde mithilfe der Stanford Schläfrigkeitsskala (Hoddes et al., 1972) die aktuelle Schläfrigkeit abgefragt. Es folgte anschließend der Test „vor Konsolidierung“, welcher sich aus drei Blöcken zusammensetzte. Der Aufbau entsprach grundsätzlich dem Test „Training“, jedoch mit der Ergänzung eines abweichenden Stimulus pro Sequenzwiederholung. Zum Ende des ersten Versuchsteils erhielten die Probanden noch genaue Anweisungen hinsichtlich des Schlafverhaltens sowie die Information auf Koffein bis zum nächsten Termin zu verzichten. Zur Überprüfung der Tages- bzw. Schlafaktivitäten wurde jedem Probanden eine Actiwatch 2 (Hersteller: Philips Respironics) sowie ein Protokoll zur Dokumentation der Tagesaktivitäten ausgehändigt (Anhang 9.3). Zusätzlich erhielten die Schlafprobanden einen Schlafbogen (SF-A/R) mit der Bitte diesen unmittelbar nach dem Aufstehen auszufüllen und zum nächsten Termin mitzubringen.

2.7 Testphase

Im Verlauf der Testphase fanden die Tests „nach Konsolidierung“ sowie der „finale Abruf“ statt. Probanden der Wachgruppen fanden sich am gleichen Tag um 20.30 Uhr im Labor ein. Probanden der Schlafgruppen absolvierten die Testphase am darauffolgenden Tag um 8.30 Uhr.

Zu Beginn der 2. Sitzung wurde die von den Probanden getragene Actiwatch 2 sowie der ausgefüllte Tages- bzw. Schlafbogen entgegengenommen. Nach kurzer Auswertung durch den Versuchsleiter wurde der Fragebogen des 1. Versuchstages (Anhang 9.2) hinsichtlich des Koffeinkonsums sowie der aktuellen Befindlichkeit des Probanden ergänzt. Mithilfe von weiteren Fragebögen wurde der Chronotyp (Morningness-Eveningness Questionnaire Self Assessment Version) (Horne & Ostberg, 1976) sowie die Händigkeit des Probanden (Edinburgh Handedness Inventory) (Oldfield, 1971) festgelegt. Wie auch in der Trainingsphase erfolgte zum Einstieg der fünf minütige Vigilanztest (Diekelmann et al., 2013) sowie die anschließende Einschätzung der

augenblicklichen Schläfrigkeit anhand der Stanford-Schläfrigkeitsskala (Hoddes et al., 1972).

Der erste experimentelle Teil der Testphase, der Test „nach Konsolidierung“, entsprach grundsätzlich dem Aufbau des Tests „vor Konsolidierung“, jedoch mit dem Unterschied, dass das Intervall zwischen den Stimuli sich in der L-S-Gruppe verkürzte (short bzw. kurzer Intervallmodus= 200 ± 50 ms). In den L-L-Gruppen blieb es unverändert gleich lang (long bzw. langer Intervallmodus= $2,000 \pm 500$ ms). Das Experiment startete erneut mit einem Übungsblock.

Aufgrund des verkürzten Intervalls zwischen den Stimuli betrug die Dauer des Übungsblockes in den L-S-Gruppen 30 Sekunden. In den L-L-Gruppen blieb sie unverändert (eine Minute). Nach Beendigung des Übungsblockes wurde die durchschnittliche Reaktionszeit in ms angezeigt sowie erneut daran erinnert „möglichst schnell und korrekt“ auf die entsprechenden Stimuli zu reagieren.

Der Test „nach Konsolidierung“ bestand aus drei Blöcken. Jeder Block, analog zum Test „vor Konsolidierung“, enthielt Standardstimuli, welche einmal pro Sequenzwiederholung, durch abweichende Stimuli unterbrochen wurden.

Basierend auf den unterschiedlich langen Intervallmodi, dauerte in den L-S-Gruppen ein Block ca. zwei Minuten, in den L-L-Gruppen ca. fünf Minuten.

Im sich anschließenden Debriefing (Anhang 9.4) wurde der Proband über sein explizites Sequenzwissen befragt („Ist dir während des Experimentes etwas aufgefallen?“, „Sind dir während des Experimentes Regelmäßigkeiten aufgefallen?“). Eine weitere Aufgabe im Rahmen des Debriefings bestand darin, dass jeder Proband gebeten wurde die möglich versteckte Sequenz in Form eines Zahlencodes (jedem Stimulus wurde dabei eine Zahl von 1- 6 zugeordnet) mit beliebiger Länge aufzuschreiben („schriftlicher Abruf“). Die tatsächliche Sequenzlänge von zwölf Stimuli wurde dem Probanden erst nach Abschluss des schriftlichen Abrufes mitgeteilt. Um das mögliche explizite Wissen der Probanden weiter zu untersuchen folgten computerbasierte Explizitheits-Tests (Test 1: „Freier Abruf“, Test 2: „Triplet Wiedererkennung“, Test 3: „Triplet Vervollständigung“).

Basierend auf der Information, dass die zu erlernende Sequenz aus zwölf Stimuli bestand, wurden die Probanden gebeten diese zweimal zu

rekonstruieren („1. Freier Abruf“). Dabei fanden die gleichen Tasten wie im experimentellem Teil Verwendung (Abbildung 3).

Im Rahmen der „Triplet Wiedererkennungsaufgabe“ erfolgte die Präsentation einer Sequenz bestehend aus drei Stimuli. Nach jeder Tripletpräsentation sollten die Probanden entscheiden, ob diese Stimulusabfolge Teil der 12-er Sequenz („bekannt“) oder nicht („unbekannt“) waren. Die Beantwortung erfolgte über einen Tastendruck, wobei die Taste „1“ für „bekannt“ und die Taste „2“ für „unbekannt“ stand. Zusätzlich wurden die Probanden gebeten, zu entscheiden wie sicher sie mit ihrer Entscheidung waren. Dafür stand eine Skala von eins bis fünf zur Verfügung, wobei die Taste „1“ für sehr sicher und die Taste „5“ für sehr unsicher stand. Die Beantwortung erfolgte hier ebenfalls mit dem entsprechenden Tastendruck. Insgesamt wurden zwölf Triplets präsentiert.

Im „Triplet Wiedererkennungstest“ wurde eine Abfolge von zwei Stimuli, welche alle Teile der Sequenz waren, gezeigt. Die Probanden sollten durch Hinzufügen eines weiteren Stimulus die Sequenz entsprechend ergänzen und wie auch bei der „Triplet Wiedererkennungsaufgabe“ ihre Entscheidungssicherheit angeben (Skala von eins bis fünf). Der Umfang dieser Aufgabe lag bei 24 Drillingen.

Um weiteres Wissen über die 12-er Sequenz zu erhalten, folgte ein erneuter Durchgang des ursprünglichen Experimentes („finaler Abruf“). Dieser fand in beiden Gruppen im ursprünglichen Intervall statt (long bzw. langer Intervallmodus= $2,000 \pm 500$ ms). Die Anzahl der Blöcke (drei Blöcke à fünf Minuten) sowie die Stimuluspräsentation entsprachen denen in den Tests „vor und nach Konsolidierung“. Mittels eines erneuten Debriefings wurden die Probanden hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades des Experimentes (Anhang 9.5) sowie zur Beurteilung der Motivationssteigerung, durch die Anzeige der Reaktionszeiten nach jedem Block, befragt. Die Bewertung erfolgte mithilfe einer Skala von eins (überhaupt nicht schwierig) bis zehn (extrem schwierig) bzw. von minus fünf (sehr demotivierend) bis plus fünf (sehr motivierend).

Inwiefern die vorherigen Versuchsteile Einfluss auf die Wahrnehmung des Probanden genommen hatten, sollte die Sequenz erneut zweimal rekonstruiert werden („2. Freier Abruf“). Der Aufbau entsprach dem „1. Freien Abruf“.

Am Ende des zweiten Versuchsteils wurde mithilfe des Corsi-Block-Tapping-

Test (Corsi, 1973) die visuell-räumliche Merkspanne der einzelnen Probanden bestimmt. Angezeigt wurden hierbei zunächst neun blaue Blöcke, die schließlich durch Aufleuchten eine Abfolge vorgaben. Begonnen wurde mit einer Abfolge aus drei Blöcken. Diese Sequenz sollte anschließend durch Anklicken der entsprechenden Blöcke von den Probanden rekonstruiert werden. Pro Kategorie standen dafür zwei Versuche zur Verfügung. Erfolgte bei einer dieser beiden Versuche eine korrekte Eingabe, verlängerte sich im nächsten Abschnitt die Sequenz um einen weiteren Block. Schlagen jedoch beide Versuche fehl, so endete der Test und legte somit die räumlich-visuelle Merkspanne (=Blockspanne) fest. Anschließend wurde die Supra-Block-Spanne ermittelt. Fortlaufend wurde hierbei eine Abfolge von Blöcken präsentiert und musste erneut von den Probanden rekonstruiert werden. Die Länge der hier kontinuierlich präsentierten Sequenz überstieg dabei die vorher bestimmte Blockspanne um eins. Jeder dritte Versuch präsentierte dabei die gleiche Sequenz und sollte im Verlauf dieses Tests gelernt werden. Der Test endete mit der korrekten Eingabe dieser Sequenz.

2.8 Statistische Auswertung

Erhoben wurden die Daten von $N_{\text{gesamt}} = 64$ Probanden. Die Daten von sechs Probanden wurden aufgrund von explizitem Wissen über die Sequenz nicht in die statistische Analyse eingeschlossen. Die Auswertung erfolgte für den Stichprobenumfang von $n_{\text{ausgewertet}} = 58$. Dabei wies die L-L-Gruppe eine Gruppenstärke von $n = 28$ (Schlafprobanden = 15, Wachprobanden = 13), die der L-S-Gruppe von $n = 30$ (Schlafprobanden = 15, Wachprobanden = 15) auf. Die Ergebnisse wurden mittels einer dreifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet. Dabei wurden die Zwischensubjekt-Faktoren Gruppe (Schlaf/Wach) und die Innersubjekt-Faktoren Sitzung (vor bzw. nach Schlaf/Wachkonsolidierung), Stimulustyp (Standard, abweichende Stimuli, Folgestimuli) und Block (1-3) berücksichtigt und für die L-S-Gruppe sowie für die L-L-Gruppe separat durchgeführt. Vigilanzwerte wurden als Kovariate in die statistische Analyse aufgenommen,

wenn diese zu einer signifikanten Verbesserung des statistischen Modells führten [nach der Konsolidierung in der L-S Gruppe für Fehlerraten $F(1,25) = 4,598$; $p=0,042$ und Reaktionszeiten $F(1,25) = 4,783$; $p = 0,038$].

Wenn die Annahme der Sphärizität verletzt war, wurde eine Greenhouse-Geisser-Korrektur durchgeführt. In diesen Fällen werden die originalen Freiheitsgrade und korrigierte p-Werte berichtet.

Alle Werte wurden als Mittelwerte (MW) mit Standardfehler (SEM) dargestellt.

Als Signifikanzniveau wurde $p < 0,05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

Aus der vorliegenden Dissertation wurden die Fehlerquoten in den Tests vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung (siehe 3.2.) sowie die Ergebnisse der Kontrolltests vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung (siehe 3.7.1) der L-S-Gruppe bereits veröffentlicht (Lutz, Wolf, Hübner, Born, & Rauss, 2018). Unveröffentlicht sind bisher die Ergebnisse im Bereich der Reaktionszeiten vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung in der L-S-Gruppe (Abbildung 7), sowie die Fehlerquoten und Reaktionszeiten in der L-L-Gruppe vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung (Abbildung 8 und 9). Des Weiteren werden die Auswertungen beim finalen Abruf (siehe 3.5. und 3.6.), die Ergebnisse der Explizitheitstests (Abbildung 10) sowie die Aktigraphiedaten (Abbildung 16) für beide Gruppen präsentiert.

