

Aus dem

Institut für Medizinische Psychologie der Universität Tübingen

**Inaugural-Dissertation**

**Der Einfluss von Schlaf auf die implizite Vorhersage visueller  
Stimulus-Sequenzen**

**zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

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

**vorgelegt von**

**Wolf, Ines Milena**

**2021**

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. J. Born  
2. Berichterstatter: Professor Dr. M. Siegel

Tag der Disputation: 12.06.2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Gedächtnissystem .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Schlaf und Gedächtniskonsolidierung.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Predictive Coding.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Sequenz-Lernen .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Fragestellungen und Hypothesen .....</b>	<b>9</b>
1.5.1 Welchen Einfluss hat Schlaf auf Predictive Coding beim impliziten Sequenz-Lernen?.....	9
1.5.2 Ermöglicht Schlaf den Transfer von implizitem Sequenz-Wissen für Predictive Coding in unterschiedlichen zeitlichen Kontexten? .....	10
1.5.3 Wie wirkt sich explizites Wissen über das Vorhandensein der Sequenz auf Predictive Coding aus? .....	11
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Versuchspersonen.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Serielle Antwortzeitaufgabe .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Stimulus-Spezifikationen und Sequenz-Regelsystem .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Versuchsdesign und -durchführung .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5 Versuchsablauf .....</b>	<b>20</b>
<b>2.6 Statistische Auswertung .....</b>	<b>24</b>
<b>3 Ergebnis.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Serielle Antwortzeitaufgabe .....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Enkodierung: Training.....	29
3.1.2 Abruf: Prä-Retentionstest, Post-Retentionstest und Abschlusstest	30
<b>3.2 Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz .....</b>	<b>48</b>
3.2.1 Freie Reproduktion .....	48

3.2.2	Triplet-Erkennungsaufgabe und Triplet-Vervollständigungsaufgabe .....	50
<b>3.3</b>	<b>Kontrollvariablen.....</b>	<b>52</b>
3.3.1	Schlafparameter: SF-A/R und Actiwatch® .....	52
3.3.2	Eyetracker.....	53
3.3.3	Schläfrigkeit und Vigilanz.....	54
3.3.4	Weitere Kontrollvariablen.....	56
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Schlaf fördert Predictive Coding durch einen positiven Einfluss auf die Konsolidierung von intrinsischen Gedächtnismodellen beim impliziten Sequenz-Lernen .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Ein langes Antwort-Stimulus-Intervall maskiert das Sequenz-Lernen auch nach Schlaf .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3</b>	<b>Explizites Wissen stört den Abruf von schlafabhängig konsolidierten Vorhersagemodellen beim Predictive Coding .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>Schlaf fördert den expliziten Zugriff auf implizites Wissen.....</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>Ausschluss zirkadianer Effekte .....</b>	<b>68</b>
<b>4.6</b>	<b>Zukünftige Fragestellungen und mögliche Folgestudien.....</b>	<b>69</b>
<b>4.7</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Erklärungen zum Eigenanteil der Dissertationsschrift .....</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>Veröffentlichung.....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>82</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>84</b>

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1:	Stark vereinfachte schematische Darstellung von Predictive Coding.....	6
Abbildung 2:	Anordnung der visuellen Stimuli in der Bildschirmperipherie und Nummerierung der sechs Positionen. ....	15
Abbildung 3:	Die im Training implizit gelernte Standard-Sequenz und Kombination A und B der Deviant-Sequenzen der Abrufttests. ....	17
Abbildung 4:	Studiendesign.....	19
Abbildung 5:	Schematische Darstellung des Experimentalablaufs in den vier Bedingungen. ....	24
Abbildung 6:	Abnahme der Antwortzeiten im Verlauf des Trainings in der SS- und SL-Gruppe.....	30
Abbildung 7:	Schlaf erhöht die Fehlerraten für Deviants und senkt die Fehlerraten für Folge-Standards. ....	33
Abbildung 8:	Schlaf erhöht die Antwortzeiten für Deviants und senkt sie für Folge-Standards.....	34
Abbildung 9:	Die Vorhersagestärke-Indices sind im Post-Retentionstest nach Schlaf signifikant erhöht.....	36
Abbildung 10:	Die Rate vorhersagebedingter Fehler liegt im Post-Retentionstest nur nach Schlaf signifikant oberhalb des Zufallslevels. ....	38
Abbildung 11:	Unter langen RSIs keine Unterschiede in der Fehlerrate für die drei Stimulustypen, aber Schlafeffekte im ursprünglichen zeitlichen Kontext im Abschlusstest. ....	40
Abbildung 12:	Antwortzeiten unter langen RSIs kaum unterschiedlich für die drei Stimulustypen. ....	42
Abbildung 13:	Keine Subgruppen-Unterschiede in allen drei Abrufttests, aber Vorhersagestärke-Index aus Fehlerrate im Abschlusstest nur unter Schlafbedingungen größer 0. ....	44
Abbildung 14:	Die Rate vorhersagebedingter Fehler sinkt unter langen RSIs auf Zufallslevel. ....	46
Abbildung 15:	Verringerte Vorhersagestärke unter langen RSIs. ....	48

Abbildung 16:	Höhere Konfidenz für korrekte Antworten bei Schlafprobanden der SS-Gruppe in der Triplet-Vervollständigungs- und Triplet-Erkennungsaufgabe. ....	51
Abbildung 17:	Predictive Coding während der SRTT nach Schlaf und seine Störeinflüsse. ....	71
Tabelle 1:	Ergebnisse der freien Reproduktion.....	50
Tabelle 2:	Schlafparameter.....	53
Tabelle 3:	Eyetracking-Aufzeichnung während der SRTT. ....	54
Tabelle 4:	SSS und Vigilanz. ....	56
Tabelle 5:	Kontrollvariablen. ....	58
Tabelle 6:	Tabellarische Übersicht des Versuchsablaufs. ....	82

## Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of variance (Varianzanalyse)
BOLD	Blood oxygenation-level dependent (abhängig vom Blut-Sauerstoffgehalt)
fMRI	Functional magnetic resonance imaging (funktionelle Magnetresonanztomographie)
FrACT	Freiburg Visual Acuity and Contrast Test
RSI	Response-to-stimulus interval (Antwort-Stimulus-Intervall)
SF-A/R	Schlaffragebogen A / revidierte Version
SL	Short/Long
SRTT	Serial response time task (serielle Antwortzeitaufgabe)
SS	Short/Short
SSS	Stanford-Schläfrigkeitsskala

# 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem impliziten Lernen visueller Sequenzen, mit „Predictive Coding“ im Rahmen des Sehvorganges und mit der Rolle des Schlafs in der Gedächtniskonsolidierung bei diesen Prozessen. Nachfolgend werden die zugrundeliegenden Sachverhalte erläutert und innerhalb des Konstrukts der durchgeführten Studie in Zusammenhang gebracht.

## 1.1 Gedächtnissystem

Der individuelle Fortschritt des Menschen und sein langfristiges Überleben stützen sich auf ein funktionierendes Gedächtnissystem. Es ist essentiell für fast alle Alltagshandlungen, denn es ermöglicht angepasste Verhaltensweisen, verschiedenste Lernprozesse und die gezielte Aneignung von Wissen. So vielfältig wie die Funktionen des Gedächtnissystems ist auch sein Aufbau. Nach aktueller Lehrmeinung werden insbesondere die nachfolgenden Gedächtnisspeicher unterschieden.

Das sensorische Gedächtnis speichert perzeptuelle, also beispielsweise visuelle oder auditorische Eindrücke maximal für wenige Sekunden. Nach Filterung dieser sensorischen Signale gelangen sie ins Kurzzeitgedächtnis. Diese Informationsaufnahme wird als Enkodierung bezeichnet. Durch Wiederholungen gehen die Inhalte vom Kurzzeitgedächtnis ins Langzeitgedächtnis über, welches sie vor einem frühzeitigen Vergessen schützt. Diese Überführung der Informationen ist die Konsolidierung. Der Zugriff auf die gespeicherten Inhalte wird als Abruf bezeichnet.

Weiterhin ist die Unterscheidung zweier Gedächtnisformen bedeutsam: das explizite und das implizite Gedächtnis. Das explizite Gedächtnis ist deklarativ und bewusst. Es umfasst das episodische Gedächtnis (z.B. biographische Informationen/persönliche Erlebnisse) und das semantische Gedächtnis (z.B. Faktenwissen). Das implizite Gedächtnis ist nicht-deklarativ. Enkodierung, Konsolidierung und Abruf der Inhalte geschehen außerhalb des Bewusstseins.

Es schließt Gedächtniskomponenten wie gewohnte Handlungen, Bewegungsabläufe (prozedurales Gedächtnis) und kognitive Fähigkeiten ein.

Die dem Gedächtnissystem zugrundeliegenden anatomischen Hirnzentren und neurophysiologischen Prozesse wurden vielfach untersucht. Eine detaillierte Darstellung der entsprechenden Erkenntnisse führt im Rahmen der vorliegenden Verhaltensstudie zu weit. Dennoch soll der Hippocampus als zentrales Organ für das Gedächtnis und Lernprozesse nachfolgend vorgestellt werden.

Der Hippocampus gehört zur Großhirnrinde, speziell dem Allokortex und befindet sich medial im kaudalen Temporallappen. Er bildet die zentrale Schaltstelle des limbischen Systems, welches sich aus mehreren Strukturen zusammensetzt. Neben einigen weiteren, erfüllt es insbesondere durch den Hippocampus und sein Zusammenspiel mit anderen Hirnregionen die große Aufgabe der Gedächtnisbildung.

## **1.2 Schlaf und Gedächtniskonsolidierung**

Warum schläft der Mensch? Dieser Frage wurde bereits in zahlreichen Forschungsarbeiten nachgegangen. Dabei wurde dem Schlaf eine Vielzahl an Funktionen zugewiesen (Siegel 2005). Wie verschiedene Übersichtsarbeiten darlegen, ist eine besonders wichtige Aufgabe seine Rolle bei der Ausbildung von Erinnerungen, der Gedächtniskonsolidierung (Maquet 2001; Peigneux et al. 2001; Walker & Stickgold 2004; Stickgold 2005; Born, Rasch & Gais 2006; Walker & Stickgold 2006; Stickgold 2013). Nicht von ungefähr hat sich die Redewendung „eine Nacht darüber schlafen“ im deutschen Sprachgebrauch angesiedelt. Hier ist jedoch häufig nicht das „Abspeichern und Festigen“ von Gelerntem gemeint, sondern die Hoffnung auf mehr Klarheit über einen Sachverhalt am nächsten Morgen. Damit einhergehend, wurde zwischenzeitlich gezeigt, dass die Gedächtniskonsolidierung im Schlaf über eine simple Langzeitspeicherung durch Überführung von Erinnerungen aus dem Kurz- ins Langzeitgedächtnis hinaus geht. Der Schlaf beeinflusst das Gedächtnis nicht nur passiv, in dem er die Resistenz von Erinnerungen gegenüber Interferenzen erhöht und sie vor dem Vergessen schützt. Vielmehr ist er an einer aktiven

Förderung der Gedächtniskonsolidierung beteiligt. Im Schlaf kommt es zur Reaktivierung frisch enkodierter Gedächtnisinhalte, wodurch diese in bestehende Langzeit-Erinnerungen integriert werden (Rasch & Born 2013). Dabei führen Umstrukturierungen zu einer qualitativen Modifikation und Transformation der Inhalte, wodurch neue Erkenntnisse gewonnen werden können (Wagner et al. 2004).

Doch das breite Spektrum des Gedächtnissystems und die Komplexität der Konsolidierungsvorgänge erschweren eine Entschlüsselung von Zusammenhängen. Insbesondere, da auch der menschliche Schlaf weitaus vielseitiger ist, als es zunächst den Anschein haben mag. Es werden Schlafzyklen voneinander abgegrenzt und Schlafphasen und -stadien unterschieden, denen spezifische elektro-, bzw. neurophysiologische Muster zugeordnet sind. Außerdem ist eine Veränderung der Schlafaktivität und des Schlafprofils im Verlauf des Lebens vom Neugeborenen zum späten Erwachsenenalter bekannt (Ohayon et al. 2004).