3.1 Reaktionszeiten beim Training

Das Training gliederte sich in fünf experimentelle Blöcke. Jeder Block enthielt 108 Versuche (achtmal die 12-er Sequenz sowie zwei zufällige Teile der Sequenz jeweils zu Beginn und am Ende eines jeweiligen Blocks). Die Präsentation der Stimuli erfolgte dabei in einem langen Intervall (long bzw. langer Intervallmodus= $2,000 \pm 500$ ms).

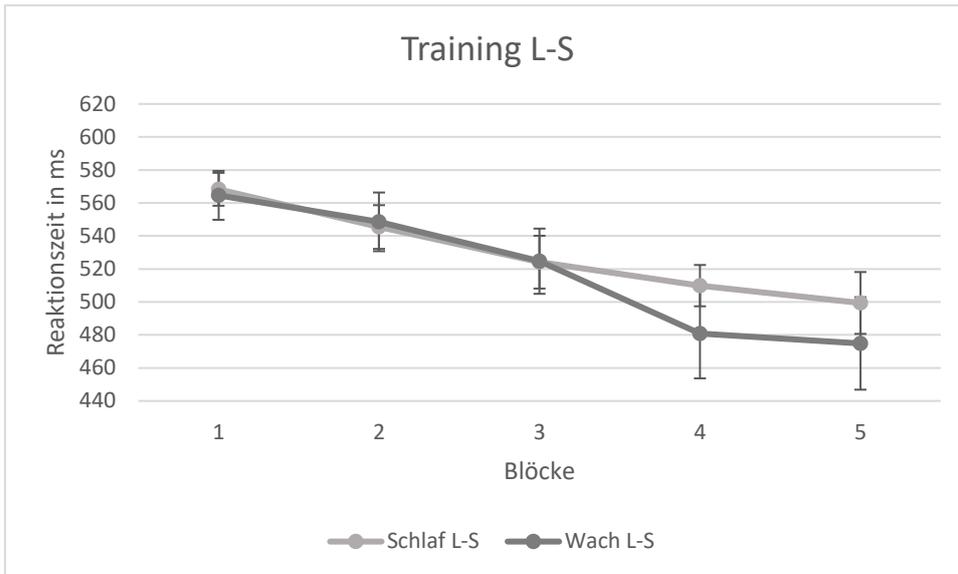


Abbildung 4: Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) im Training bei Schlaf L-S und Wach L-S, unterteilt in die einzelnen Blöcke.

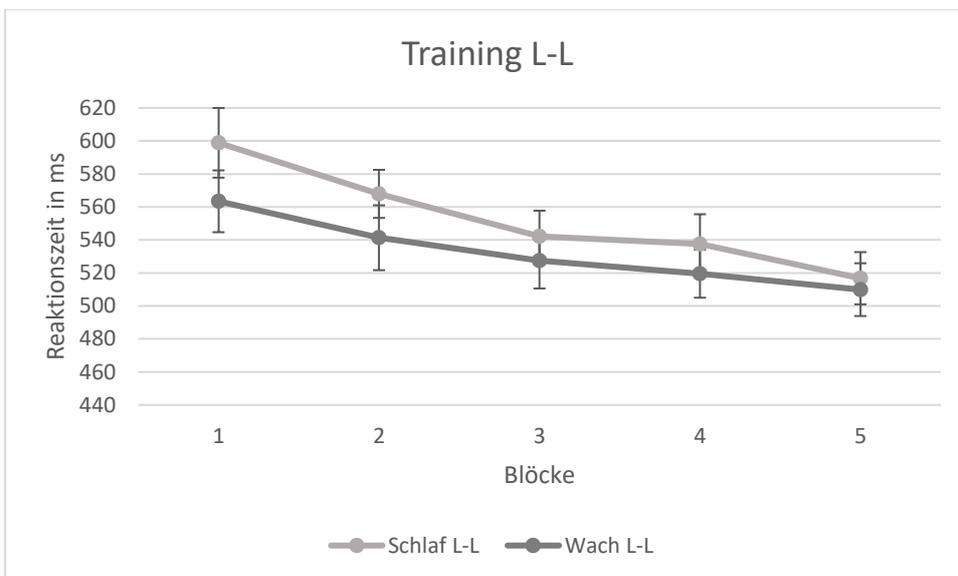


Abbildung 5: Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) im Training bei Schlaf L-L und Wach L-L, unterteilt in die einzelnen Blöcke.

Die Ergebnisse in den Trainingsblöcken zeigten hierbei eine stetige Verbesserung der Reaktionszeiten sowohl in der L-S- (Long-Short-Gruppe) wie auch in der L-L-Gruppe (Long-Long-Gruppe). Innerhalb der Gruppen zeigte sich

kein signifikanter Unterschied zwischen Schlaf- und Wachprobanden (L-S-Gruppe: $F_{4,104}=1,378$; $p=0,247$, L-L-Gruppe: $F_{4,104}=1,263$; $p=0,289$).

3.2 Fehlerquoten und Reaktionszeiten in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-S- Gruppe

Die Tests vor und nach Konsolidierung wurden in jeweils drei Blöcke aufgeteilt. Die 12-er Sequenz wurde dabei pro Block achtmal präsentiert, wobei bei jeder Sequenzwiederholung ein Standardstimulus durch einen abweichenden Stimulus ersetzt wurde. Der sich anschließende Stimulus entsprach wieder der 12-er Sequenz (=Folgestimulus). Das Intervall zwischen den Stimuli war im Test vor der Konsolidierung lang (long bzw. langer Intervallmodus= $2,000 \pm 500\text{ms}$), nach der Konsolidierung kurz (short bzw. kurzer Intervallmodus= $200 \pm 50\text{ms}$).

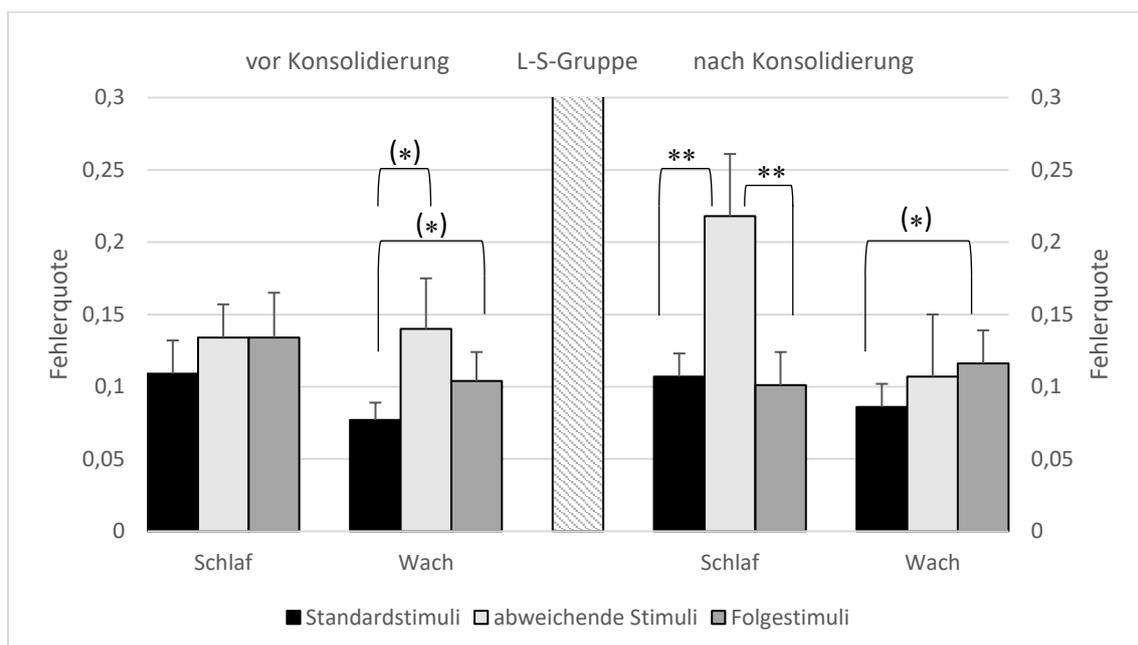


Abbildung 6: Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-S-Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli. ** $p<0,01$; (*) $p<0,1$.

Eine Analyse über beide Gruppen (Schlaf/Wach), beide Messzeitpunkte (vor/nach Konsolidierung) und alle Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) ergab, dass sich die Fehlerquoten über das

Konsolidierungsintervall hinweg in der Schlaf- und Wachgruppe unterschiedlich entwickelten [Interaktion Gruppe x Sitzung x Stimulustyp; $F_{2,50} = 4,118$; $p = 0,022$]. Separate Analysen für die beiden Messzeitpunkte zeigten einen signifikanten Unterschied in Bezug auf die verschiedenen Stimulustypen nach Konsolidierung, jedoch nicht vor Konsolidierung [Interaktion Gruppe x Stimulustyp; vor Konsolidierung, $F_{2,52} = 0,731$; $p = 0,451$; nach Konsolidierung, $F_{2,50} = 4,429$; $p = 0,035$].

Weiterführend wurden Einzelvergleiche zwischen den einzelnen Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) durchgeführt. Wurden den Probanden von der Sequenz abweichende und somit nicht vorhersagbare Stimuli präsentiert, zeigte sich vor dem Konsolidierungsintervall bei den Ergebnissen der Wachprobanden ein Trend, über dem Zufall von Null zu liegen (vor Konsolidierung, Wachprobanden: $t_{(13)} = 2,088$; $p = 0,057$, *t*-Test für abhängige Stichproben). Die Ergebnisse veränderten sich im Verlauf des Konsolidierungsintervalls. Während sich über das Konsolidierungsintervall hinweg ein Effekt bei den Schlafprobanden zeigte, verschwand dieser bei Wachprobanden (vor Konsolidierung, Schlafprobanden: $t_{(13)} = 1,660$; $p = 0,121$; nach Konsolidierung, Schlafprobanden: $t_{(13)} = 3,469$; $p = 0,004$, *t*-Test für abhängige Stichproben; vor Konsolidierung, Wachprobanden, $t_{(13)} = 2,088$; $p = 0,057$; nach Konsolidierung, Wachprobanden, $t_{(13)} = 0,656$; $p = 0,523$, *t*-Test für abhängige Stichproben).

Ausgehend von der Hypothese, dass eine bessere Konsolidierung des internen Sequenzmodells zu einer höheren Fehlerquote bei abweichenden Stimuli (=modellinkongruente Stimuli) als bei Folgestimuli (=modellkongruente Stimuli) führt, wurde ein „Vorhersage-Index“ berechnet, indem die Fehlerquote für Folgestimuli von der Fehlerquote für abweichende Stimuli subtrahiert wurde. Es zeigte sich dabei eine unterschiedliche Entwicklung in beiden Gruppen über das Konsolidierungsintervall hinweg (vor Konsolidierung, $F_{1,26} = 0,663$; $p = 0,423$; nach Konsolidierung, $F_{1,25} = 5,315$; $p = 0,030$). Weitere Analysen zeigten jedoch nur dann einen erhöhten Vorhersage-Index, wenn die Konsolidierung schlafabhängig stattfand [Schlafprobanden: $t_{(13)} = 3,135$; $p = 0,008$, *t*-Test für abhängige Stichproben, Wachprobanden: $t_{(13)} = 0,243$; $p = 0,812$, *t*-Test für

abhängige Stichproben]. Eine erhöhte Vorhersagekraft führte somit bei den Schlafprobanden zu einem leichteren Wiedereinfließen in die ursprüngliche 12-er Sequenz.

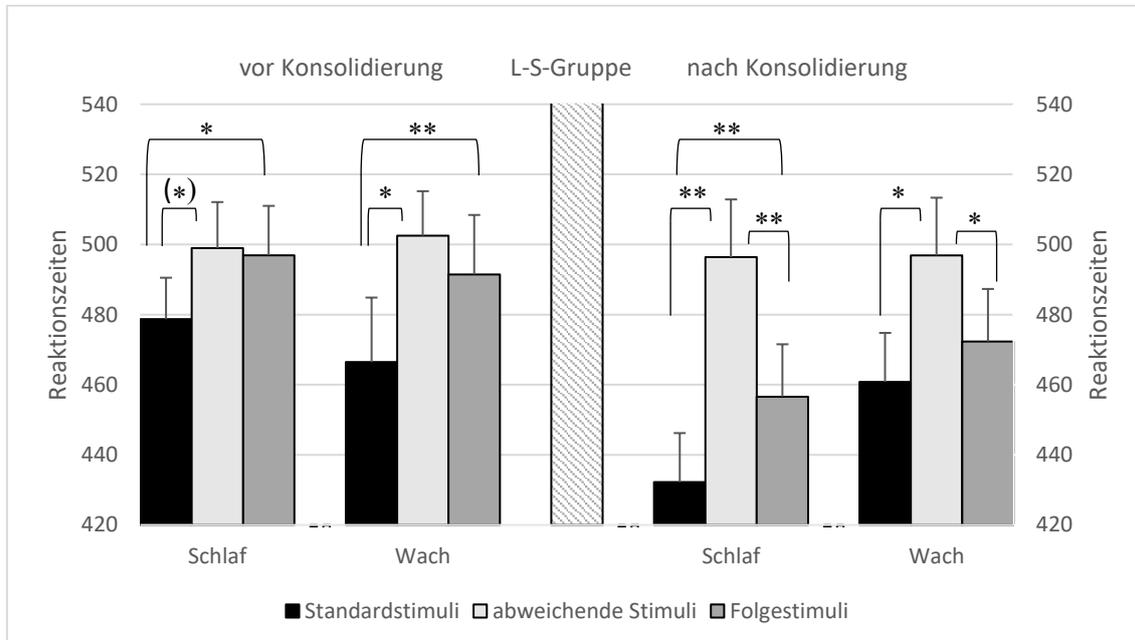


Abbildung 7: Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-S-Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli. ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; (*) $p < 0,1$.

Eine Analyse über beide Gruppen (Schlaf/Wach), beide Messzeitpunkte (vor/nach Konsolidierung) und alle Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) zeigte keine Entwicklung hinsichtlich der Reaktionszeiten über das Konsolidierungsintervall hinweg [Interaktion Gruppe x Sitzung x Stimulustyp; $F_{2,50} = 1,055$; $p = 0,356$]. Im Sinne der Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen im Bereich der Fehlerquoten, wurden weiterführend die gleichen Berechnungen durchgeführt. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Reaktionszeiten vor und nach der Konsolidierung [Interaktion Gruppe x Stimulustyp; vor Konsolidierung: $F_{2,52} = 0,582$; $p = 0,541$; nach Konsolidierung: $F_{2,50} = 1,432$; $p = 0,248$]. Nachfolgend wurden Einzelvergleiche zwischen den verschiedenen Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) untersucht. Bei den Einzelanalysen zeigte sich dabei eine unterschiedliche Entwicklung hinsichtlich der Reaktionszeiten

bei Standardstimuli im Vergleich mit abweichenden Stimuli. Während Probanden der Wachgruppe sowohl vor wie auch nach der Konsolidierung signifikant langsamere Reaktionszeiten bei der Präsentation von abweichenden Stimuli im Vergleich mit Standardstimuli zeigten (vor Konsolidierung: $t_{(13)}=2,486$; $p=0,027$, t -Test für abhängige Stichproben; nach Konsolidierung: $t_{(13)}=2,511$; $p=0,026$, t -Test für abhängige Stichproben), zeigte sich dies bei den Probanden der Schlafgruppe nur nach der Konsolidierung, nicht jedoch vor der Konsolidierung (vor Konsolidierung: $t_{(13)}=2,035$; $p=0,063$, t -Test für abhängige Stichproben; nach Konsolidierung: $t_{(13)}=4,465$; $p= <0,001$, t -Test für abhängige Stichproben). Diese Resultate decken sich mit den vorausgegangenen Ergebnissen im Bereich der Fehlerquoten. Eine falsche Eingabe durch den Probanden erhöhte einerseits die Fehlerquote, andererseits verlangsamte sich aber auch die Reaktionszeit. Ein präsentierter Stimulus verschwand nämlich nur dann, wenn der Proband den korrekten Tastendruck betätigte. Analog zu den Ergebnissen im Bereich der Fehlerquoten spiegelt sich auch in den Reaktionszeiten ein leichteres Wiedereinflinden in die 12-er Sequenz nach der Konsolidierung wider. Beim auf den abweichenden Stimulus folgenden, zur gelernten Sequenz passenden Reiz (=Folgestimulus), verkürzte sich die Reaktionszeit bei Schlaf- und Wachprobanden (Schlafprobanden: $t_{(13)}=3,540$; $p= 0,004$, t -Test für abhängige Stichproben, Wachprobanden: $t_{(13)}=2,182$; $p=0,048$, t -Test für abhängige Stichproben).

3.3 Fehlerquoten und Reaktionszeiten in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L- Gruppe

Die Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L-Gruppe (Long-Long-Gruppe) entsprachen dem Aufbau in der L-S-Gruppe (Long-Short-Gruppe) mit dem Unterschied, dass in beiden Tests ein langes Intervall (long bzw. langer Intervallmodus = $2,000 \pm 500$ ms) zwischen den Stimuli Anwendung fand.

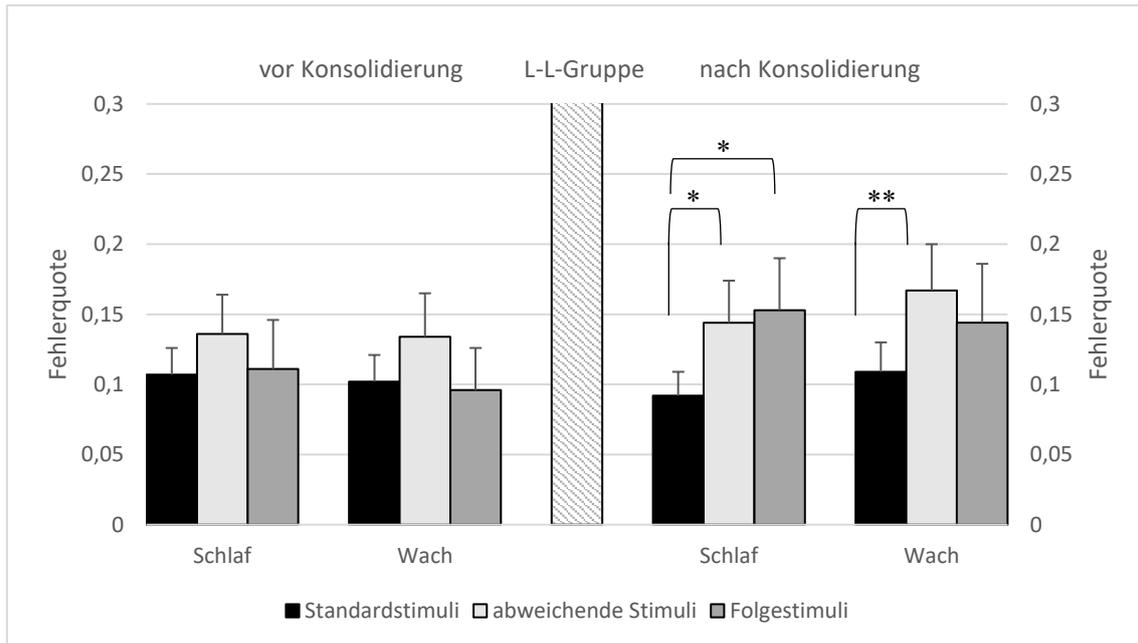


Abbildung 8: Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L-Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli. ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Eine Analyse über beide Gruppen (Schlaf/Wach), beide Messzeitpunkte (vor/nach Konsolidierung) und alle Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) zeigte keine unterschiedliche Entwicklung über das Konsolidierungsintervall hinweg [$F_{2,54} = 0,600$; $p = 0,488$]. Hypothesengetrieben erfolgten weitere separate Analysen hinsichtlich der beiden Messzeitpunkte. Die Ergebnisse vor der Konsolidierung und nach der Konsolidierung zeigten keine signifikante Interaktion [Interaktion Gruppe x Stimulustyp; vor der Konsolidierung: $F_{2,54} = 0,011$; $p = 0,989$, nach der Konsolidierung: $F_{2,54} = 0,834$; $p = 0,440$]. Anschließend erfolgten weitere separate Analysen zwischen den verschiedenen Stimulustypen. Hierbei zeigte sich unabhängig von der Gruppenzuordnung eine signifikant höhere Fehlerquote nach der Konsolidierung bei abweichenden Stimuli im Vergleich mit Standardstimuli (Schlafprobanden: $t_{(14)} = 2,569$; $p = 0,022$, t -Test für abhängige Stichproben, Wachprobanden: $t_{(13)} = 3,565$; $p = 0,003$, t -Test für abhängige Stichproben). Nach der Konsolidierung machten Schlafprobanden der L-L-Gruppe mehr Fehler bei der Eingabe der Folgestimuli als bei den Standardstimuli (nach Konsolidierung: $t_{(14)} = 2,418$; $p = 0,030$, t -Test für abhängige

Stichproben, vor Konsolidierung: $t_{(14)}=0,188$; $p=0,853$, t -Test für abhängige Stichproben). Es folgte die Berechnung des „Vorhersage-Index“. Eine erhöhte Vorhersagekraft konnte hierbei weder hinsichtlich des Messzeitpunktes [vor Konsolidierung: $F_{1,27}=0,061$; $p=0,899$; nach Konsolidierung, $F_{1,27}=1,436$; $p=0,241$] noch in Bezug auf die Gruppenzugehörigkeit festgestellt werden (vor Konsolidierung, Schlafprobanden: $t_{(14)}=0,919$; $p=0,374$, t -Test für abhängige Stichproben; Wachprobanden: $t_{(13)}=0,787$; $p=0,446$, t -Test für abhängige Stichproben; nach Konsolidierung, Schlafprobanden: $t_{(14)}=0,345$; $p=0,735$, t -Test für abhängige Stichproben; Wachprobanden: $t_{(13)}=1,279$; $p=0,223$, t -Test für abhängige Stichproben). Dementsprechend zeigte sich, im Gegensatz zur L-S-Gruppe, keine unterschiedliche Entwicklung über das Konsolidierungsintervall hinweg [Interaktion Gruppe x Sitzung x Stimulustyp: $F_{1,27}=0,677$; $p=0,418$].