Dennoch konnte ein förderlicher Einfluss von Schlaf auf das deklarative, also explizite Gedächtnis, zum Beispiel beim Lernen von Vokabeln, gezeigt werden (Gais et al. 2006; Payne et al. 2012). Weitere Untersuchungen wiesen eine schlafabhängige Steigerung von Fertigkeiten für beide Gedächtnisformen (explizit/implizit) in Lern- und Erinnerungsaufgaben unterschiedlicher Modalitäten nach (Diekelmann et al. 2009). Zum Beispiel verbesserten sich prozedurale Leistungen, wenn nach dem Training geschlafen wurde (Walker 2005). Darunter fallen motorische und perzeptuelle Fertigkeiten (Karni et al. 1994; Gais et al. 2000; Stickgold et al. 2000). Solche prozeduralen Lernvorgänge können sowohl implizit als auch explizit ablaufen, je nachdem ob sich die Person über das Lernen des entsprechenden Prozesses bewusst ist.

### 1.3 Predictive Coding

Der menschliche Organismus strebt als offenes biologisches System stets danach, die eigene Integrität durch Selbstregulierungsprozesse zu schützen (Friston et al. 2006; Friston 2010). Hierfür ist ein adaptives Verhalten, also die Anpassung an äußere Umstände und sich stetig wandelnde Bedingungen elementar. Das ist mit Blick auf die natürliche Selektion während der Evolution nachvollziehbar. Doch wie ist diese enorme Anpassungsbereitschaft möglich? Adaptives Verhalten bedarf einer optimierten und effizienten Wahrnehmung der Umwelt. Das Sehen ist für den Menschen dabei wohl einer der wichtigsten Sinne, da der größte Teil seiner Informationsaufnahme über das visuelle System geschieht. Es umfasst alle Funktionseinheiten, die aus zahlreichen visuellen Signalen schlussendlich ein Bild im Bewusstsein entstehen lassen, das die Wahrnehmung der Umgebung ermöglicht. Dieser Verarbeitungs- und Wahrnehmungsprozess setzt ein komplexes Zusammenspiel verschiedener neuronaler Institutionen voraus. An dieser Stelle setzt die „Predictive Coding“-Theorie an, welche Wissenschaftler nunmehr seit Jahrzehnten beschäftigt und als zentrale Annahme davon ausgeht, dass die perzeptuelle Wahrnehmung auf neuronaler Ebene von bisherigen Erfahrungen und Gedächtnisinhalten beeinflusst wird (Mumford 1992; Bar 2009). Ursprünglich stammt das Prinzip aus der Informatik, wo es zur effektiven Informationsübertragung entwickelt wurde. Schließlich wurde das Predictive Coding im Rahmen der visuellen Perzeption beschrieben und untersucht (Rao & Ballard 1999). In diesem Kontext wird es nachfolgend vorgestellt.

Der Sehprozess beginnt mit den lichtempfindlichen Photorezeptoren in der Netzhaut. Als sekundäre Sinneszellen setzen sie nach Stimulation durch Lichtreize die Aktivierung weiterer Nervenzellen in Gang. Erste Verschaltungen finden dabei bereits in der Retina durch unterschiedliche Zelltypen statt. Die Ganglienzellen bilden als dritte Neurone die Sehbahn die sich von der Retina zum Corpus geniculatum laterale im Thalamus erstreckt. Hier wird auf die vierten Neurone projiziert, welche als Sehstrahlung in den primären visuellen Kortex (primäre Sehrinde) im Okzipitallappen des Großhirns ziehen. Der primäre

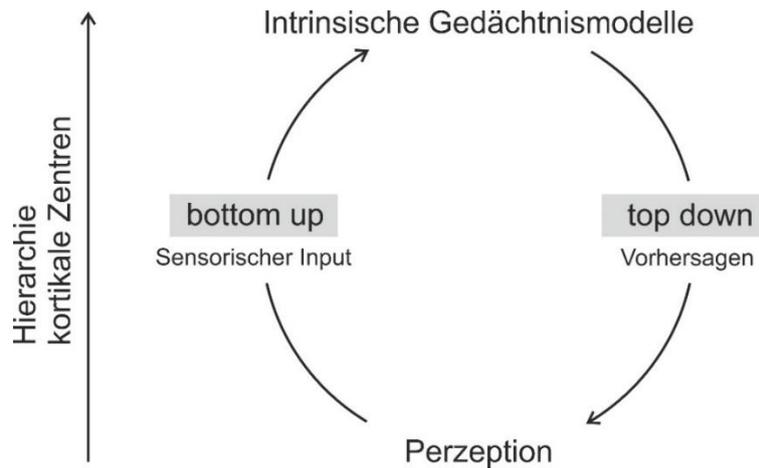
visuelle Kortex wird auch als V1 bezeichnet und weist eine retinotopie Gliederung auf. Das bedeutet, dass sich dort die topographischen Beziehungen der Bildpunkte identisch zur Retina darstellen. Die primäre Sehrinde kommuniziert mit den höheren visuellen Kortex-Arealen V2-V5/MT, die sich auf spezifische Teilaspekte des Sehens spezialisieren (z.B. Objekt-, Bewegungs-, Farberkennung).

Predictive Coding im Sehprozess bedeutet nun, dass anhand zuvor gelernter perzeptueller Regelmäßigkeiten Erwartungen über bevorstehenden visuellen Input ausgebildet werden. Dieser Vorgang läuft dabei prinzipiell implizit, also außerhalb des Bewusstseins ab.

Es wird grundsätzlich von einer hierarchischen Informationskette im Gehirn mit reziproker Kommunikation ausgegangen (Mumford 1992; Rao & Ballard 1999; Friston 2009). Diesbezüglich sind zwei Begriffe geläufig, über deren Definition und Bedeutung ein Artikel von Rauss und Pourtois Klarheit verschafft (Rauss & Pourtois 2013).

„Bottom-up“ beschreibt die Enkodierung der perzeptuellen Reize und den nachfolgenden Informationsfluss von niedrigeren zu höheren kortikalen Zentren. Die in den höheren kortikalen Zentren eintreffenden Inhalte werden in intrinsische Gedächtnismodelle als Abbild der Umwelt eingebettet. Während der Perzeption von sensorischem Input werden diese intrinsischen Modelle genutzt um abzuschätzen, welche visuellen Signale nachfolgend am wahrscheinlichsten auftreten. Daraus hervorgehende Vorhersagen werden in „top-down“-Prozessen von den höheren an die tieferen kortikalen und sensorischen Zentren weitergegeben (Honey et al. 2018). In Abbildung 1 sind diese Vorgänge auf vereinfachte Weise schematisch dargestellt.

Hohe Kortex-Areale (z.B. V4 in der Sehrinde oder präfrontaler Kortex) stellen also Erwartungen über bevorstehende sensorische Signale auf und leiten sie in top-down-Vorhersagen an tiefere Bereiche weiter. Wie eine Übersichtsarbeit schlussfolgerte, werden dabei bereits sehr frühe Stadien im Sehprozess, wie die Signalverarbeitung in V1 beeinflusst (Rauss et al. 2011).



**Abbildung 1: Stark vereinfachte schematische Darstellung von Predictive Coding.** Nach der Perzeption gelangt sensorischer Input in einem hierarchischen Informationsfluss in höhere kortikale Zentren (bottom up). Diese speichern intrinsische Gedächtnismodelle auf Grundlage bisheriger perzeptueller Ereignisse und senden Vorhersagen über bevorstehende sensorische Signale an tiefere kortikale Zentren (top down).

Mittels Predictive Coding wird eine verbesserte visuelle Wahrnehmung der Umwelt erreicht. Die Perzeption von Input, der mit bisherigen Erfahrungen, bzw. gelernten Mustern übereinstimmt und kontext-spezifisch erfolgreich vorhergesagt werden konnte, läuft schneller ab und bedarf einer geringeren neuronalen Aktivität. Das wurde im Rahmen von fMRI-Studien (englisch: functional magnetic resonance imaging, funktionelle Magnetresonanztomographie) nachgewiesen, in der die BOLD-Antworten (englisch: blood oxygenation-level dependent), also die Aktivität in V1 für vorhergesagbare visuelle Signale geringer war als für nicht vorhergesagbare Signale (Alink et al. 2010; Kok et al. 2012). Dabei gingen die vorausgesagten visuellen Stimuli außerdem mit einer höheren Erkennungsrate einher. Die Detektion von erwartbarem visuellen Input ist also gesteigert, während gleichzeitig der perzeptuelle Aufwand, also die Antwort-Aktivität reduziert ist. Es verbleibt mehr neuronale Kapazität für eine verstärkte Reaktion auf fremde und neuartige visuelle Signale, die hierdurch mehr Aufmerksamkeit erhalten (Summerfield et al. 2008; Bar 2009; Friston 2010; Summerfield & de Lange 2014; Vinken et al. 2017; Kaposvari et al. 2018). Bei solchen unerwarteten Signalen liegt eine Diskrepanz zwischen dem vorhergesagten und tatsächlich perzipierten Input vor. Das führt dazu, dass ein Fehlersignal, der sogenannte „Prediction Error“ (Vorhersagefehler), in bottom-up-Prozessen an höhere Kortex-Areale ausgesendet wird (Rao & Ballard 1999). Dort

werden die intrinsischen Vorhersagemodelle durch kontinuierlichen bottom-up-Eingang stetig modifiziert und ergänzt. Sie unterliegen also einem konstanten Anpassungsprozess.

Auf diese Weise sammelt der Mensch im Laufe seines Lebens aus visuellen Inhalten und Erfahrungsschätzen einen individuellen Vorrat an Gedächtnismodellen, welche stets das aktuelle Umfeld widerspiegeln (Friston et al. 2006). Überraschungen durch unerwarteten sensorischen Input werden auf ein Mindestmaß reduziert und die visuelle Perzeption durch den sinnvollen Einsatz von neuronalen Ressourcen maximal effizient gestaltet.

Mit Predictive Coding optimiert das menschliche Gehirn also die Detektion der visuellen Welt durch perzeptuelle Erfahrung. Dies könnte in Bezug auf das alltägliche Leben und Überleben sehr bedeutsam sein. Schließlich ermöglichen hohe Ressourcen für unerwartete Informationen und eine erleichterte Wahrnehmung auch von kleinsten Veränderungen eine beschleunigte Einleitung adaptiver Verhaltensweisen. Dazu gehören zum Beispiel Fluchtreaktionen in Gefahrensituationen, die dringend notwendig sind, um die eigene Unversehrtheit aufrecht zu erhalten.

## **1.4 Sequenz-Lernen**

Predictive Coding besagt, dass das Gehirn die Perzeption sensorischer Ereignisse durch deren korrekte Vorhersage optimiert. Das könnte zu der hohen Anpassungsfähigkeit des Menschen beitragen. Die Vorhersagen über bevorstehenden visuellen Input werden in höheren Kortex-Arealen basierend auf intrinsischen Gedächtnismodellen generiert und an tiefere sensorische Areale weitergeleitet (siehe Abschnitt 1.3 Predictive Coding). Um korrekte Vorhersagen über zukünftige Signale treffen zu können, müssen in diesen Modellen zeitliche und räumliche Assoziationen zwischen sensorischen Reizen gespeichert sein (Janacsek & Nemeth 2012). Häufig handelt es sich also um Sequenz-Modelle, die in Folge von meist implizit gelernten zeitbasierten Regelmäßigkeiten ausgebildet werden. Das Sequenz-Lernen scheint also ein wichtiger Anwendungsbereich für Predictive-Coding-Prozesse zu sein und Sequenz-Lern-

Experimente wiederum eine geeignete Methode um Predictive Coding zu untersuchen.

Sequenz-Lernen kann grundsätzlich explizit oder implizit ablaufen (Destrebecqz & Cleeremans 2001) und unterschiedliche Kompetenzen erfordern. Je nach Konzeption der Aufgabe geht es motorisch oder perzeptuell von statten (Willingham 1999; Dennis et al. 2006) und verlangt zum Beispiel vorzugsweise die Ausbildung von räumlichen oder zeitlichen, von kontextuellen oder von statistischen Assoziationen (Fiser & Aslin 2002; Makovski 2018). Studien zum Sequenz-Lernen haben deswegen eine große Bandbreite und sind nicht immer vergleichbar.