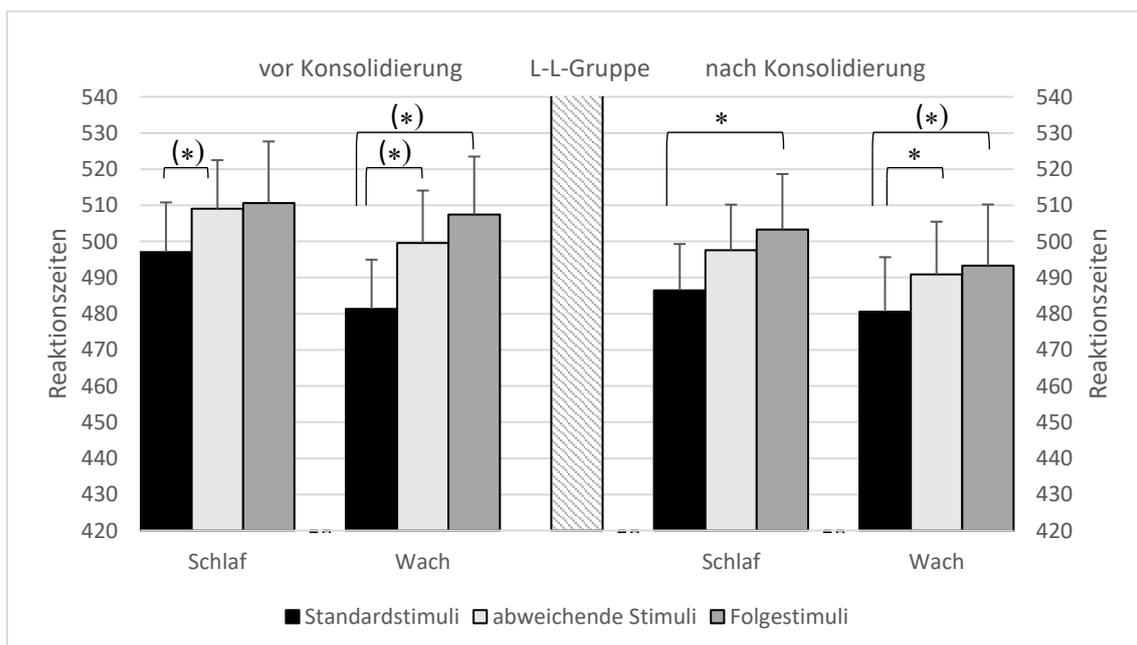


Abbildung 9: Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) in den Tests vor und nach Konsolidierung in der L-L Gruppe, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli. * $p < 0,05$; (*) $p < 0,1$.

Basierend auf den Reaktionszeitdaten wurde eine Analyse über beide Gruppen (Schlaf/Wach), beide Messzeitpunkte (vor/nach Konsolidierung) und alle Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli)

durchgeführt und zeigte keine unterschiedliche Entwicklung über das Konsolidierungsintervall hinweg [$F_{2,54}=0,293$; $p=0,683$]. Separate Analysen hinsichtlich des Messzeitpunktes zeigten keinen Unterschied vor oder nach der Konsolidierung [Interaktion Gruppe x Stimulustyp: vor Konsolidierung, $F_{2,54}=0,109$; $p=0,845$, nach Konsolidierung, $F_{2,54}=0,026$; $p=0,938$]. Weiterführend erfolgten Einzelanalysen zwischen den einzelnen Stimulustypen. Gruppen- und messzeitpunktunabhängig zeigte sich beim Vergleich zwischen abweichenden und Folgestimuli kein leichteres Wiedereinflinden in die ursprüngliche Sequenz (vor der Konsolidierung, Schlafprobanden: $t_{(14)}=0,166$; $p=0,871$, t -Test für abhängige Stichproben, Wachprobanden: $t_{(13)}=0,333$; $p=0,744$, t -Test für abhängige Stichproben; nach der Konsolidierung, Schlafprobanden: $t_{(14)}=0,614$; $p=0,0549$, t -Test für abhängige Stichproben, Wachprobanden: $t_{(13)}=0,411$; $p=0,688$, t -Test für abhängige Stichproben).

3.4 Expliziteits-Tests

Nach dem Test nach Schlaf-/Wach-Konsolidierung folgte das 1. Debriefing (siehe 9.4). Im Rahmen dessen erhielten die Probanden die Information über das Vorliegen einer 12-er Sequenz, welche in den vorher durchgeführten Tests implizit (= unbewusst) gelernt werden sollte. Mit den sich anschließenden Tests wurde einerseits dieses implizite Wissen abgefragt, andererseits sollte mit Hilfe dieser Tests festgestellt werden, ob die Probanden expliziten Zugriff auf dieses Wissen hatten. Während des 1. Debriefings erhielten die Probanden die Aufgabe die Sequenz auf Basis des vorliegenden Schemas (siehe 9.4) als Zahlenabfolge (jedem Stimulus wurde eine Zahl von eins bis sechs zugewiesen) zu notieren (schriftlicher Abruf). Im Anschluss sollte mit der bekannten Tastenzuordnung diese Sequenz zweimal am Computer rekonstruiert werden (1. Freier Abruf). In weiteren Tests sollten die Probanden entscheiden, ob ein ihnen präsentiertes Triplet aus drei Stimuli Teil der Sequenz war („bekannt“) oder nicht („unbekannt“) (Triplet-Wiedererkennungsaufgabe). In der Triplet-Vervollständigungsaufgabe musste ein Stimulstriplet durch Hinzufügen des letzten Stimulus vervollständigt werden. Sowohl bei der Triplet-

Wiedererkennungs-, als auch bei der Triplet-Vervollständigungsaufgabe wurden die Probanden nach jeder Eingabe nach ihrer Entscheidungssicherheit, basierend auf einer Skala von eins bis vier (1 \triangleq sehr unsicher bis 4 \triangleq sehr sicher), befragt. Nach Durchführung des finalen Abrufs (siehe 3.5 und 3.6) wurde erneut computergestützt die 12er- Sequenz zweimal rekonstruiert (2. Freier Abruf).

Die Auswertung des 1. und 2. Freien Abrufs erfolgte einerseits liberal und berücksichtigte dabei alle kontinuierlich korrekten Items und andererseits konservativ, wobei alle kontinuierlich korrekten Items ab dem ersten Tastendruck berücksichtigt wurden. In die Auswertung gingen somit sieben Messungen über das Sequenzwissen pro Gruppe ein.

Die Auswertungen erfolgten mittels *t*-Tests zwischen den Schlaf- und Wachgruppen. Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Schlaf- und Wachprobanden der L-S- und L-L-Gruppe ($p \geq 0,088$; unabhängige Stichproben).

	L-S-Gruppe		L-L-Gruppe	
	<i>Schlaf</i>	<i>Wach</i>	<i>Schlaf</i>	<i>Wach</i>
Schriftlicher Abruf	2,57 \pm 0,23	2,36 \pm 0,25	2,33 \pm 0,27	2,43 \pm 0,14
1. Freier Abruf (liberal)	0,24 \pm 0,02	0,30 \pm 0,03 (*)	0,26 \pm 0,02	0,25 \pm 0,02
1. Freier Abruf (konservativ)	0,15 \pm 0,02	0,18 \pm 0,04	0,14 \pm 0,02	0,14 \pm 0,01
Triplet-Wiedererkennung	0,52 \pm 0,17	0,46 \pm 0,11	0,23 \pm 0,15	0,12 \pm 0,15
Triplet-Vervollständigung	0,29 \pm 0,04	0,32 \pm 0,03	0,30 \pm 0,04	0,29 \pm 0,03
2. Freier Abruf (liberal)	0,30 \pm 0,03	0,31 \pm 0,03	0,29 \pm 0,03	0,32 \pm 0,05
2. Freier Abruf (konservativ)	0,18 \pm 0,04	0,25 \pm 0,04	0,22 \pm 0,04	0,25 \pm 0,05

Abbildung 10: Auswertung Explizitheits-Tests. Bei den angegebenen Daten handelt es sich um Mittelwerte \pm SEM; L-S-Gruppe N= 28; L-L-Gruppe N=29. (*) $p < 0,1$.

3.5 Fehlerquoten und Reaktionszeiten beim finalen Abruf in der L-S-Gruppe

Im Anschluss an die Explizitheitstests erfolgte der finale Abruf. Der Aufbau entsprach den Tests vor und nach Konsolidierung (drei Blöcke, pro Block achtmal die Wiederholung der 12-er Sequenz, pro Sequenzwiederholung ein abweichender Stimulus und ein Folgestimulus) und fand im ursprünglich trainierten Intervall statt (long bzw. langer Intervallmodus = $2,000 \pm 500$ ms).

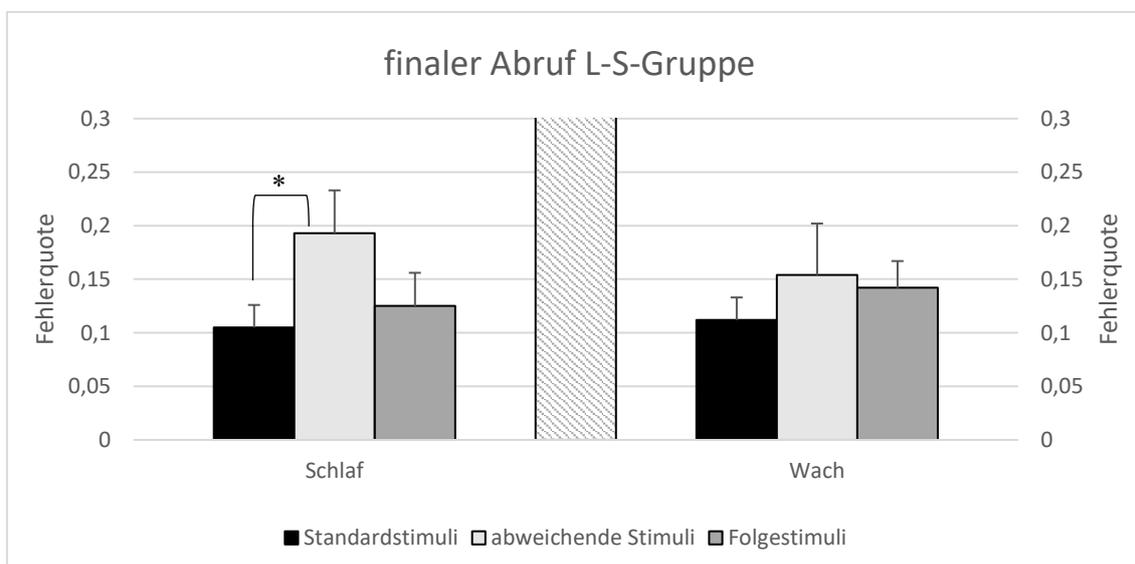


Abbildung 11: Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach L-S, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli. * $p < 0,05$.

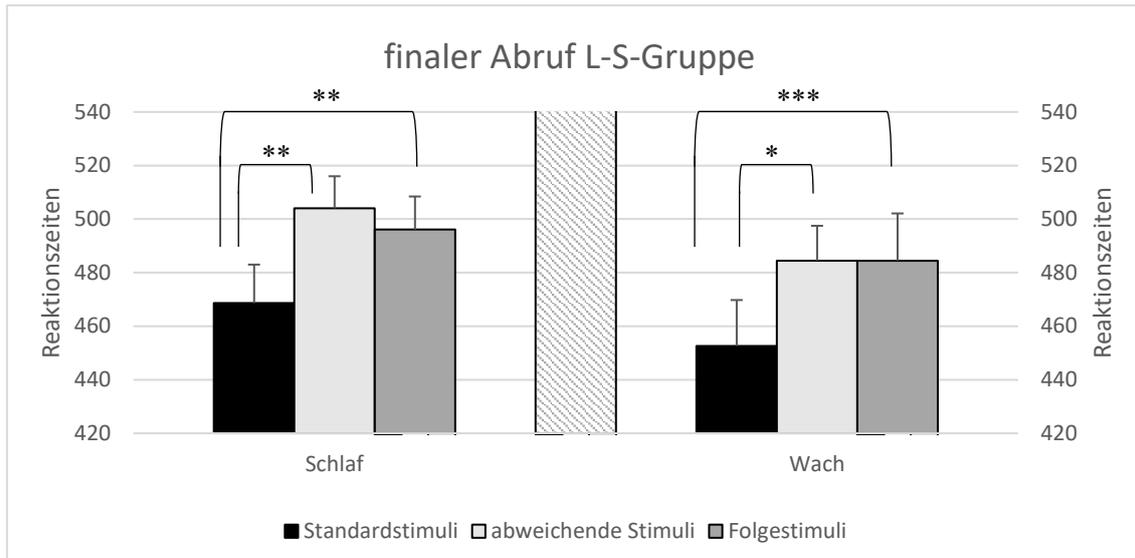


Abbildung 12: Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach L-S, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli.

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Eine Analyse über beide Gruppen (Schlaf/Wach) und alle Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) zeigten hinsichtlich der Reaktionszeiten und der Fehlerquoten keine signifikanten Interaktionen (Reaktionszeiten, $F_{4,52} = 2,058$; $p = 0,092$, Fehlerquoten, $F_{4,52} = 0,926$; $p = 0,452$). Es folgten Einzelanalysen zwischen den verschiedenen Stimulustypen. Im Gegensatz zu den Wachprobanden machten Probanden der Schlafgruppe mehr Fehler bei der Präsentation von abweichenden Stimuli als bei Standardstimuli [Schlafprobanden: $F_{1,13} = 7,212$; $p = 0,019$; Wachprobanden: $F_{1,13} = 1,210$; $p = 0,291$]. Es zeigte sich beim Vergleich von abweichenden Stimuli mit Folgestimuli kein leichteres Wiederfinden in die ursprüngliche Sequenz (Fehlerquoten, Schlafprobanden: $F_{1,13} = 3,124$; $p = 0,101$, Wachprobanden: $F_{1,13} = 0,061$; $p = 0,809$; Reaktionszeiten, Schlafprobanden: $F_{1,13} = 1,442$; $p = 0,251$, Wachprobanden: $F_{1,13} = 4,924$; $p = 0,998$). Nach dem Debriefing zeigten sich bei Schlaf- und Wachprobanden schnellere Reaktionszeiten bei Standardstimuli im Vergleich mit abweichenden Stimuli (Schlafprobanden, $F_{1,13} = 11,367$; $p = 0,005$, Wachprobanden, $F_{1,12} = 5,906$; $p = 0,030$).

3.6 Fehlerquoten und Reaktionszeiten beim finalen Abruf in der L-L-Gruppe

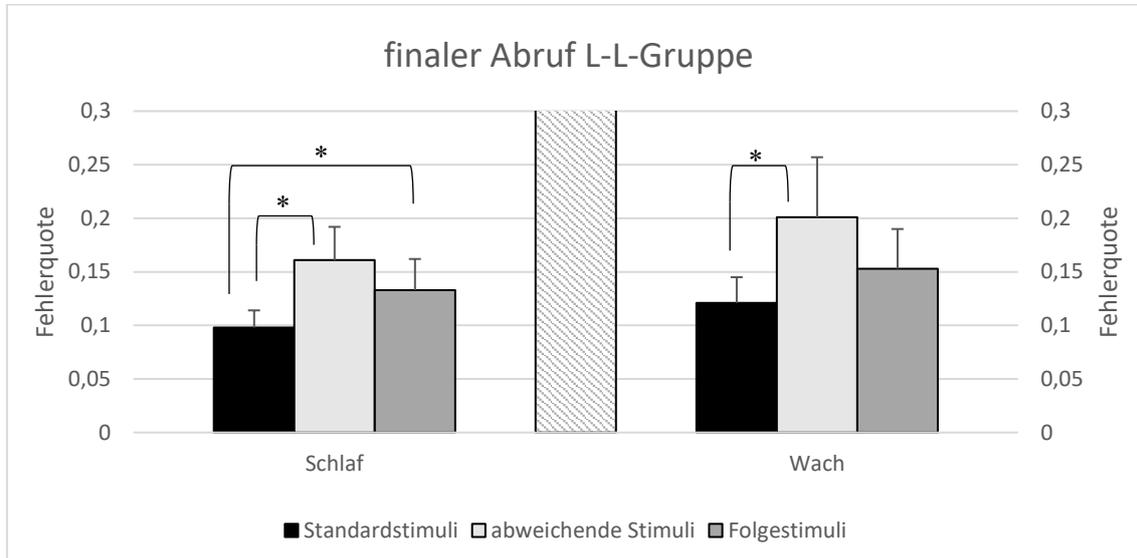


Abbildung 13: Fehlerquoten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach L-L, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli. * $p < 0,05$.

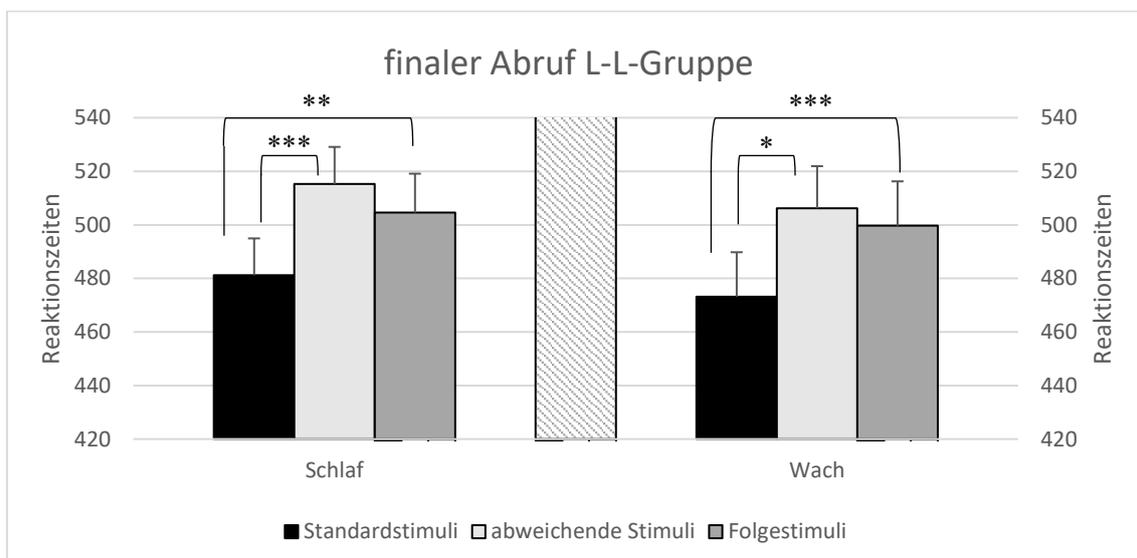


Abbildung 14: Reaktionszeiten (Mittelwerte \pm SEM) beim finalen Abruf bei Schlaf und Wach L-L, unterschieden zwischen Standardstimuli, abweichenden Stimuli und Folgestimuli.

*** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

Eine Analyse über beide Gruppen (Schlaf/Wach) und alle Stimulustypen (Standardstimuli, abweichende Stimuli, Folgestimuli) zeigte keine signifikanten Interaktionen hinsichtlich der Reaktionszeiten und der Fehlerquoten [Reaktionszeiten, $F_{2,54} = 0,150$; $p = 0,861$, Fehlerquoten, $F_{2,54} = 0,194$; $p = 0,824$]. Hypothesengetrieben erfolgten Einzelanalysen zwischen den verschiedenen Stimulustypen. Erhielten die Probanden die Information, dass eine Sequenz vorlag, so zeigten sich bei Schlaf- und Wachprobanden der L-L-Gruppe, höhere Fehlerquoten bei abweichenden Stimuli im Vergleich mit Standardstimuli [Schlafprobanden: $F_{1,14} = 5,760$; $p = 0,031$; Wachprobanden: $F_{1,13} = 5,310$; $p = 0,038$]. Analog zu diesen Ergebnissen zeigte sich auch eine signifikant längere Reaktionszeit bei abweichenden Stimuli im Vergleich mit Standardstimuli [Schlafprobanden: $F_{1,14} = 39,271$; $p < 0,001$; Wachprobanden: $F_{1,13} = 6,848$; $p = 0,021$]. Sowohl Probanden der Schlaf- wie auch Probanden der Wachgruppe reagierten bei Präsentation von Folgestimuli signifikant langsamer als bei Standardstimuli [Schlafprobanden: $F_{1,14} = 12,252$; $p = 0,004$; Wachprobanden: $F_{1,13} = 31,512$; $p < 0,001$].

3.7 Kontrolltests

3.7.1 Tests vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung

Vor der Trainings- und Testphase nahmen alle Probanden an einem Vigilanztest teil (Diekelmann et al., 2013) und schätzten zudem ihre aktuelle Schläfrigkeit anhand der Stanford Sleepiness Scale ein (Hoddes et al., 1972). Zusätzlich erfolgten Tests hinsichtlich der visuell-räumlichen Gedächtnisspanne (Corsi, 1973) sowie eine Einteilung hinsichtlich des Chronotyps (Horne & Ostberg, 1976).

Alle Probanden waren vor und nach der Konsolidierung gleich wachsam (Vigilanz: $p > 0,05$; t -Test für unabhängige Stichproben).

In der L-S-Gruppe hatten die Probanden der Schlafgruppe eine höhere Blockspanne ($t_{(26)} = 3,73$; $p = < 0,001$, t -Test für unabhängige Stichproben) sowie einen höheren Supra Span ($t_{(26)} = 2,21$; $p = 0,036$, t -Test für unabhängige

Stichproben) im Vergleich mit den Probanden der Wachgruppe. Hinsichtlich des Chronotyps konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden ($p > 0,5$; t -Test für unabhängige Stichproben).

vor Schlaf/Wach-Retention	L-S-Gruppe		L-L-Gruppe	
	Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
Vigilanz	452,14 ± 9,07	445,07 ± 9,23	442,90 ± 13,01	446,93 ± 10,48
SSS	2,93 ± 0,23	2,54 ± 0,13	3,27 ± 0,26	2,43 ± 0,15 *

nach Schlaf/Wach-Retention	Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
Vigilanz	439,14 ± 5,55	423,43 ± 5,69 (*)	433,30 ± 8,39	437,64 ± 10,48
SSS	2,64 ± 0,20	2,86 ± 0,23	2,73 ± 0,21	2,79 ± 0,35
Chronotyp	2,93 ± 0,13	2,86 ± 0,10	2,93 ± 0,12	2,93 ± 0,07
Corsi (Blockspannweite)	7,21 ± 0,30	5,86 ± 0,21 **	6,00 ± 0,37	6,69 ± 0,36
Corsi (Supra Span)	5,21 ± 0,73	3,14 ± 0,59 *	3,80 ± 0,76	3,92 ± 0,80

Abbildung 15: Kontrolltests vor und nach Schlaf-/Wachkonsolidierung

Bei den angegebenen Daten handelt es sich um Mittelwerte ± SEM. L-S-Gruppe N= 28; L-L-Gruppe N= 29. Vigilanz gemessen in ms, SSS (Standfordschläfrigkeitsskala) 7-Punkte-Skala für Schläfrigkeit, Chronotyp gemessen anhand des D-MEQ (von 1 ≙ definitiv abends bis 5 ≙ definitiv morgens), Corsi Blockspannweite zur Messung der räumlichen Merkspanne, Corsi Supra Span zur Messung der Anzahl der Wiederholungen die notwendig sind, um eine Sequenz von visuellen Elementen implizit zu lernen. ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; (*) $p < 0,1$.

3.7.2 Schlafparameter

Die Auswertung erfolgte mittels Aktigraphie und subjektiven Fragebögen. Berücksichtigt wurden in der Auswertung die Schlafperiode (Zeit zwischen dem Einschlafen und dem Aufstehen), Zeit im Bett (TiB; Zeit zwischen dem Ausschalten des Lichts und dem Aufstehen), Schlafbeginn-Latenz (SOL;

Differenz zwischen dem Lichtausschalten und der Einschlafzeit) sowie das Aufwachen nach Schlafbeginn (WASO).