Das Lernen von Sequenzen ist obligatorischer Bestandteil des alltäglichen Lebens eines jeden Menschen. Wird zum Beispiel ein neues Musikstück auf einem Instrument gelernt, bilden die Noten eine visuelle, die Töne eine auditorische und die Finger-, bzw. Handbewegungen eine motorische Sequenz. Ein Konstrukteur, der mit einem ihm unbekanntem Computerprogramm arbeitet, lernt die zeitliche und räumliche Abfolge der notwendigen Mausklicks und Tastendrucke ebenfalls in visueller und motorischer Form. Und auch das Schulkind auf dem Nachhauseweg oder der Sportler in einem Hindernisparcours verinnerlichen die Sequenz der Ereignisse auf ihrer Route. Häufig werden neue Fähigkeiten und Fertigkeiten gelernt, ohne dass die zugrundeliegenden Assoziationen auf eine aktive und bewusste Art verinnerlicht werden. In diesen Fällen findet implizites Sequenz-Lernen statt.

Experimente zum Sequenz-Lernen haben also eine hohe Alltagsrelevanz und Studien über das implizite Lernen visueller Sequenzen könnten speziell geeignet sein um Predictive Coding im Sehprozess zu untersuchen.

## 1.5 Fragestellungen und Hypothesen

### 1.5.1 Welchen Einfluss hat Schlaf auf Predictive Coding beim impliziten Sequenz-Lernen?

Predictive Coding setzt das implizite Lernen von visuellen Regelmäßigkeiten und deren Konsolidierung in intrinsischen Gedächtnismodellen voraus. Wie in Abschnitt 1.2 erörtert wurde, fördert Schlaf die Gedächtniskonsolidierung. Auch das Sequenz-Lernen profitiert von Schlaf, was in diversen Studien gezeigt wurde (Fischer et al. 2002; Walker et al. 2002). Dabei fanden sich laut Lerner und Gluck in etwa der Hälfte aller SRTT-Studien Schlafeffekte (Lerner & Gluck 2019). SRTT steht für „serial response time task“ und bedeutet übersetzt serielle Antwortzeitaufgabe. Dabei handelt es sich um eine von Nissen und Bullemer 1987 erstmals entwickelte und heute gut etablierte Lernaufgabe, die sich unter anderem zur Untersuchung von impliziten Gedächtnisvorgängen eignet (Nissen & Bullemer 1987).

Ziel dieser Arbeit war es daher, die Rolle des Schlafs beim Predictive Coding im Rahmen des impliziten Lernens einer visuellen Sequenz zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde in der Konzeption der, in Anlehnung an Nissen und Bullemer durchgeführten, seriellen Antwortzeitaufgabe auf den Vorhersageaspekt besonders viel Wert gelegt. Es wurde eine deterministische Sequenz erstellt, die eine präzise Prädiktion der Stimuli ermöglichte. Gleichzeitig wurden in den Abrufttests durch Integration abweichender, nicht-vorhersagbarer Deviant-Stimuli, gezielt Vorhersagefehler provoziert. Diese Deviants sollten in einer erhöhten Fehlerrate und verlängerten Antwortzeit der Versuchspersonen resultieren, im Vergleich zu Standard-Stimuli, deren korrekte Vorhersage sich in einer geringen Fehlerrate und einer beschleunigten Verarbeitung des visuellen Inputs mit verkürzten Antwortzeiten widerspiegeln würde (Peigneux et al. 2000). Predictive Coding gelingt beim impliziten Sequenz-Lernen durch Konsolidierung eines intrinsischen Vorhersagemodells der korrekten Stimulusabfolge. Darum ist insbesondere die Betrachtung der unmittelbar auf Deviants folgenden Standard-Stimuli bedeutsam (Folge-Standards). Die Vorhersagestärke der Versuchspersonen kann als umso größer angenommen werden, je erfolgreicher

sie die korrekte Sequenz, trotz eines vorangegangenen Deviants beibehalten. Das bedeutet, dass die Abnahme der Fehlerraten und Antwortzeiten für Folge-Standards, also deren Angleichung an Standard-Stimuli und Abgrenzung von Deviants, proportional zur Vorhersagestärke ist. Ein Vergleich der Reaktionen auf diese drei unterschiedlichen Stimulustypen stellt daher ein geeignetes Maß für das implizite Sequenz-Lernen und die Vorhersagestärke bezüglich Predictive Codings dar.

Es wurde davon ausgegangen, dass ein günstiger Einfluss von Schlaf auf die Ausbildung des intrinsischen Vorhersagemodells beim impliziten Sequenz-Lernen nachweisbar wird. Entsprechend dieser Hypothese sollte es in der Schlafgruppe durch Predictive Coding zu einer fundierteren Vorhersage kommen, die sich in der oben beschriebenen Reaktion auf die drei Stimulustypen zeigt (geringe Fehlerraten und kurze Antwortzeiten für Standards und Folge-Standards vs. hohe Fehlerraten und lange Antwortzeiten für Deviants).

**Hypothese 1:** Schlaf fördert Predictive Coding in einer impliziten Sequenz-Lernaufgabe durch die gesteigerte Konsolidierung eines intrinsischen Gedächtnismodells der Stimulusabfolge.

### **1.5.2 Ermöglicht Schlaf den Transfer von implizitem Sequenz-Wissen für Predictive Coding in unterschiedlichen zeitlichen Kontexten?**

Eine weitere Fragestellung betrifft die Generalisierbarkeit von implizitem Sequenz-Wissen, also die Transferleistung beispielsweise in einem wechselnden temporalen Umfeld. So kann durch Manipulation des Intervalls zwischen Tastendruck und nächstem Stimulus (RSI, englisch: response-to-stimulus intervall) der zeitliche Kontext einer SRTT variiert werden.

Es wurde z.B. gezeigt, dass Schlaf das Potential hat, an der Generalisierbarkeit einer motorischen Fertigkeit mitzuwirken (Witt et al. 2010). In der vorliegenden Arbeit sollte deswegen untersucht werden, ob Schlaf den erfolgreichen Transfer des Sequenz-Wissens von kurzen zu langen RSIs ermöglicht und Schlafeffekte auch in diesem veränderten zeitlichen Rahmen gefunden werden.

Aus diesem Grund führte die Hälfte der Versuchspersonen den Abrufttest nach der Schlaf-/Wach-Manipulation mit langen RSIs von  $2000 \pm 500$  ms durch. Im ursprünglichen Kontext (während des Trainings und ersten Abrufttests vor dem Schlaf-/Wach-Retentionsintervall) betrug das RSI  $200 \pm 50$  ms. Ein dritter und letzter Abrufttest am Versuchsende wurde ebenfalls wieder im originalen Kontext mit kurzen RSIs durchgeführt.

Es wurde vermutet, dass Schlaf durch eine begünstigte Konsolidierung von Vorhersagemodellen nicht nur das Predictive Coding im Rahmen von implizitem Sequenz-Lernen fördert (Hypothese 1), sondern auch dessen Anwendung in einem veränderten zeitlichen Umfeld. In diesem Falle sollte das stattgehabte Sequenz-Lernen trotz langer RSIs im zweiten Abrufttest der SL-Gruppe nachweisbar sein und dabei positive Schlafeffekte aufzeigen.

**Hypothese 2:** Schlaf erleichtert den Transfer der implizit gelernten Sequenz in einen verlängerten zeitlichen Kontext.

### **1.5.3 Wie wirkt sich explizites Wissen über das Vorhandensein der Sequenz auf Predictive Coding aus?**

Die Unterscheidung zwischen explizitem und implizitem Wissen ist klar definiert (siehe Abschnitt 1.1 Gedächtnissystem). In der Praxis sind beide Lernprozesse dennoch häufig schwer abzugrenzen, da sie nicht nur isoliert, sondern auch parallel auftreten (Willingham and Goedert-Eschmann 1999; Willingham et al. 2002).

In der vorliegenden Studie war dies insbesondere im letzten Abrufttest am Versuchsende der Fall. Er fand nach Aufklärung der Versuchspersonen über das Vorhandensein der regelmäßigen Stimulusabfolge und Durchführung von Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz statt.

Das Vorkommen von Interferenzen zwischen explizitem und implizitem Lernen ist bereits nachgewiesen worden (Fletcher et al. 2005). Aus diesem Grund und aufgrund von potentiellen Ermüdungserscheinungen am Versuchsende wurde eine rückläufige Leistung der Versuchspersonen im diesem letzten Abrufttest erwartet.

**Hypothese 3:** Explizites Wissen und Fatigue könnten den Abruf des implizit gelernten Sequenz-Wissens und die Anwendung von schlafabhängig konsolidierten Vorhersagemodellen beim Predictive Coding negativ beeinflussen.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Versuchspersonen**

An der Studie nahmen 64 Versuchspersonen teil (32 weiblich, 32 männlich; mittleres Alter 25, Spannweite [20;37]), die in zwei verschiedenen Gruppen mit je zwei Subgruppen getestet wurden. Die Rekrutierung erfolgte über Aushänge auf dem Gelände der Eberhard Karls Universität und des Universitätsklinikums Tübingen sowie über Rundmails an alle Studierenden und Mitarbeiter.

Professionelle Maschinenschreiber und Personen, die ein Musikinstrument spielen, wurden von der Studie ausgeschlossen, um eine Beeinflussung der Ergebnisse aufgrund überdurchschnittlich guter Fingerfertigkeit zu vermeiden. Weitere Ausschlusskriterien waren starke Belastungen und ein übermäßiger Koffein-, Nikotin- oder Alkoholkonsum. Alle Versuchspersonen waren laut Selbstauskunft physisch und psychisch gesund, nahmen keine Medikamente ein (außer Antikonzeptiva) und wiesen einen normalen Schlaf-Wach-Rhythmus auf. In den sechs Wochen vor Versuchsteilnahme durften keine Schichtarbeiten oder Nachtwachen erfolgt sein. Die Versuchspersonen waren rechtshändig und besaßen ein teils durch Brille oder Kontaktlinsen korrigiertes, normales Sehvermögen ohne sonstige Sehschwächen. Sie wurden instruiert, während des gesamten Versuchszeitraumes kein Koffein oder Alkohol zu konsumieren und (außer Antikonzeptiva) keine Medikamente einzunehmen.

Im Vorfeld erhielten alle Versuchspersonen ein Studieninformationsblatt, das aus methodischen Gründen und um das Ergebnis der Studie nicht zu gefährden, nicht über den vollständigen wissenschaftlichen Hintergrund und die Fragestellung informierte. Nach Aufklärung über das Studiendesign und die Teilnahmebedingungen in einem persönlichen Gespräch gaben die Versuchspersonen schriftlich ihre Einwilligung zur Teilnahme an der Studie und in die Datenerhebung. Bei einem Studienabbruch erfolgte die sofortige Löschung aller bereits erhobenen Daten. Nach vollständiger Teilnahme erhielten die Versuchspersonen eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 25 Euro. Die Untersuchung wurde von der Ethikkommission der Universität Tübingen genehmigt.

Obwohl in dieser Arbeit aus Gründen der Lesbarkeit die männliche Form für Personenbezeichnungen verwendet wurde, bezieht sich diese stets auf Angehörige beider Geschlechter.