Aktigraphie	L-S-Gruppe		L-L-Gruppe	
	Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
Zeit im Bett (TiB)	380,25 ± 35,54	0,00	376,63 ± 36,13	23,50 ± 23,50
Schlafbeginn-Latenz (SOL)	24,83 ± 9,59	0,00	13,55 ± 3,60	22,50 ± 21,75
Schlafperiode	345,35 ± 18,42	1,93 ± 1,93	394,42 ± 15,79	22,36 ± 15,19
Aufwachen nach Schlafbeginn (WASO)	22,77 ± 2,54	0,13 ± 0,13	26,98 ± 3,97	3,70 ± 2,93

subjektive Fragebögen	Schlaf		Wach	
	Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
Zeit im Bett (TiB)	419,07 ± 12,77	0,00	427,67 ± 12,17	0,00
Schlafbeginn-Latenz (SOL)	17,50 ± 4,69	0,00	15,00 ± 2,76	0,00
Schlafperiode	401,57 ± 10,05	0,00	412,67 ± 10,67	0,00
Aufwachen nach Schlafbeginn (WASO)	7,17 ± 3,08	0,00	5,29 ± 3,49	0,00

Abbildung 16: Schlafparameter

Bei den angegebenen Daten handelt es sich um Mittelwerte ± SEM. L-S-Gruppe N= 28; L-L-Gruppe N= 29. Zeit im Bett (TiB), Schlafbeginn (SOL), Schlafperiode und Aufwachen nach Schlafbeginn (WASO) gemessen in min.

Die Auswertung der Aktigraphiedaten zeigte sowohl in der L-S- als auch in der L-L-Gruppe ein normales Schlafverhalten (TiB, Mittelwert ± SEM, L-S-Gruppe: 380,25 ± 35,54; L-L-Gruppe: 376,63 ± 36,13). Dabei schliefen Schlafprobanden der L-L-Gruppe schneller ein als Probanden der L-S-Gruppe (SOL, L-L-Gruppe: 13,55 ± 3,60; L-S-Gruppe: 24,83 ± 9,59). Subjektiv gaben die Probanden in den Fragebögen an, seltener bzw. kürzer in der Nacht wach gewesen zu sein als mittels Aktigraphie aufgezeichnet worden war (WASO, subjektive Fragebögen, L-S-Gruppe: 7,17 ± 3,08, L-L-Gruppe: 5,29 ± 3,49; Aktigraphie, L-S-Gruppe: 22,77 ± 2,54; L-L-Gruppe: 26,98 ± 3,97).

Bei den Wachprobanden erfolgte die Analyse mittels Aktigraphiedaten sowie anhand des Tagesaktivitätenprotokolls (siehe Anhang 9.3). Keiner der

Wachprobanden gab dabei an tagsüber geschlafen zu haben. Bei drei Probanden zeigten sich Inaktivitätsphasen (z.B. durch Fernsehen), welche als Schlaf gewertet wurden (Schlafperiode, L-S-Gruppe: $1,93 \pm 1,93$, L-L-Gruppe: $22,36 \pm 15,19$).

4. Diskussion

Da bekanntermaßen durch Schlaf die Gedächtniskonsolidierung positiv beeinflusst wird (Rasch & Born, 2013), wurde in der vorliegenden Studie der Einfluss von Schlaf auf die Vorhersage von visuell-motorischen Abfolgen untersucht.

Als Grundlage für diese Studie dienten dabei die Theorien zu „Predictive Coding“ (Rao & Ballard, 1999). Diese besagen, dass durch Top-Down-Vorhersagesignale modellkongruente, und somit vorhersehbare Informationen, erklärt werden können. Handelt es sich jedoch um modellinkongruente Informationen, unterliegen diese den Bottom-up Vorhersagefehlern.

Sechs von insgesamt 64 Probanden zeigten im Verlauf der Studie explizites Wissen über die Sequenz, so dass diese Ergebnisse nicht in die statistische Analyse miteingingen. Der Stichprobenumfang lag somit bei 58 (L-L-Gruppe: 15 Schlafprobanden, 13 Wachprobanden; L-S-Gruppe: 15 Schlafprobanden, 15 Wachprobanden) und war somit umfangreich genug, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen.

Während der Trainingsphase wurden alle Probanden auf eine deterministisch visuell-motorische 12-er Sequenz trainiert. Basierend auf der Erkenntnis, dass nicht die Sequenzlänge sondern der Aufbau der Sequenz ein entscheidender Faktor für das Lernen ist (Stadler, 1992, 1993, 1995; Stadler & Neely, 1997), wurde die SRTT in unserer Studie modifiziert (siehe 2.5).

Da bekanntermaßen Lernen in einem langen Intervall möglich ist (Frensch & Miner, 1994; Willingham et al., 1997), fand die Stimuluspräsentation in der Trainingsphase in einem langen Intervall („long“= $2,000 \pm 500\text{ms}$) statt.

Im Test „Training“ kam es dabei, unabhängig von der Gruppenzuordnung (L-S- oder L-L-Gruppe) bzw. der Bedingung (Schlaf- oder Wach), zu einer kontinuierlichen Leistungssteigerung in Form von schnelleren Reaktionszeiten. Dies lässt sich einerseits durch die Gewöhnung an die Computeraufgabe, andererseits auch durch das Lernen der impliziten Sequenz begründen.

Nach einer 30minütigen Pause, welche unter reizarmen Bedingungen im

Versuchslabor stattfand, folgte der Test „vor Konsolidierung“. In den Analysen der verschiedenen Stimulustypen zeigten sich hierbei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schlaf- und Wachprobanden der L-S- und L-L-Gruppen. Somit hatten zu Beginn des Konsolidierungsprozesses alle Probanden die gleichen Voraussetzungen, so dass sich die nachfolgenden signifikanten Unterschiede nach dem Konsolidierungsintervall nicht auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen begründen lassen können. Die Länge des Konsolidierungsintervall betrug zwölf Stunden und bestand bei den Probanden der Schlafgruppen aus einer Nacht mit regelrechtem Schlaf. Der Konsolidierungsprozess der implizit gelernten Sequenz konnte somit normal verlaufen. Die Probanden der Wachgruppen verrichteten während des Konsolidierungsintervalls normale Tätigkeiten (Musik hören, etc.) und dienten somit als Vergleichswert.

Sowohl in der L-S- wie auch in der L-L-Gruppe fand die Trainings- und Testphase zu den gleichen Uhrzeiten statt und schließt somit einen Einfluss des zirkadianen Rhythmus auf unsere Ergebnisse aus. Diesbezüglich zeigten auch schon vorausgegangene Untersuchungen, dass die Leistungen in der SRTT unabhängig vom Zeitpunkt des Lernens und des Testens sind (Robertson et al., 2004).

Um zu untersuchen ob die Regelmäßigkeiten der verwendeten 12er Sequenz zu einer erhöhten Vorhersagekraft und dementsprechend auch zur Bildung eines internen Modells geführt hatte, erfolgte der Test „nach Konsolidierung“. Der Grundsätzliche Aufbau des Tests entsprach dem des Tests „vor Konsolidierung“, so dass die Ergebnisse in Bezug auf die abweichenden Stimuli und Folgestimuli nur mit der schlafinduzierten Verbesserung erklärt werden können. Des Weiteren wurde in dieser Studie auch die zeitliche Abstraktion von Sequenzwissen untersucht. Dahingehend wurde das Stimulusintervall in der L-S-Gruppe verkürzt („short“, 200 +/- 50 ms), während es in der L-L-Gruppe unverändert gleich lang blieb.

Im Rahmen dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die Regelmäßigkeiten der verwendeten 12-er Sequenz aus dem Bottom up extrahiert wurden und zur Bildung eines internen Modells führten, welches sich jedoch nur dann

nachweisen ließ, wenn der Abruf in einem kurzen Intervall erfolgte. Erfolgte der Abruf in einem langen Intervall, zeigte sich weder in den Fehlerquoten noch in den Reaktionszeiten Hinweise auf das Vorliegen eines internen Modells. Hierbei sollte in Erwägung gezogen werden, dass durch das lange Intervall zwischen den Stimuli den Probanden der L-L-Gruppe zu viel Zeit zum Reagieren bzw. Nachdenken gegeben wurde. Weiterhin könnte auch die monotone Aufgabe zu einer mangelnden Motivation geführt haben, welche sich somit unbewusst auf die Ergebnisse ausgewirkt hat (Willingham et al., 1997).

Eine Verfestigung dieses internen Sequenzmodells fand zudem nur dann statt, wenn die Konsolidierung schlafabhängig war. Dies lässt sich anhand signifikant unterschiedlicher Fehlerquoten zwischen den verschiedenen Stimulustypen darstellen. Wurde ein modellinkongruenter Stimulus (abweichender Stimulus) präsentiert, erhöhte sich die Fehlerquote und dementsprechend verringerte sich die Vorhersagekraft. Ein darauffolgender modellkongruenter Stimulus (Folgestimulus) verringerte schließlich wieder die Fehlerquote und es erhöhte sich somit die Vorhersagekraft. Demzufolge kam es zu einem leichteren Wiedereinflinden in die ursprüngliche Sequenz. Dabei konnte die Ähnlichkeit von Folgestimuli zu Standardstimuli bereits in früheren Studien nachgewiesen werden (Eimer, Goschke, Schlaghecken, & Stürmer, 1996; Kaposvari, Kumar, & Vogels, 2018).

Im Kontrast zu unseren Ergebnissen stehen die von Robertson et al. (2004). Im Rahmen seiner Studie wurde nur dann ein Schlafeffekt beobachtet, wenn das Sequenzlernen explizit war. Eine Begründung kann hierbei in den verschiedenen Studiendesigns liegen. Während die Probanden in der Studie von Robertson et al. (2004) ganze Blöcke von randomisierten Stimuli präsentiert bekamen, wurden in unseren Tests einzelne von der Sequenz abweichende Stimuli präsentiert. Des Weiteren kann auch die visuelle Reizwahrnehmung ein entscheidender Faktor gewesen sein. So wurde in der vorliegenden Studie neben einem fest definierten Bildschirmabstand (57 cm), auch eine stabile Kopfposition mithilfe einer Kopf-Kinn-Stütze ermöglicht. Zusätzlich diente das in der Bildschirmmitte positionierte Kreuz als Fixierungshilfe, um ein direktes Anschauen der Stimuli zu vermeiden (siehe Kapitel 2.3 und 2.4).

Im Rahmen der Auswertung der Explizitheitstests zeigte sich bei sechs von 64 Probanden explizites Wissen über die Sequenz. Diese Ergebnisse gingen somit nicht in die statistische Analyse mit ein. Bei allen weiteren Probanden konnte kein explizites Wissen über die Sequenz nachgewiesen werden, jedoch zeigte sich bei einigen Probanden Sequenzwissen. Somit können die Ergebnisse zwischen den beiden Gruppen bzw. zwischen den beiden Bedingungen, nicht aufgrund von Explizitheit begründet werden.

Hinsichtlich der Aufmerksamkeit (Diekelmann et al., 2013), der aktuellen Schläfrigkeit (Stanford Sleepiness Scale) (Hoddes et al., 1972) sowie des Chronotyps (Horne & Ostberg, 1976) konnten keine statistisch relevanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen und den beiden Messzeitpunkten festgestellt werden. Es waren somit alle wichtigen Voraussetzungen gegeben, um stichhaltige Daten zu erhalten. Zusätzlich zeigten die Tests „Corsi“ und „Supra Span“ keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der räumlich visuellen Merkspanne (Corsi, 1973).