## **2.2 Serielle Antwortzeitaufgabe**

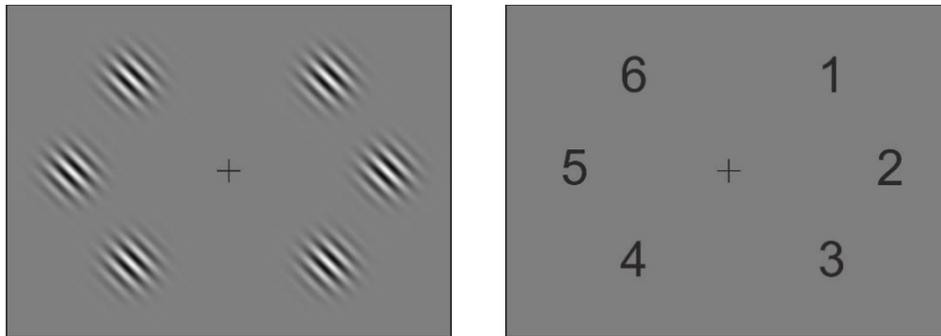
Es wurde eine deterministische serielle Antwortzeitaufgabe in Anlehnung an die Experimente von Nissen und Bullemer durchgeführt (Nissen & Bullemer 1987). Hierbei reagierten die Probanden auf visuelle Stimuli, die an sechs verschiedenen Positionen in der Gesichtsfeldperipherie auf einem Computerbildschirm erschienen, mit einem korrespondierenden Tastendruck auf der Tastatur. Dabei war ihnen unbekannt, dass die Stimuli einer 12-gliedrigen Sequenz folgten, welche während des Trainings implizit gelernt werden sollte. Um den impliziten Lernerfolg zu überprüfen, wurde in den Abrufftests pro Durchlauf der Sequenz ein von der korrekten Position abweichender Stimulus (Deviant) gezeigt. Außerdem wurden Standard-Stimuli, die unmittelbar auf Deviants folgten, als weiterer Stimulustyp mit der Bezeichnung Folge-Standard von den anderen Standards abgegrenzt.

Die Differenzen der Fehlerraten und Antwortzeiten zwischen diesen drei Stimulustypen dienten als Maß für das implizite Wissen der Probanden über die Sequenz.

## **2.3 Stimulus-Spezifikationen und Sequenz-Regelsystem**

Die visuellen Stimuli erschienen in Form von graustufigen Gabor-Gittern an sechs verschiedenen Positionen. Diese waren symmetrisch in der Peripherie des Bildschirms um ein zentrales Kreuz angeordnet. Die Gabor-Gitter hatten eine Größe von  $5^\circ$  Sehwinkel und eine Raumfrequenz von 1,5 Zyklen pro Sehwinkelgrad. Sie waren entweder um  $45^\circ$  oder  $35^\circ$  gekippt (Orientierung des Stimulus). Ein Stimulus wurde so lange präsentiert, bis die korrekte Antworttaste gedrückt wurde. Erst dann erschien nach einer definierten zeitlichen Verzögerung, dem Antwort-Stimulus-Intervall (RSI, englisch: response-to-

stimulus interval), der nachfolgende Stimulus. Das RSI betrug je nach Gruppenzuordnung und Test entweder  $200 \pm 50$  ms (kurzes RSI) oder  $2000 \pm 500$  ms (langes RSI).



**Abbildung 2: Anordnung der visuellen Stimuli in der Bildschirmperipherie und Nummerierung der sechs Positionen.** Die Stimuli erschienen an sechs peripheren Positionen um ein zentrales Kreuz. Jeder Position ist eine Ziffer von 1-6 zugeordnet und kann jeweils mit einem Buchstaben von a-f aus der Beispiel-Sequenz ersetzt werden (siehe Abbildung 3). Orientierung der abgebildeten Stimuli:  $45^\circ$ .

Die Stimuli folgten einer deterministischen 12-gliedrigen Sequenz, wobei in der Stimulusabfolge jeweils die Position zwei aufeinanderfolgender Stimuli die Position des nachfolgenden Stimulus vorgab. Unter Einbeziehung der Orientierung der Stimuli, konnte bereits anhand eines einzelnen Stimulus der nachfolgende Stimulus deterministisch vorausgesagt werden, was einer Sequenz 1. Ordnung entspricht.

Bei der Erstellung der Sequenzen fand hinsichtlich Orientierung und Position der Stimuli das folgende grammatikalische Regelsystem Anwendung:

- Die Stimuli erscheinen gleich häufig an den sechs Positionen.
- An derselben Position durfte erst dann erneut ein Stimulus erscheinen, wenn zuvor mindestens zwei Stimuli an anderen Positionen erschienen waren (keine Triplets, z. B. 1-4-2-1, nicht 1-4-1-2).
- Es durften nicht mehr als zwei Stimuli hintereinander an benachbarten Positionen erscheinen (z. B. 1-2-5-3, nicht 1-2-3-5).

- Zwei aufeinanderfolgende Stimuluspositionen durften nur einmal pro Sequenz auftreten (keine doppelten Vorhersagen).
- Dieselbe Orientierung durfte pro Position nur einmal vorkommen und höchstens zwei Mal in Folge hintereinander erscheinen.

Aus diesem Regelsystem wurde folgende grammatikalisch korrekte Sequenz gebildet: a-c-d-f-b-e-d-b-a-e-c-f, wobei jedem Buchstaben (a-f) eine Position (1-6) zugeordnet ist. Daraus ergab sich die Summe von insgesamt 228 möglichen Sequenzen. Hiervon wurden 16 Sequenzen randomisiert ausgewählt und in allen vier Untergruppen zufällig jeweils einem Probanden zugeteilt, sodass jede Sequenz in jeder Bedingung einmal und damit insgesamt vier Mal Anwendung fand.

Auch nach Einführung der Deviants in den Abrufftests stimmten die Sequenzen weiterhin mit dem grammatikalischen Regelsystem überein. Da sich zwei Stimuli stets gegenseitig ersetzten, traten alle Stimuluspositionen weiterhin gleich häufig auf. Für jede Sequenz wurden zwei Kombinationen (A und B) aus je sechs Deviant-Sequenzen erstellt. In beiden Kombinationen waren vier Deviant-Sequenzen identisch, sodass jede Kombination zwei individuelle Deviant-Sequenzen beinhaltete. Die eine Hälfte der Probanden wurde Kombination A, die andere Kombination B zugewiesen. Da ein Abrufftest aus drei Experimentalblöcken bestand und diese sich wiederum aus acht Sequenzdurchläufen zusammensetzten, wurden pro Abrufftest 24 Deviant-Sequenzen benötigt. Entsprechend wurde jede der sechs Deviant-Sequenzen einer Kombination insgesamt vier Mal pro Abrufftest gezeigt. Zum besseren Verständnis sind die Deviant-Sequenz-Kombinationen in Abbildung 3 dargestellt.

### Standard-Sequenz

a c d f b e d b a e c f

### Deviant-Sequenzen

#### Kombination A

a	b	d	f	b	e	d	b	a	e	c	f
a	c	e	f	b	e	d	b	a	e	c	f
a	c	d	a	b	e	d	b	a	e	c	f
a	c	d	f	b	e	d	c	a	e	c	f
a	c	d	f	b	e	d	b	f	e	c	f
a	c	d	f	b	e	d	b	a	d	c	f

#### Kombination B

a	c	e	f	b	e	d	b	a	e	c	f
a	c	d	a	b	e	d	b	a	e	c	f
a	c	d	f	c	e	d	b	a	e	c	f
a	c	d	f	b	e	d	b	f	e	c	f
a	c	d	f	b	e	d	b	a	d	c	f
a	c	d	f	b	e	d	b	a	e	b	f

**Abbildung 3: Die im Training implizit gelernte Standard-Sequenz und Kombination A und B der Deviant-Sequenzen der Abrufttests.** Alle Sequenzen stimmen mit dem grammatikalischen Regelsystem überein. Den Buchstaben a-f ist jeweils eine Position 1-6 (siehe Abbildung 2) zugeordnet. Es wurden zwei Kombinationen (A und B) mit je sechs Deviant-Sequenzen erstellt. Die Probanden wurden zu gleichen Teilen den beiden Kombinationen zugeteilt. Pro Abrufttest wurde jede Deviant-Sequenz einer Kombination vier Mal gezeigt. Farblgende: ■ = Standard; ■ = Deviant; ■ = Folge-Standard.

## 2.4 Versuchsdesign und -durchführung

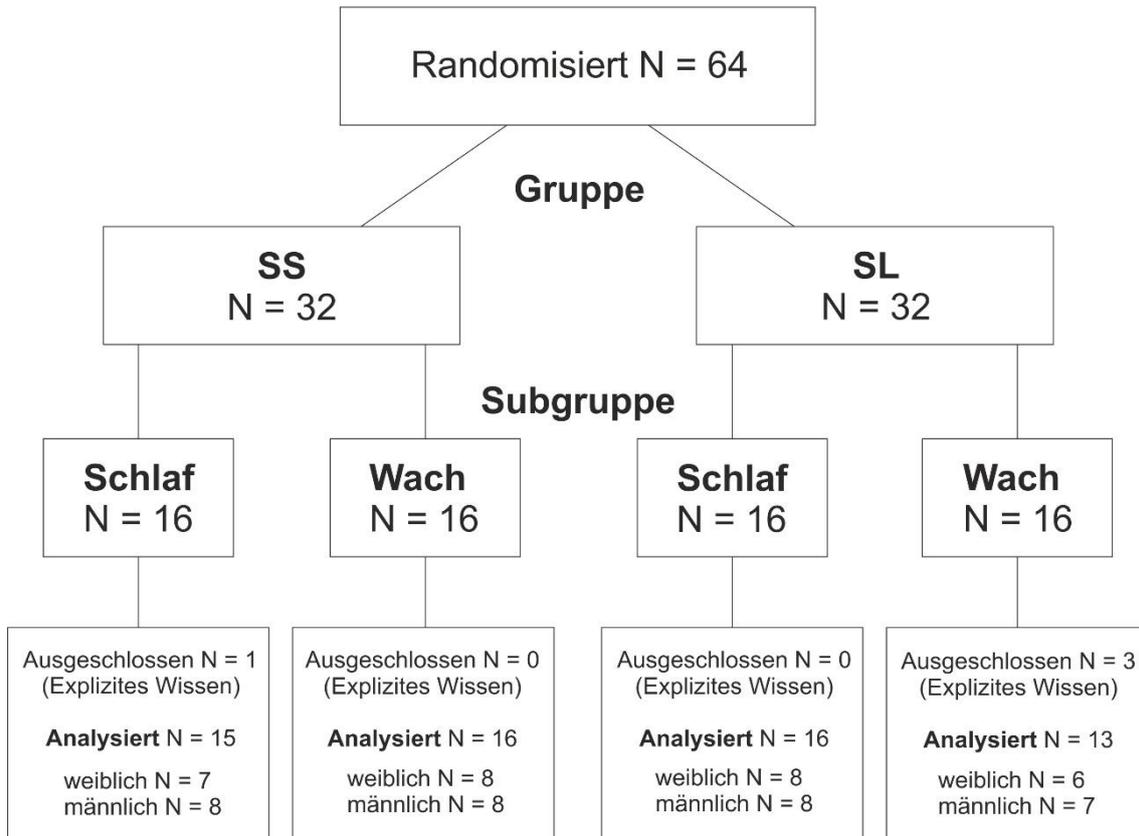
Die Probanden wurden in zwei Hauptgruppen aufgeteilt: in der SS-Gruppe (englisch: Short/Short) fanden das Training und alle drei Abrufttests vor dem Hintergrund eines kurzes RSIs statt. In der SL-Gruppe (englisch: Short/Long) wurde der Abrufttest nach dem Schlaf-/Wach-Retentionsintervall als einziger mit einem langen RSI durchgeführt.

Beide Gruppen waren des Weiteren in zwei Untergruppen aus je 16 Versuchspersonen gespalten, die sich bezüglich der Bedingungen im Retentionsintervall unterschieden: eine Untergruppe wurde zuerst am Abend und

nach normalem Nachtschlaf am folgenden Morgen getestet (Schlafgruppe). Die andere Gruppe wurde am Morgen und am Abend desselben Tages getestet (Wachgruppe). Die Gruppenzuteilung erfolgte pseudo-randomisiert durch den Versuchsleiter, entsprechend des Geschlechts und der Reihenfolge, in der die Personen rekrutiert wurden.

Vier Versuchspersonen wurden von der statistischen Analyse ausgeschlossen, da sie die Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz überdurchschnittlich gut absolvierten und das Vorliegen von explizitem Wissen nicht ausgeschlossen werden konnte ( $> 2$  Standardabweichungen vom Gruppendurchschnitt für die liberale und konservative Auswertung der freien Reproduktion oder der Triplet-Vervollständigungsaufgabe, siehe 2.5 Versuchsablauf).

Abbildung 4 zeigt schematisch die Gruppenzuteilung und gibt Auskunft darüber, wie viele Versuchspersonen pro Gruppe in die Analyse miteinbezogen wurden.



**Abbildung 4: Studiendesign.** Die 64 Probanden wurden auf zwei Hauptgruppen (SS/SL) mit je zwei Subgruppen (Schlaf-/Wachbedingung) aufgeteilt. Die SS-Gruppe wurde ausschließlich mit kurzen RSIs trainiert und getestet. Der SL-Gruppe wurden im Abrufttest nach dem Retentionsintervall lange RSIs präsentiert. Das Training und die übrigen beiden Abrufttests fanden stets mit kurzen RSIs statt. Aufgrund von überdurchschnittlich guten Leistungen ( $> 2$  Standardabweichungen vom Gruppenschnitt) in den Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz wurden vier Probanden aus den Analysen ausgeschlossen. Es wurden insgesamt 60 Probanden analysiert, davon 31 in der SS-Gruppe (Schlaf: 15, Wach: 16) und 29 in der SL-Gruppe (Schlaf: 16, Wach: 13).

Das Training und die Abrufttests waren in mehrere Experimentalblöcke untergliedert. Die achtmalige Wiederholung einer Sequenz ( $12 \times 8 = 96$  Stimuli) bildete dabei einen Experimentalblock. Um das Risiko einer expliziten Wahrnehmung der Sequenz durch die Probanden zu vermindern, wurde zu Beginn und zum Ende eines jeden Experimentalblockes ein Teilabschnitt der Sequenz gezeigt, welche hierfür an einer zufälligen Stelle in zwei Abschnitte gespalten wurde. Zwischen den Experimentalblöcken fand jeweils eine 30-sekündige Pause statt, in der die durchschnittliche Antwortzeit (arithmetisches Mittel) im vorangegangenen Block gezeigt wurde. Die Trainingsphase umfasste fünf Experimentalblöcke. Ein Abrufttest setzte sich aus drei Experimentalblöcken

zusammen und enthielt pro Sequenzdurchlauf einen zufälligen Deviant. Die Anzahl der Blöcke wurde den Probanden zuvor nicht mitgeteilt, um eine motivationsbedingte Beeinflussung zu verhindern.

Die Experimente fanden in einem abgedunkelten Raum in ruhiger Umgebung statt. Mit Hilfe einer Kinnstütze wurde ein konstanter Augenabstand der Probanden zum Bildschirm von ca. 57 Zentimetern gewährleistet. Zeige-, Mittel- und Ringfinger lagen auf den korrespondierenden Antwort-Tasten der Computertastatur. Die Probanden erhielten die Anweisung stets das Kreuz in der Mitte des Bildschirms zu fixieren und so schnell und korrekt wie möglich auf die Stimuli zu antworten. Alle Experimente wurden von derselben Person angeleitet. Zur Durchführung wurde die Software Presentation® (Neurobehavioral System, Inc. Berkeley, CA, USA) verwendet.

## **2.5 Versuchsablauf**

Die Probanden der Schlafgruppe fanden sich am Abend zwischen 20:30 und 21:00 Uhr zur ersten Sitzung im Labor ein. Die Probanden der Wachgruppe erschienen zur ersten Sitzung am Morgen zwischen 8:30 Uhr und 9:00 Uhr. Dort willigten sie nach einem persönlichen Eingangsgespräch schriftlich in die Studienteilnahme ein. Zur Feststellung der Eignung für die Teilnahme am Experiment wurden zunächst wichtige Ein- und Ausschlusskriterien abgefragt.

Die Bestimmung der Sehstärke und des Kontrastsehens der Probanden wurde mit dem „Freiburg Visual Acuity and Contrast Test“ (FrACT, Bach 2007) durchgeführt, gefolgt von einem Test zur Bestimmung der Augendominanz nach der Dolman Methode (Chaurasia & Mathur 1976; Cheng et al. 2004). Daraufhin absolvierten die Probanden einen fünfminütigen Vigilanztest. Dabei handelt es sich um einen Reaktionszeittest der Informationen über die aktuelle Aufmerksamkeit und Konzentration der Probanden liefert (Diekelmann et al. 2013). Bei diesem Test reagierten die Probanden so schnell wie möglich mittels Tastendruck auf visuelle Signale, die in unregelmäßigen Zeitabständen entweder auf der linken oder auf der rechten Bildschirmseite erschienen. Im Anschluss an den Vigilanztest wurden die Probanden dazu aufgefordert ihren subjektiven

Schläfrigkeitzustand anhand der Stanford-Schläfrigkeitsskala (SSS) einzuschätzen (Hoddes et al. 1972).

Schließlich fand die Kalibrierung eines Eye Trackers (The Eye Tribe Tracker, The Eye Tribe ApS, Copenhagen, Denmark) statt, der die Augenbewegungen und Fixationspunkte der Probanden auf dem Bildschirm während der nachfolgenden SRTT-Aufgaben erfasste.

In einem kurzen Übungsblock von 20 zufälligen Stimuli, machten sich die Probanden mit der SRTT vertraut, bevor anschließend die Trainingseinheit erfolgte. Nach Beendigung des Trainings sollten die Probanden für dreißig Minuten entspannen und wurden angehalten sich dabei nicht anzustrengen oder zu lesen. Unterstützend wurde in den ersten 20 Minuten dieser Pause entspannende meditative Musik gespielt. Nach Ablauf der Erholungsphase wurde erneut der Schläfrigkeitzustand der Probanden erhoben. Danach fand der Abrufttest vor dem Schlaf-/Wach-Retentionsintervall (Prä-Retentionstest) statt. Wie im Training wurden dabei in beiden Gruppen kurze RSIs verwendet.

Um objektive Daten über die Schlafaktivität der Probanden zwischen den beiden Sitzungen in der Wach- und der Schlafgruppe zu sammeln, wurde ihnen zum Abschluss der ersten Sitzung eine Actiwatch® (Actiwatch 2, Philips Respironics, Murrysville, PA, USA) um das Handgelenk angelegt. Diese sollte durchgängig getragen werden und lieferte Informationen über die körperliche Aktivität und die Umgebungshelligkeit der Probanden. Außerdem wurde ein Fragebogen zu Tagesaktivitäten ausgehändigt, in dem die Probanden in kurzen Stichpunkten ihre Tätigkeiten zwischen den beiden Sitzungen protokollieren sollten. Die Probanden der Schlafgruppe erhielten zusätzlich einen Selbsteinschätzungs-Fragebogen zur Erfassung der Schlafqualität, den sie nach dem Aufwachen am nächsten Morgen ausfüllten (Schlaffragebogen A / revidierte Version, SF-A/R). Sie wurden angehalten, wie üblich zu Bett zu gehen und möglichst acht Stunden zu schlafen. Die Probanden der Wachgruppe hingegen sollten ihren normalen Tagesaktivitäten nachgehen, exzessive körperliche Aktivitäten sowie übermäßiges Lernen vermeiden und nicht schlafen. Alle Probanden wurden nochmals darauf hingewiesen, bis zum Ende der zweiten Sitzung keine

Medikamente sowie keine koffein- oder alkoholhaltigen Nahrungsmittel einzunehmen.

Die zweite Sitzung begann für die Schlafgruppe am darauffolgenden Morgen zwischen 8:30 Uhr 9:00 und für die Wachgruppe am Abend desselben Tages zwischen 20:30 Uhr und 21:00 Uhr. Zunächst erfolgte eine kurze Befragung zum Gesundheitszustand, zu Medikamenten-, Drogen- oder Kaffeekonsum und eventuell neu aufgetretenen Stressoren. Um den Chronotyp der Probanden zu bestimmen, füllten diese den Selbsteinschätzungs-Fragebogen Morningness-Eveningness Questionnaire (D-MEQ-SA) aus (Horne & Ostberg 1976; Griefahn et al. 2001). Unter den Chronotypen lassen sich starke Morgentypen, Morgentypen, neutrale Typen, Abendtypen und starke Abendtypen abgrenzen. Mittels eines Fragebogens zur Händigkeit (Edinburgh Handedness Inventory, Oldfield 1971) wurde als nächstes die Dominanz der rechten Hand verifiziert. Wie schon in der ersten Sitzung folgte daraufhin der Vigilanztest mit anschließender Bestimmung des Schläfrigkeits-Zustandes.

Im Anschluss an einen erneuten kurzen Übungsblock, fand schließlich nach einem Retentionsintervall von ca. 11 Stunden und 50 Minuten der zweite Abrufftest (Post-Retentionstest) statt. Je nach Gruppe wurde dieser mit kurzen RSIs, also im selben zeitlichen Kontext (SS-Gruppe) oder mit langen RSIs in einem verlängerten zeitlichen Kontext (SL-Gruppe) durchgeführt.

Danach wurden die Probanden mit zunehmender Spezifität bezüglich einer Regelmäßigkeit im Experiment befragt (für den Wortlaut der Fragen siehe Anhang: Erste Befragung zum Experiment). Wurde eine Regelmäßigkeit in der Abfolge der Stimuli erkannt, sollte diese verbal beschrieben und schriftlich protokolliert werden (schriftliche freie Reproduktion). Im Anschluss fand eine Aufklärung über das Vorhandensein der Sequenz aus 12 Stimuli statt und die Probanden führten drei Aufgaben durch, die der Bestimmung ihres Wissens über die Sequenz dienten und nachfolgend beschrieben werden.

#### 1. Freie Reproduktion

In der freien Reproduktion gaben die Probanden durch Drücken der Antwort-Tasten in der als korrekt empfundenen Reihenfolge die Sequenz frei wieder. Mit jedem Tastendruck erschien auf dem Bildschirm eine kreisförmige Markierung an

der korrespondieren Position, sodass die Probanden ihre Angaben in visualisierter Form verfolgen konnten. Es sollten 12 Tastendrucke gemacht werden und es gab zwei Versuche.

## 2. Triplet-Erkennungsaufgabe

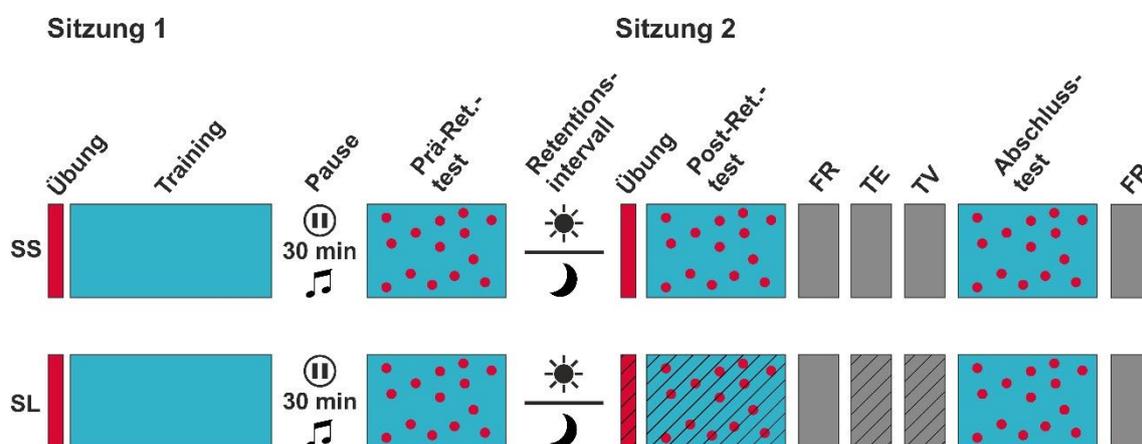
Während der Triplet-Erkennungsaufgabe wurden Sequenzen aus drei Stimuli (Triplets) auf dem Bildschirm abgespielt, die entweder Teil der gelernten Sequenz waren oder nicht (je 12 Triplets). Auch nicht der Sequenz entsprechende Triplets folgten dem oben genannten grammatikalischen Regelsystem. Für jedes Triplet mussten die Probanden angeben, ob es ihnen bekannt vorkam oder nicht. Anschließend sollten sie einschätzen, wie sicher sie sich mit dieser Entscheidung waren. Hierzu diente eine Vier-Punkte-Skala von 1 (sehr unsicher) bis 4 (sehr sicher).