Damit eine schlafabhängige Konsolidierung stattfinden kann, ist ein regelrechter, achtstündiger Schlaf notwendig (Diekelmann & Born, 2010; Korman et al., 2007). Um das Schlafverhalten der Probanden in den beiden Gruppen untersuchen zu können, erfolgte die Auswertung mittels eines Schlafbogens (SF-A-R) sowie durch Aktigraphiedaten (Actiwatch 2). Hierbei konnte kein statistisch relevanter Unterschied zwischen den Schlafprobanden der L-S- und L-L-Gruppe festgestellt werden. Auch bei den Wachprobanden erfolgte, insbesondere mit Hinblick auf unerlaubte Schlafphasen, eine Kontrolle der Aktivitäten (Tagesaktivitätenprotokoll, Aktigraphiedaten). Keiner der Wachprobanden gab dabei an im Laufe des Tages geschlafen zu haben, jedoch zeigten sich mittels Aktigraphiedaten bei drei Probanden Inaktivitätsphasen (z.B. durch Fernsehen), welche als Schlaf gewertet wurden. In allen Gruppen konnten somit die Konsolidierungsprozesse regelrecht ablaufen, so dass die Voraussetzungen gegeben waren, um stichhaltige Daten erhalten.

4.1 Schlussfolgerung und Aussicht

Mit den hier vorliegenden Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass Schlaf maßgeblich an der Festigung von implizitem Sequenzwissen beteiligt ist. Dabei ist es unabhängig, in welchem zeitlichen Kontext dieses Sequenzwissen erworben wurde. Des Weiteren scheint Schlaf die Entstehung eines internen Modells zu unterstützen, was einerseits zu einer erhöhten Fehlerquote bei abweichenden Stimuli führte, andererseits aber auch ein leichteres Wiedereinfinden in die ursprüngliche Sequenz begünstigte. Zusätzlich zeigte sich auch, dass durch Schlaf der Transfer von unterschiedlichen zeitlichen Kontexten gefördert wurde (Lutz et al., 2018).

Wie bereits in einer aktuellen Veröffentlichung von Balleisio & Cellini (2019) angemerkt, wurde der Schlaf in dieser Studie als Ganzes betrachtet, so dass eine tieferführende Untersuchung hinsichtlich der Schlafarchitektur bzw. der Schlafdynamik nicht erfolgte. Anzunehmen ist hierbei eine entscheidende Rolle des REM-Schlafes, welcher einerseits die Konsolidierung von impliziten Erinnerung unterstützt (Whitehurst, Cellini, McDevitt, Duggan, & Mednick, 2016), andererseits zum größten Teil an der Aktualisierung des internen Modells beteiligt ist (Llewellyn, 2016). Zukünftige Forschungen sollten sich daher mit der Frage beschäftigen, welche Schlafparameter hierbei eine Rolle spielen.

Des Weiteren könnten auch weitere Forschungen darauf ausgelegt werden, wie sich das interne Modell nach einer weiteren Schlaf- bzw. Wachretention weiter verändert bzw. ob sich das interne Modell bei den Probanden der L-L-Gruppe noch nachweisen lässt. Hierbei könnte ein weiterer Abruf, dieses Mal in einem kurzen Intervallmodus, von Nutzen sein. Auch könnte die nach dem Test „nach Konsolidierung“ gegebene Information über das Vorliegen einer Sequenz aus zwölf Stimuli zu weiteren Untersuchungen führen. So könnte nach einem weiteren Konsolidierungsintervall die Entwicklung dieses expliziten Wissens weiter erforscht werden.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von Schlaf auf die Konsolidierung und zeitliche Abstraktion eines internen Aufgabenmodells untersucht.

An der Studie nahmen 64 gesunde Probanden (32 weibliche, 32 männliche Probanden, welche auf zwei Hauptgruppen (L-S-/L-L-Gruppe) und zwei Untergruppen (Schlaf/Wach) aufgeteilt wurden, teil.

Die Trainingsphase fand bei den Schlafprobanden um 20.30 Uhr, bei den Wachprobanden um 08.30 Uhr statt. Während der Trainingsphase wurden alle Probanden auf eine deterministisch visuell-motorische 12-er Sequenz trainiert. Die Stimuluspräsentation erfolgte dabei in einem langen Intervall („long“ bzw. „L“ = $2,000 \pm 500\text{ms}$). Im Verlauf der Trainingsphase kam es dabei zu einer Leistungssteigerung in Form von kürzeren Reaktionszeiten. Nach einem 12-stündigen Konsolidierungsintervall, welches je nach Gruppenzuordnung schlafabhängig oder schlafunabhängig stattfand, fand der Test „nach Konsolidierung“ statt. Hierbei wurde das Stimulusintervall in der L-S-Gruppe verkürzt („short“ bzw. „S“ = $200 \pm 50\text{ms}$), während es in der L-L-Gruppe unverändert gleich lang blieb. Bei den Schlafprobanden der L-S-Gruppe zeigte sich hierbei eine signifikante Veränderung hinsichtlich des Verhaltens auf die verschiedenen Stimulustypen. Bei der Präsentation von abweichenden Stimuli erhöhte sich die Fehlerquote und es verringerte sich somit die Vorhersagekraft. Ein sich anschließender Folgestimulus wiederum verringerte schließlich wieder die Fehlerquote und führte zu einem leichteren Wiedereinflinden in die ursprüngliche Sequenz. Dies spiegelt das Vorliegen eines internen Modells wider, welches durch Schlaf gefestigt wurde

Die gemessenen Kontrollparameter hinsichtlich der Vigilanz (Diekelmann et al., 2013) sowie der aktuellen Schläfrigkeit anhand der Stanford Sleepiness Scale (Hoddes et al., 1972) belegen die Vergleichbarkeit. Des Weiteren zeigte sich auch bei den Ergebnissen der Explizitheitstest kein Hinweis auf explizites Sequenzwissen der Probanden.

Insgesamt konnte mit dieser Studie gezeigt werden, dass durch Schlaf die

Bildung und Verfestigung eines internen Modells gefördert wird. Ein Zugriff dieses internen Modells jedoch nur dann möglich wird, wenn der Abruf in einem kurzen Intervall erfolgte.

6. Literaturverzeichnis

- Bach, M. (2007). The Freiburg Visual Acuity Test-Variability unchanged by post-hoc re-analysis. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. <https://doi.org/10.1007/s00417-006-0474-4>
- Ballesio, A., & Cellini, N. (2019). Updating internal cognitive models during sleep. *Journal of Neuroscience*. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2926-18.2019>
- Barrett, T. R., & Ekstrand, B. R. (1972). Effect of sleep on memory: III. Controlling for time-of-day effects. *Journal of Experimental Psychology*. <https://doi.org/10.1037/h0033625>
- Behrends, J., Bischofberger, J., & Deutzmann, R. (2012). Wachheit und Schlaf. In *Duale Reihe Physiologie* (2. Auflage, pp. 769–772). Thieme Verlag.
- Behrends, J., Bischofberger, J., & Deutzmann, R. (2016a). Integrative Leistungen des zentralen Nervensystems. In *Duale Reihe Physiologie* (3. Auflage, pp. 772–774). Thieme Verlag.
- Behrends, J., Bischofberger, J., & Deutzmann, R. (2016b). Lernen und Gedächtnis. In *Duale Reihe Physiologie* (3. Auflage, p. 771). Thieme Verlag.
- Born, J., & Gais, S. (2000). REM sleep deprivation: The wrong paradigm leading to wrong conclusions. *Behavioral and Brain Sciences*. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00264029>
- Broadbent, D. E. (1975). *The magic number 7 after fifteen years*. London: Wiley.
- Chaurasia, B. D., & Mathur, B. B. (1976). Eyedness. *Acta Anatomica*. <https://doi.org/10.1159/000144681>
- Cheng, C. Y., Yen, M. Y., Lin, H. Y., Hsia, W. W., & Hsu, W. M. (2004). Association of ocular dominance and anisometropic myopia. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. <https://doi.org/10.1167/iovs.03-0878>
- Cohen, D. A., Pascual-Leone, A., Press, D. Z., & Robertson, E. M. (2005). Off-line learning of motor skill memory: A double dissociation of goal and movement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0506072102>
- Corsi, P. M. (1973). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International*.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Curran, T. (1997). Higher-order associative learning in amnesia: Evidence from the serial reaction time task. *Journal of Cognitive Neuroscience*. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.4.522>
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*. <https://doi.org/10.1038/nrn2762>
- Diekelmann, S., Wilhelm, I., Wagner, U., & Born, J. (2013). Sleep to Implement an Intention. *Sleep*. <https://doi.org/10.5665/sleep.2322>
- Drosopoulos, S., Harrer, D., & Born, J. (2011). Sleep and awareness about

- presence of regularity speed the transition from implicit to explicit knowledge. *Biological Psychology*.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.11.005>
- Eimer, M., Goschke, T., Schlaghecken, F., & Stürmer, B. (1996). Explicit and implicit learning of event sequences: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.22.4.970>
- Fischer, S., Drosopoulos, S., Tsen, J., & Born, J. (2006). Implicit learning-explicit knowing: A role for sleep in memory system interaction. *Journal of Cognitive Neuroscience*. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.3.311>
- Frensch, P. A., & Miner, C. S. (1994). Effects of presentation rate and individual differences in short-term memory capacity on an indirect measure of serial learning. *Memory & Cognition*. <https://doi.org/10.3758/BF03202765>
- Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. B. (1998). Abstract and effector-specific representations of motor sequences identified with pet. *Journal of Neuroscience*.
- Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. B. (2002). Motor sequence learning with the nondominant left hand: A PET functional imaging study. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1181-y>
- Gruber, T. (2018). *Basiswissen Psychologie Gedächtnis* (2., überar). Berlin: Springer Verlag.
- Hallschmid, M., & Born, J. (2006). Der Schlaf der Vernunft gebiert Wissen. In M. H. Wiegand, F. von Spreiti, & H. Förstl (Eds.), *Schlaf&Traum Neurobiologie, Psychologie, Therapie* (pp. 76–77). Schattauer.
- Hawkins, J., George, D., & Niemasik, J. (2009). Sequence memory for prediction, inference and behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0322>
- Hermey, G., Mahlke, C., Schwake, M., & Sommer, T. (2010). Lernen und Gedächtnis. In *Der Experimentator: Neurowissenschaften* (p. 201). Spektrum Akademischer Verlag.
- Hoddes, E., Dement, W., & Zarcone, V. (1972). The development and use of the Stanford sleepiness scale (SSS). *Psychophysiology*.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1972.tb00747.x>
- Hoffmann, J., & Engelkamp, J. (2016). Wirkung statistischer, relationaler und raum-zeitlicher Strukturen beim Erlernen von Verhaltensfolgen. In *Lern- und Gedächtnispsychologie* (2. Auflage, pp. 57–58). Springer Verlag.
- Horne, J. a., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int J Chronobiol*. <https://doi.org/10.1177/0748730405285278>
- Janacek, K., & Nemeth, D. (2012). Predicting the future: From implicit learning to consolidation. *International Journal of Psychophysiology*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.11.012>
- Jenkins, J. G., & Dallenbach, K. M. (1924). Obliviscence during Sleep and Waking. *The American Journal of Psychology*.
<https://doi.org/10.2307/1414040>
- Kaposvari, P., Kumar, S., & Vogels, R. (2018). Statistical learning signals in macaque inferior temporal cortex. *Cerebral Cortex*.