## 3. Triplet-Vervollständigungsaufgabe

Bei der Triplet-Vervollständigungsaufgabe wurden Sequenzen aus zwei Stimuli gezeigt. Aufgabe der Probanden war es, diese Sequenzen, entsprechend der gelernten Sequenz, zu Triplets zu komplettieren. Jedes mögliche Triplet sollte dabei zwei Mal komplettiert werden, sodass insgesamt 24 Zwei-Stimulus-Sequenzen gezeigt wurden. Nach jeder Angabe trafen die Probanden auf der Vier-Punkte-Skala, wie oben beschrieben, erneut eine Konfidenz-Einschätzung.

Auf diese drei Untersuchungen folgte ein dritter Abrufttest (Abschlusstest), der in beiden Gruppen im ursprünglichen temporalen Kontext (d.h. mit kurzen RSIs) stattfand. Daraufhin wurden die Probanden um eine subjektive Einschätzung gebeten, hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades, während des Experiments die Mitte des Bildschirms zu fixieren. Außerdem wurde die Anstrengung durch die Teilnahme am Experiment und der Einfluss des Antwortzeit-Feedbacks (in der 30-sekündigen Pause zwischen den Experimentalblöcken) auf die Motivation abgefragt. Danach fand eine weitere freie Reproduktion statt. Die Sitzung wurde schließlich mit einem Test zur Bestimmung der räumlich-visuellen Merkspanne (Blockspanne) und Supraspanne abgeschlossen. Dieser Test wurde von Corsi übernommen (Corsi 1973) und in die Open-Source-Software PEBL (Psychology Experiment Building Language) übertragen.

Siehe Anhang, für eine tabellarische Übersicht des Versuchsablaufs. Eine schematische Darstellung der Experimente ist in Abbildung 5 für die vier unterschiedlichen Bedingungen zu sehen.



**Abbildung 5: Schematische Darstellung des Experimentalablaufs in den vier Bedingungen.** Die obere Reihe bezieht sich auf die SS-Gruppe (N=31), die untere auf die SL-Gruppe (N=29). Auf einen Übungsblock aus 20 zufälligen Stimuli (rot) folgte das Training mit fünf Experimentalblöcken aus je acht Sequenzwiederholungen (blau). Nach einer 30-minütigen Pause wurde der Prä-Retentionstest mit drei Experimentalblöcken und bereits einem Deviant pro Sequenzdurchlauf durchgeführt (rote Punkte). Nach einem Schlaf-/Wach-Retentionsintervall fand die zweite Sitzung statt, die mit einem erneuten kurzen Übungsblock begonnen wurde. Anschließend erfolgte der Post-Retentionstest mit drei Experimentalblöcken. Danach wurden die Probanden über das Vorhandensein der Sequenz aufgeklärt und führten Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz durch (FR: Freie Reproduktion, TE: Triplet-Erkennungsaufgabe; TV: Triplet-Vervollständigungsaufgabe). In der SL-Gruppe fanden der Post-Retentionstest und die TE und TV mit einem langen RSI statt (schräge Streifung). Es schloss sich ein Abschlusstest mit drei Experimentalblöcken an, gefolgt von einer zweiten freien Reproduktion.

## 2.6 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der SRTT wurden die Fehlerraten und Antwortzeiten für die drei verschiedenen Stimulustypen bestimmt. Ein Fehler war definiert als Tastendruck, der nicht mit der Position des angezeigten Stimulus korrelierte. Die Fehlerrate wurde pro Experimentalblock durch Division der Summe der Fehler bei einem Stimulustyp durch die Gesamtanzahl dieses Stimulustyps berechnet. Die Antwortzeit umfasste die Zeitspanne zwischen Erscheinen des Stimulus und korrektem Tastendruck (unabhängig davon, ob zuvor eine oder mehrere inkorrekte Tasten gedrückt wurden) und wurde ebenfalls für Standards, Deviants und Folge-Standards getrennt ermittelt. Anschließend wurde die

durchschnittliche Antwortzeit eines Tests (Training oder Abrufttest) für den entsprechenden Stimulustyp in Millisekunden als arithmetisches Mittel aller Experimentalblöcke bestimmt. Die durchschnittliche Fehlerrate eines Tests wurde auf dieselbe Art und Weise für die drei Stimulustypen berechnet.

Aus der Differenz der durchschnittlichen Fehlerrate, bzw. Antwortzeit für Deviants und Folge-Standards wurde ein Vorhersagestärke-Index gebildet (Deviants minus Folge-Standards).

Weiterhin wurden vorhersagebedingte Fehler analysiert, welche wie folgt definiert sind: (A) in Reaktion auf einen Deviant kam es zu einem Fehler und (B) es wurde im Rahmen des Fehlers diejenige Taste gedrückt, die der Position des Standard-Stimulus entsprochen hätte, der anstelle des Deviants korrekterweise aufgetreten wäre. Entsprechend beschreibt  $P(A)$  die Deviants-Fehlerrate und  $P(B|A)$  die Rate vorhersagebedingter Fehler während eines Tests. Um nun das Zufallslevel für einen vorhersagebedingten Fehler zu bestimmen, also die Wahrscheinlichkeit, dass sowohl Ereignis A, als auch Ereignis B eintreten, wurde der folgende Multiplikationssatz eingesetzt:

$$P(A \cap B) = P(A) * P(B|A)$$

$P(A)$  beschreibt hierin die Deviants-Fehlerrate während des Prä-Retentionstests.  $P(B|A)$  ist die Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung von Bedingung B, vorausgesetzt, dass Bedingung A bereits eingetreten ist und beträgt 1/5.

Zur Auswertung der freien Reproduktion wurde die maximale Zahl direkt aufeinanderfolgender korrekt angegebener Stimuluspositionen aus allen 12 Stimulusangaben bestimmt. Dies erfolgte in der konservativen Auswertung ab der ersten Stimulusangabe und in der liberalen Auswertung ab einer beliebigen Stimulusangabe. In der schriftlichen freien Reproduktion wussten die Probanden noch nicht über die 12-gliedrige Sequenz Bescheid und gaben eine beliebige Anzahl an Stimuli an. Daraus wurde lediglich die Stimulusanzahl der längsten korrekt angegebenen Stimulusabfolge auf liberale Weise bestimmt.

Zur Auswertung der Triplet-Erkennungsaufgabe wurde das Sensitivitätsmaß  $d'$  ( $d$  prime) aus korrekten und inkorrekten Durchgängen mit hoher Konfidenzbewertung von 3 oder 4 (auf einer Skala von 1-4) herangezogen. Die

Berechnung erfolgte durch Subtraktion der jeweils z-transformierten Treffer-Rate (korrekte Durchgänge mit hoher Konfidenzbewertung) und der falschen Alarm-Rate (inkorrekte Durchgänge mit hoher Konfidenzbewertung) (L. Brophy 1986). Der Eyetracker zeichnete als Ereignisse während der SRTT Lidschläge und die Fixation auf definierte Bereiche auf. Zur Auswertung wurden die Anteile der Fixation auf folgende Regionen aus den Gesamtereignissen bestimmt: Bereich von 1°, 3°, bzw. 5° um das zentrale Kreuz (zentrale Fixation) und Stimuluspositionen (Stimulus-Fixation).

Folgende Schlafparameter wurden objektiv mittels Auswertung der Actiwatch®-Daten und subjektiv anhand des Selbsteinschätzungs-Fragebogens (SF-A/R) gewonnen: Zeit im Bett (ab Ausschalten des Lichts bis zum Aufstehzeitpunkt), Einschlaf-Latenzzeit (ab Ausschalten des Lichts bis zum Einschlafzeitpunkt), Schlafperiode (ab Einschlafzeitpunkt bis zum Aufwachzeitpunkt), Wachphasen nach dem Einschlafen. Die Rohdaten der Actiwatch® wurden mit einem Standard-Algorithmus im Programm Respironics Actiware 5 analysiert. Wachphasen wurden dabei ab einer Schwelle von 40 Bewegungszählungen pro 15-Sekunden-Zeitraum und Schlafphasen ab einer Inaktivitätszeit von 10 Minuten registriert.

Für die statistische Auswertung der Daten wurden mehrfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholungen (englisch: repeated measures analysis of variance) durchgeführt, mit einer abhängigen Variable (Fehlerrate, Antwortzeit, Vorhersagestärke-Index, Rate vorhersagebedingter Fehler) und mehreren unabhängigen Variablen, wobei die Gruppe (SS-/SL-Gruppe), bzw. Subgruppe (Schlaf-/Wachgruppe) als nicht messwiederholte Zwischensubjekt-Faktoren (englisch: between subjects factor) und der Testzeitpunkt (Block im Training, bzw. Prä-/Post-Retentionstest/Abschlusstest) und Stimulustyp (Standard/Deviant/Folge-Standard) als messwiederholte Innersubjekt-Faktoren (englisch: within subjects factor) definiert wurden.

In der Varianzanalyse (ANOVA, englisch: analysis of variance) gefundene Interaktionen wurden mittels zweiseitiger Post-hoc-Tests weiter analysiert. Um Unterschiede zwischen den Abstufungen der Zwischensubjekt-Faktoren Gruppe (SS/SL), bzw. Subgruppe (Schlaf/Wach) nur bezüglich der Abstufung eines

Innersubjekt-Faktors zu ermitteln (z.B. Faktor = Stimulustyp mit den Abstufungen = Standard/Deviant/Folge-Standard), wurden  $t$ -Tests für zwei unverbundene Stichproben eingesetzt.  $t$ -Tests für zwei verbundene Stichproben deckten signifikante Differenzen zwischen zwei Abstufungen eines Innersubjekt-Faktors auf.  $t$ -Tests für eine Stichprobe dienten dem Abgleich der Abstufung eines Faktors mit einem festgelegten Sollwert (z.B. 0 oder Zufallslevel).

Korrelationsmatrizen wurden zur Detektion von Zusammenhängen und Wechselbeziehungen zwischen mehreren Variablen eingesetzt.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels des Computerprogrammes JASP für Windows (JASP Team (2018). JASP (Version 0.8.3.1)). Ein Trend wurde ab  $p < 0.1$  angenommen. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p < 0.05$  festgelegt.

### **3 Ergebnis**

Teile der nachfolgend aufgeführten Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht (Lutz et al. 2018). Dabei handelt es sich insbesondere um die Ergebnisse der SS-Gruppe im Training, Prä- und Post-Retentionstest und in den Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz. Die Ergebnisse des Abschlusstests und der SL-Gruppe wurden bislang nicht im Umfang der vorliegenden Arbeit veröffentlicht. Alle nachfolgenden statistischen Daten-Analysen wurden unabhängig im Rahmen dieser Arbeit nachgerechnet, bzw. um zusätzliche Analysen erweitert und es wurden keine Abbildungen oder Tabellen aus der vorangegangenen Veröffentlichung übernommen.

#### **3.1 Serielle Antwortzeitaufgabe**

Die Serielle Antwortzeitaufgabe (SRTT) setzte sich aus einer Trainingseinheit und drei Abrufeinheiten zusammen. Während des Trainings sollte die Stimulusabfolge unbewusst gelernt werden, was in den Abruftests überprüft wurde. Diese zeigten pro Sequenzdurchlauf einen von der korrekten Position abweichenden Deviant-Stimulus. Als Maß für das implizite Sequenz-Lernen wurden die Fehlerraten und Antwortzeiten für die folgenden drei Stimulustypen analysiert und verglichen: korrekte und voraussagbare Standards, inkorrekte und nicht voraussagbare Deviants und wieder korrekte und voraussagbare Folge-Standards, die unmittelbar nach Deviants auftraten.

Das Training und der Prä-Retentionstest fanden in der ersten Sitzung statt. Der Post-Retentionstest wurde zu Beginn der zweiten Sitzung nach dem Retentionsintervall durchgeführt. Er basierte in der SL-Gruppe auf langen Antwort-Stimulus-Intervallen (RSI). Am Ende der zweiten Sitzung fand der Abschlusstest, wieder im gelernten zeitlichen Kontext (kurze RSIs) statt. Die Probanden waren zu diesem Zeitpunkt bereits über das Vorhandensein einer Sequenz aufgeklärt worden und hatten alle Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz durchgeführt.

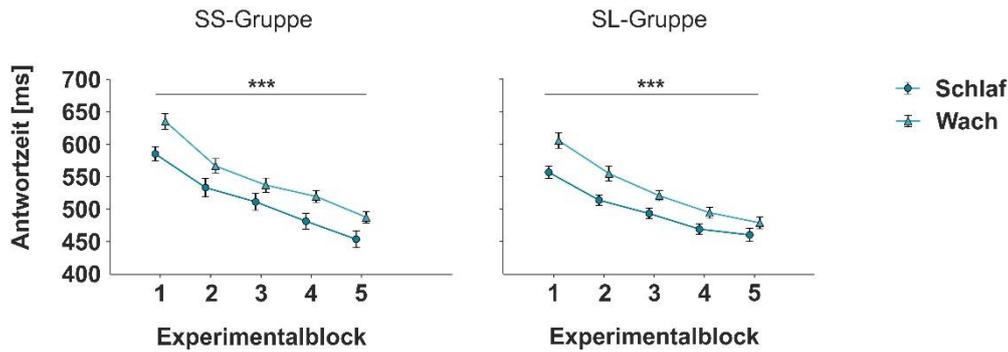
### 3.1.1 Enkodierung: Training

Während des Trainings zu Beginn der ersten Sitzung sollte die Enkodierung der Sequenz stattfinden. Zuerst wurden die Antwortzeiten in einer Varianzanalyse mit den Zwischensubjekt-Faktoren Gruppe (SS/SL) und Subgruppe (Schlaf/Wach) sowie dem Innersubjektfaktor Experimentalblock (1-5) untersucht. Diese ergab einen signifikanten Haupteffekt für die fünf aufeinanderfolgenden Experimentalblöcke ( $F_{(4,224)} = 121.27, p < 0.001$ ).

Zu diesem Experimentalblock-Haupteffekt wurden anschließend Gruppenspezifische Analysen (ANOVA mit dem Zwischensubjekt-Faktor Subgruppe) sowie den Innersubjektfaktoren Experimentalblock und Stimulustyp durchgeführt. Die Antwortzeiten nahmen im zeitlichen Verlauf ab (Experimentalblock-Haupteffekt), sowohl in der SS-Gruppe ( $F_{(4,116)} = 69.11, p < 0.001$ ) als auch in der SL-Gruppe ( $F_{(4,108)} = 53.51, p < 0.001$ ). Dabei gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den jeweiligen Subgruppen (Experimentalblock x Subgruppe, SS:  $F_{(4,116)} = 0.50, p = 0.740$ ; SL:  $F_{(4,108)} = 1.01, p = 0.404$ ). Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Antwortzeiten während des Trainings jeweils für die SS- und die SL-Gruppe.

Entsprechende Varianzanalysen der Fehlerraten der SS- und SL-Gruppe zeigten keinen Experimentalblock-Haupteffekt oder signifikante Interaktionseffekte zwischen den Experimentalblöcken und Gruppen, bzw. Subgruppen (alle  $F_{(4,224)} < 0.68, p > 0.609$ ). Entsprechend ging die Abnahme der Antwortzeiten nicht mit einer Abnahme der Fehlerrate einher.

Hinsichtlich Fehlerraten und Antwortzeiten konnten keine signifikanten Haupteffekte für die Gruppe in einer ANOVA über alle Probanden (SS/SL,  $F_{(1,56)} < 0.64, p > 0.427$ ) oder die Subgruppe in ANOVAS der einzelnen Gruppen (Schlaf/Wach, SS:  $F_{(1,29)} < 1.03, p > 0.245$ ; SL:  $F_{(1,27)} < 1.77, p > 0.195$ ) gefunden werden.



**Abbildung 6: Abnahme der Antwortzeiten im Verlauf des Trainings in der SS- und SL-Gruppe.** Die durchschnittlichen Antwortzeiten der Experimentalblöcke nahmen im Verlauf des Trainings in der SS- und der SL-Gruppe signifikant ab (SS-Gruppe:  $F_{(4,116)} = 69.11$ ,  $p < 0.001$ ; SL-Gruppe:  $F_{(4,108)} = 53.51$ ,  $p < 0.001$ ). Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\*\* $p < 0.001$ . N=31 in der SS-Gruppe und N=29 in der SL-Gruppe.

### 3.1.2 Abruf: Prä-Retentionstest, Post-Retentionstest und Abschlusstest

In einer Analyse des Prä-Retentionstests (ANOVA mit Zwischensubjektfaktoren Gruppe und Subgruppe sowie Innersubjektfaktor Stimulustyp (Standards/Deviants/Folge-Standards)) wurde hinsichtlich Fehlerrate und Antwortzeit kein signifikanter Haupteffekt für die Gruppen nachgewiesen (SS/SL,  $F_{(1,56)} < 0.99$ ,  $p > 0.324$ ). Eine Gruppen-spezifische Varianzanalyse (Zwischensubjekt-Faktor Subgruppe und Innersubjektfaktor Stimulustyp) fand auch zwischen den Subgruppen einer Gruppe keine Unterschiede (Schlaf/Wach, SS:  $F_{(1,29)} < 2.08$ ,  $p > 0.160$ ; SL:  $F_{(1,27)} < 1.44$ ,  $p > 0.241$ ).

Da bereits im Training keine derartigen Effekte gefunden wurden, kann davon ausgegangen werden, dass zwischen und innerhalb der Gruppen vor dem Schlaf/Wach-Retentionsintervall keine prinzipiellen Unterschiede bestanden.

#### 3.1.2.1 SS-Gruppe

##### Fehlerraten

Zunächst fand eine Betrachtung der SS-Gruppe statt, um insbesondere die erste Hypothese zum förderlichen Einfluss von Schlaf in der impliziten Sequenz-Lernaufgabe zu prüfen. Außerdem ist diese Gruppe mit der bestehenden Literatur über SRTT-Studien am besten vergleichbar. Es wurde eine

Varianzanalyse hinsichtlich der Fehlerraten mit der Subgruppe als Zwischensubjektfaktor und dem Stimulustyp und Abrufzeitpunkt (Prä-/Post-Retentionstest/Abschlusstest) als Innersubjektfaktoren durchgeführt. Dabei zeigte sich ein signifikanter Stimulustyp-Haupteffekt ( $F_{(2,58)} = 26.74, p < 0.001$ ). Die Probanden reagierten je nach Stimulustyp unterschiedlich häufig mit Fehlern, wobei die Fehlerrate für Deviants am höchsten und für Standards am geringsten ausfiel. Zusätzlich wurde eine signifikante Interaktion zwischen Abrufzeitpunkt, Stimulustyp und Subgruppe festgestellt ( $F_{(4,116)} = 3.05, p = 0.020$ ).

Im Vergleich zum Prä- und Postretentionstest, fand der Abschlusstest unter veränderten Bedingungen statt, da sich die Probanden dem Vorhandensein der Sequenz bewusst waren. Aus diesem Grund wurde eine weitere Varianzanalyse durchgeführt, die für den Innersubjektfaktor Abrufzeitpunkt nur den Prä- und Post-Retentionstest einschloss. Dabei ergab sich ebenfalls ein signifikanter Stimulustyp-Haupteffekt ( $F_{(2,58)} = 20.07, p < 0.001$ ) und es lag wieder eine Interaktion zwischen Abrufzeitpunkt, Stimulustyp und Subgruppe vor ( $F_{(2,58)} = 4.22, p = 0.020$ ).

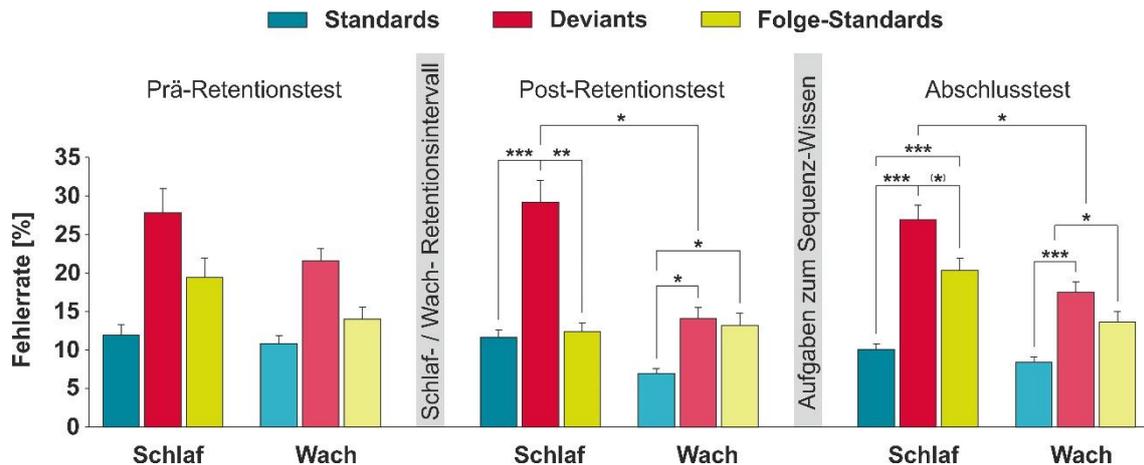
Diese Effekte wurden anschließend in separaten Varianzanalysen des Prä- und Post-Retentionstests und Abschlusstests, mit der Subgruppe als Zwischensubjektfaktor und dem Stimulustyp als Innersubjektfaktor weiter untersucht. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse dieser Analysen jeweils für die Schlaf- und Wachgruppe und alle drei Abrufzeitpunkte.

Die signifikant unterschiedliche Fehlerrate in der Reaktion auf die drei Stimulustypen wurde in allen drei Abruftests reproduziert ( $F_{(2,58)} < 22.93, p < 0.001$ ). Im Prä-Retentionstest zeigte sich keine signifikante „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion ( $F_{(2,58)} = 0.47, p = 0.625$ ). Schlaf- und Wachgruppe, die bis zu diesem Zeitpunkt dieselbe Behandlung erfahren hatten, waren also vergleichbar.

Während des Retentionsintervalls unterschieden sich schließlich die Gruppen hinsichtlich Schlaf- oder Wach-Manipulation. Erwartungsgemäß ergab sich im Post-Retentionstest daher eine signifikante „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion ( $F_{(2,58)} = 6.78, p = 0.002$ ). In anschließenden  $t$ -Tests war die Deviants-Fehlerrate der Schlafprobanden relativ zur Wachgruppe signifikant höher ( $t_{(29)} =$

2.44,  $p = 0.021$ ). Weiterhin hatte die Fehlerrate für Folge-Standards in der Schlafgruppe verglichen mit Deviants soweit abgenommen ( $t_{(14)} = 3.69$ ,  $p = 0.002$ ), dass sie der Fehlerrate für Standards glich ( $t_{(14)} = 0.48$ ,  $p = 0.640$ ). Diese Fehler-Reduktion bei der Antwort auf Folge-Standards wurde in der Wachgruppe nicht beobachtet. Die Fehlerrate für Folge-Standards unterschied sich hier nicht von der Fehlerrate für Deviants ( $t_{(15)} = 0.45$ ,  $p = 0.657$ ) und lag signifikant oberhalb der für Standards ( $t_{(15)} = 2.19$ ,  $p = 0.045$ ). Die hohe Fehlerrate für Deviants und die geringe Fehlerrate für Folge-Standards zeigen, dass Schlaf nicht nur zur Konsolidierung der Stimulusabfolge beiträgt, sondern auch den Umgang mit Störungen der Sequenz verbessert.