- <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw374>
- Kaufmann, S., Zehnder, E., & Vanderheiden, E. (2009). Lernen lernen im DaZ-Unterricht. In *Fortbildung für Kursleitende Deutsch als Zweitsprache: Deutsch als Zweitsprache* (p. 13). Huber, Verlag GmbH & Co.KG.
- Keele, S. W., Mayr, U., Ivry, R., Hazeltine, E., & Heuer, H. (2003). The Cognitive and Neural Architecture of Sequence Representation. *Psychological Review*. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.110.2.316>
- Kessler, H. (2015). Die Kognition. In *Kurzlehrbuch medizinische Psychologie und Soziologie* (3. Auflage, p. 123). New York: Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Korman, M., Doyon, J., Doljansky, J., Carrier, J., Dagan, Y., & Karni, A. (2007). Daytime sleep condenses the time course of motor memory consolidation. *Nature Neuroscience*. <https://doi.org/10.1038/nn1959>
- Lerner, I., & Gluck, M. A. (2019). Sleep and the extraction of hidden regularities: A systematic review and the importance of temporal rules. *Sleep Medicine Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2019.05.004>
- Llewellyn, S. (2016). Dream to predict? REM dreaming as prospective coding. *Frontiers in Psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01961>
- Lutz, N. D., Wolf, I., Hübner, S., Born, J., & Rauss, K. (2018). Sleep strengthens predictive sequence coding. *Journal of Neuroscience*. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1352-18.2018>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90002-8)
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. [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. *Journal of Cognitive Neuroscience*. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.4.534>
- Rao, R. P. N., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature Neuroscience*. <https://doi.org/10.1038/4580>
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological Reviews*. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>
- Rechtschaffen, A., & Kales, A. (1968). A manual of standardized techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. *Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office*. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(69\)90021-2](https://doi.org/10.1016/0013-4694(69)90021-2)
- Reed, J., & Johnson, P. (1994). Assessing Implicit Learning With Indirect Tests: Determining What Is Learned About Sequence Structure. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.20.3.585>
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A., & Press, D. Z. (2004). Awareness Modifies the Skill-Learning Benefits of Sleep. *Current Biology*.

- [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(04\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(04)00039-9)
Rose, M., Haider, H., Salari, N., & Büchel, C. (2011). Functional dissociation of Hippocampal mechanism during implicit learning based on the domain of associations. *Journal of Neuroscience*.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3020-11.2011>
- Rosenthal, C. R., Andrews, S. K., Antoniadis, C. A., Kennard, C., & Soto, D. (2016). Learning and recognition of a non-conscious sequence of events in human primary visual cortex. *Current Biology*.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.01.040>
- Schendan, H. E., Searl, M. M., Melrose, R. J., & Stern, C. E. (2003). An fMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron*. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00123-5](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00123-5)
- Smith, A. P. (1985). Noise, biased probability and serial reaction. *British Journal of Psychology*, 76, 89–95.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989). Errors in pointing are due to approximations in sensorimotor transformations. *Journal of Neurophysiology*. <https://doi.org/10.1152/jn.1989.62.2.595>
- Squire, L. R. (1992). Declarative and nondeclarative memory: Multiple brain systems supporting learning and memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*. <https://doi.org/10.1162/jocn.1992.4.3.232>
- Squire, Larry R. (2004). Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. In *Neurobiology of Learning and Memory*.
<https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>
- Squire, Larry R., & Zola-Morgan, M. (1991). The brain and memory. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*.
<https://doi.org/10.1101/cshperspect.a021667>
- Stadler, M. A. (1992). Statistical Structure and Implicit Serial Learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.18.2.318>
- Stadler, M. A. (1993). Implicit serial learning: Questions inspired by Hebb (1961). *Memory & Cognition*. <https://doi.org/10.3758/BF03202749>
- Stadler, M. A. (1995). Role of Attention in Implicit Learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.3.674>
- Stadler, M. A., & Neely, C. B. (1997). Effects of sequence length and structure on implicit serial learning. *Psychological Research*.
<https://doi.org/10.1007/BF00419677>
- Tulving, Endel Donaldson, W. (1972). Episodic and semantic memory, Organization of memory. E. Tulving and W. Donaldson, Eds. New York: Academic Press.
- Verwey, W. B., & Clegg, B. A. (2005). Effector dependent sequence learning in the serial RT task. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-004-0181-x>
- Verwey, W. B., & Wright, D. L. (2004). Effector-independent and effector-dependent learning in the discrete sequence production task. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-003-0144-7>
- Wagner, U., & Born, J. (2008). Memory consolidation during sleep: Interactive

- effects of sleep stages and HPA regulation. *Stress*.
<https://doi.org/10.1080/10253890701408822>
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature02223>
- Whitehurst, L. N., Cellini, N., McDevitt, E. A., Duggan, K. A., & Mednick, S. C. (2016). Autonomic activity during sleep predicts memory consolidation in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1518202113>
- Willingham, D. B., Greenberg, A. R., & Thomas, R. C. (1997). Response-to-stimulus interval does not affect implicit motor sequence learning, but does affect performance. *Memory and Cognition*.
<https://doi.org/10.3758/BF03201128>
- Witt, K., Margraf, N., Bieber, C., Born, J., & Deuschl, G. (2010). Sleep consolidates the effector-independent representation of a motor skill. *Neuroscience*. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.07.062>

7. Erklärung zum Eigenanteil der Dissertationsschrift

Durchgeführt wurde diese Studie unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. Jan Born (erster Berichterstatter) im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie der Universitätsklinik Tübingen. Die Studie wurde von Herrn Prof. Dr. Jan Born, Herrn Karsten Rauss und Herrn Nicolas Lutz M.Sc. konzipiert. Die Programmierung der Computeraufgabe sowie die Einweisung in die Versuchsdurchführung erfolgte durch Herrn Nicolas Lutz M.Sc. Die Datenerhebung erfolgte durch die Autorin selbst. Die Datenverarbeitung erfolgte durch Herrn Nicolas Lutz M.Sc. Unter Anleitung von Herrn Nicolas Lutz erfolgte die statistische Auswertung von der Autorin selbst.

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

8. Veröffentlichung

Teile der vorliegenden Dissertation wurden bereits in der folgenden Publikation veröffentlicht:

Lutz ND, Wolf I, Hübner S, Born J, Rauss K. Sleep strengthens predictive sequence coding. *J Neurosci.* 2018;38: 8989–9000.
doi:10.1523/JNEUROSCI.1352-18.201

9. Anhang

9.1 Fragebogen Probandenrekrutierung

Allgemeine Angaben

- Name:
- Vorname:
- Kontakt (Tel., E-Mail):
- Alter (20 – 40 Jahre!):
- Geschlecht: m w
- Muttersprache:
- Händigkeit:
- Ich spiele / habe in der Vergangenheit ein Musikinstrument gespielt: nein ja , nämlich:
- Ich bin professioneller Maschinenschreiber: nein ja

Schlafgewohnheiten

- Zu-Bett-geh-Zeit:
- Einschlafzeit (min):
- Aufstehzeit:
- Schichtarbeit oder Nachtwachen in den letzten 6 Wochen? nein ja
- Nachtschicht in der Vergangenheit? nein ja

Medizinisches

- Brille: nein ja Kontaktlinsen: nein ja
- Sehstärke (im Falle einer Brille/Kontaktlinsen):
- Andere Sehschwächen (z. B. Rot-Grün-Schwäche):
- Erkrankungen (neurologisch/psychiatrisch):
- Andere Erkrankungen:
- Medikamente:
- Nikotinkonsum: nein ja , Häufigkeit:
- Koffeinkonsum: nein ja , Häufigkeit:
- Alkohol/Drogenkonsum: nein ja , Häufigkeit:

Teilnahme an anderen Studien: nein ja

Thema/Inhalt der Studie?

Wann? /Bei wem?

Höchster Schulabschluss:

Aktuelle Beschäftigung (Arbeit, Ausbildung, Studium...):

Aktuell starke Belastungen (Lernphase, Wettkampf...)?

nein ja Welche?

Weitere Anmerkungen:

9.2 Fragebogen 1. und 2. Versuchsteil

Fragebogen zu Probandendaten

- Probanden-Code:
- Bedingung: Schlaf Wach
- Alter:
- Geschlecht: w m
- Brillenträger: ja nein
- Raucher: ja nein
- Beruf/Studienfach:
- Händigkeit:
- Musikinstrument?
- Maschinenschreiber?

	Sitzung 1	Sitzung 2
▪ Gesundheit heute?		
▪ Medikamente/Drogen heute?		
▪ Wann zum letzten Mal Koffeinhaltiges getrunken?		
▪ Heute besonderen Stress gehabt?		
▪ Nacharbeit in letzten 6 Wochen?		

- Zu welcher Uhrzeit normalerweise abends zum Schlafen ins Bett?
- Wie viel Stunden Schlaf normalerweise pro Nacht?
- Üblicherweise auch Schlaf tagsüber? Wenn ja, wann, wie viel?

- Zu welcher Uhrzeit letzte Nacht zum Schlafen ins Bett?
- Wann heute aufgestanden?
- Wie viel Stunden Schlaf letzte Nacht?
- Wie gut geschlafen letzte Nacht? $\boxed{-5}$ = sehr schlecht, $\boxed{+5}$ = sehr gut.
- Heute Schlaf tagsüber? Wenn ja, wann, wie viel?

- Vorherige Schlafexperimente mitgemacht? Wenn ja, wann, welche, bei wem?
- Besonderheiten:

9.4 Debriefing 1

Debriefing #1

Probanden-Code:

Uhrzeit:

Frage 1

Ist Dir während des Experiments irgendetwas aufgefallen?

Frage 2

Sind Dir während des Experiments irgendwelche Regelmäßigkeiten aufgefallen?

Frage 3

Ist Dir irgendeine Regelmäßigkeit in der Abfolge der Positionen der Muster aufgefallen?

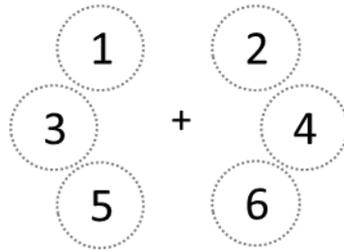
*Wenn etwas aufgefallen ist: Verbal beschreiben lassen (nach Vorlage, siehe Rückseite) und protokollieren! Bestätigen bzw. berichtigen / auf Sequenz hinweisen mit folgendem Wortlaut**

*Wenn nichts aufgefallen ist: Auf Sequenz hinweisen mit folgendem Wortlaut**

* Tatsächlich gab es im Experiment eine Regelmäßigkeit in Form einer Sequenz/Abfolge von 12 Mustern, die nur implizit/unbewusst wahrgenommen und gelernt werden sollte. In den folgenden Versuchsteilen wird Dein Wissen über diese Regelmäßigkeit weiter getestet.

Probanden-Code:

Uhrzeit:



9.5 Debriefing 2

Debriefing #2

Probanden-Code:

Uhrzeit:

Frage 1

Fandst Du es schwierig, nicht direkt auf die Muster zu schauen?

Bewerte auf einer Skala von 1 bis 10 (1 = überhaupt nicht schwierig, 10 = extrem schwierig):

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10

Frage 2

Wie anstrengend fandst Du das Experiment?

Bewerte auf einer Skala von 1 bis 10 (1 = überhaupt nicht anstrengend, 10 = extrem anstrengend):

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10

Frage 3

Hatte das Reaktionszeit-Feedback für Dich einen motivierenden Effekt?

Bewerte auf einer Skala von -5 bis +5 (-5 = sehr demotivierend, +5 = sehr motivierend):

-5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5

*Um zu sehen, ob die vorherigen Versuchsteile einen Einfluss auf Deine Wahrnehmung der Sequenz haben, wird Dein Wissen über die Sequenz/Abfolge im Folgenden erneut getestet (Free Recall Test).

10. Danksagung

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Jan Born für die Bereitstellung des Themas sowie bei Dr. Karsten Rauss und Nicolas Lutz für die ausgezeichnete Betreuung während der Durchführung der Experimente sowie bei der Verfassung der Dissertationsschrift.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Doktoranden des Instituts für medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie für die stets kollegiale und gute Zusammenarbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Probanden bedanken, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Ein besonderer Dank gilt zudem meiner Familie, die mich während des Studiums und während der Promotionszeit jederzeit unterstützt hat. Ein großer Dank gilt dabei meinen Eltern und meinem Bruder Dominik.