Im Abschlusstest wurde schließlich keine signifikante „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion mehr festgestellt ( $F_{(2,58)} = 2.11$ ,  $p = 0.131$ ). Hypothesen-getriebene  $t$ -Tests deckten jedoch eine nach wie vor signifikant höhere Deviants-Fehlerrate der Schlafprobanden verglichen mit Wachprobanden auf ( $t_{(29)} = 2.10$ ,  $p = 0.045$ ). Auch ein Trend für eine Abnahme der Folge-Standards-Fehlerrate relativ zu Deviants wurde nur in der Schlafgruppe beobachtet (Schlaf:  $t_{(14)} = 1.79$ ,  $p = 0.097$ ; Wach:  $t_{(15)} = 1.27$ ,  $p = 0.225$ ). Die Schlafeffekte, die sich im Post-Retentionstest sehr deutlich darstellten, sind im Abschlusstest entsprechend weniger eindeutig klassifizierbar.



**Abbildung 7: Schlaf erhöht die Fehlerraten für Deviants und senkt die Fehlerraten für Folge-Standards.** Die unterschiedlichen Fehlerraten für die drei Stimulustypen im Prä-Retentionstest weisen auf eine erfolgreiche Konsolidierung der Sequenz hin. Im Post-Retentionstest zeigte die Schlafgruppe hohe Fehlerraten für Deviants und ein Absinken der Fehlerraten für Folge-Standards auf das Niveau von Standards. Die Deviants-Fehlerrate der Wachgruppe war dagegen signifikant niedriger als die der Schlafgruppe und außerdem auf dem selben Level wie die Fehlerrate für Folge-Standards. Im Abschlusstest waren die Schlafeffekte weniger deutlich, da die Fehlerrate für Folge-Standards wieder signifikant oberhalb der Standards-Fehlerrate lag. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\*\* $p < 0.001$ , \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , (\* $p < 0.1$ ).  $N = 15$  in der Schlafgruppe und  $N = 16$  in der Wachgruppe.

## Antwortzeiten

Da jeder Stimulus bis zur Eingabe der korrekten Antwort präsentiert wurde, wirkten sich Fehler unmittelbar auf die Antwortzeiten aus. Entsprechend deckte sich die Analyse der Antwortzeiten weitgehend mit dem Ergebnis für die Fehlerraten.

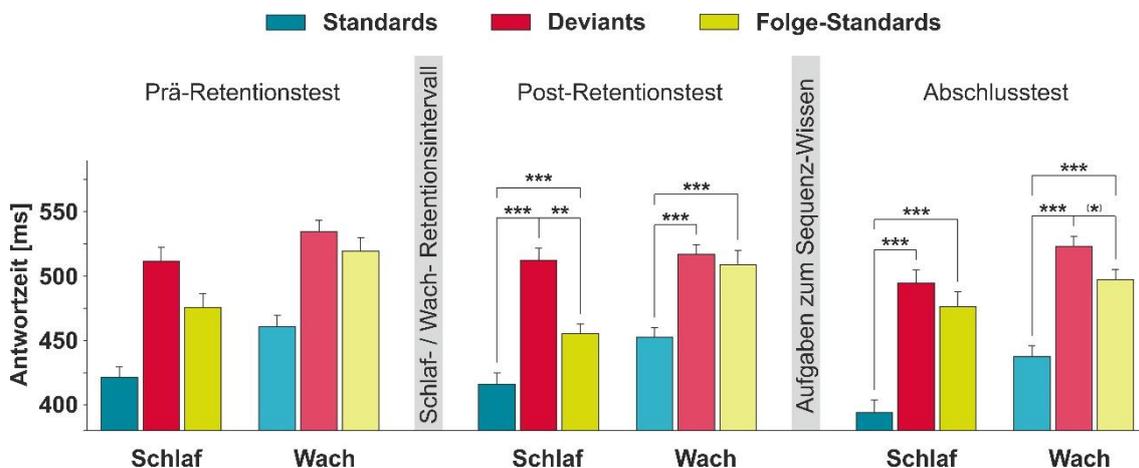
Die oben beschriebenen Analysen ergaben auch hinsichtlich der Antwortzeit einen Trend für eine Interaktion zwischen Abrufzeitpunkt, Stimulustyp und Subgruppe ( $F_{(4,116)} = 2.31$ ,  $p = 0.062$ ). Des Weiteren offenbarte sie wieder einen signifikanten Stimulustyp-Haupteffekt ( $F_{(2,58)} = 65.03$ ,  $p < 0.001$ ) und außerdem einen Abrufzeitpunkt-Haupteffekt ( $F_{(2,58)} = 3.94$ ,  $p = 0.025$ ).

Die zweite Analyse, die sich erneut nur auf den Prä- und Post-Retentionstest als Ausprägungen des Innersubjektfaktors Abrufzeitpunkt konzentrierte, zeigte keine signifikante „Abrufzeitpunkt x Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion ( $F_{(2,58)} = 1.02$ ,  $p = 0.368$ ), aber einen Stimulustyp-Haupteffekt ( $F_{(2,58)} = 44.97$ ,  $p < 0.001$ ).

Dieser Stimulustyp-Haupteffekt war auch in der separaten Betrachtung der drei Abruftests erkennbar ( $F_{(2,58)} < 67.80, p < 0.001$ ). Beide Subgruppen wiesen in  $t$ -Tests der drei Abrufzeitpunkte signifikant längere Antwortzeiten für Deviants als für Standards auf (alle  $p < 0.001$ ).

Auch unter Betrachtung der Antwortzeiten gingen die Schlafeffekte vom Post-Retentionstest zum Abschlusstest verloren, denn eine „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion wurde erneut lediglich für den Post-Retentionstest gefunden (Post-Retentionstest:  $F_{(2,58)} = 3.81, p = 0.028$ ; Abschlusstest:  $F_{(2,58)} = 0.95, p = 0.394$ ). Direkt nach dem Retentionsintervall fanden sich unter Schlafbedingungen signifikant kürzere Antwortzeiten für Folge-Standards als für Deviants ( $t_{(14)} = 3.41, p = 0.004$ ). Über das Wach-Retentionsintervall nahm die Antwortzeit für Folge-Standards relativ zu Deviants nicht signifikant ab ( $t_{(15)} = 0.60, p = 0.559$ ).

Abbildung 8 stellt die durchschnittlichen Antwortzeiten der Schlaf- und Wachgruppe über alle Abruftests gesondert für die drei Stimulustypen dar.



**Abbildung 8: Schlaf erhöht die Antwortzeiten für Deviants und senkt sie für Folge-Standards.** Die Konsolidierung der Sequenz spiegelt sich in den Antwortzeiten für die drei Stimulustypen wider. Im Post-Retentionstest wies die Schlafgruppe für alle drei Stimulustypen signifikant unterschiedliche Antwortzeiten auf, wobei diese für Deviants am längsten und für Standards am kürzesten war. In der Wachgruppe hingegen lagen die Antwortzeiten der Folge-Standards auf dem selben Level wie die Antwortzeiten der Deviants. Der Abschlusstests ließ keine derartigen Schlafeffekte mehr erkennen. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\*\* $p < 0.001$ , \*\* $p < 0.01$ , (\* $p < 0.1$ ).  $N = 15$  in der Schlafgruppe und  $N = 16$  in der Wachgruppe.

## Vorhersagestärke-Index

Hohe Fehlerraten, bzw. lange Antwortzeiten für Deviants und geringe Fehlerraten, bzw. kurze Antwortzeiten für Folge-Standards lassen auf eine erfolgreiche Vorhersage der Stimuli trotz vorheriger Störung der Sequenz durch einen Deviant schließen. Aus der Differenz der Fehlerraten, bzw. Antwortzeiten für Deviants und Folge-Standards wurde daher ein Vorhersagestärke-Index definiert (Deviants minus Folge-Standards).

Die Analyse des Vorhersagestärke-Index aus den Fehlerraten mit der Subgruppe als Zwischensubjektfaktor und dem Abrufzeitpunkt als Innersubjektfaktor ließ einen Interaktionseffekt zwischen Abrufzeitpunkt und Subgruppe erkennen ( $F_{(2,58)} = 4.06, p = 0.022$ ). Die Analyse die sich auf den Prä- und Post-Retentionstest beschränkte, brachte dabei einen vergleichbaren Interaktionseffekt hervor ( $F_{(1,29)} = 6.08, p = 0.020$ ).

Post-hoc-Analysen detektierten im Prä-Retentionstest und Abschlusstest keine signifikante Differenz zwischen Schlaf- und Wachgruppe ( $t_{(29)} < 0.56, p > 0.577$ ). Der Vorhersagestärke-Index unterschied sich außerdem im Prä-Retentionstest und Abschlusstest in keiner der beiden Subgruppen signifikant von 0, allerdings zeigte die Wachgruppe im Prä-Retentionstest und die Schlafgruppe im Abschlusstest einen derartigen Trend (Prä-Retentionstest, Schlaf:  $t_{(14)} = 1.45, p = 0.169$ ; Wach:  $t_{(15)} = 2.00, p = 0.064$  und Abschlusstest, Schlaf:  $t_{(14)} = 1.78, p = 0.097$ ; Wach:  $t_{(15)} = 1.27, p = 0.225$ ). Im Post-Retentionstest hingegen war der Vorhersagestärke-Index unter Schlafbedingungen signifikant größer als unter Wachbedingungen ( $t_{(29)} = 3.27, p = 0.003$ ) und in der Schlafgruppe außerdem signifikant größer als 0 (Schlaf:  $t_{(14)} = 3.69, p = 0.002$ ; Wach:  $t_{(15)} = 0.45, p = 0.657$ ). Es zeigten sich Trends für eine Zunahme des Vorhersagestärke-Index in der Schlafgruppe vom Prä- zum Post-Retentionstest ( $t_{(14)} = 1.82, p = 0.091$ ) und für eine Abnahme vom Post-Retentionstest zum Abschlusstest ( $t_{(14)} = 1.88, p = 0.082$ ).

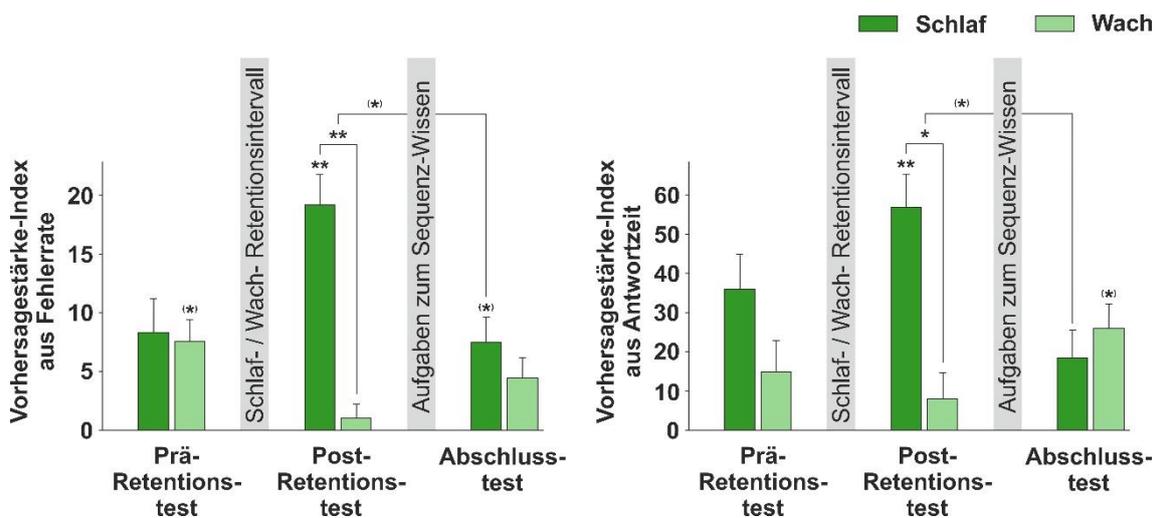
Der Vorhersagestärke-Index aus den Antwortzeiten erbrachte vergleichbare Ergebnisse. In der Varianzanalyse zeigte sich zwar nur unter Einbeziehung aller drei Abruftests ein Trend für eine Interaktion zwischen Abrufzeitpunkt und

Subgruppe ( $F_{(2,58)} = 3.06, p = 0.055$ ), jedoch unterschied er sich in Post-hoc-Tests lediglich im Post-Retentionstest signifikant zwischen Schlaf- und Wachgruppe (Prä-Retentionstest:  $t_{(29)} = 0.88, p = .385$ ; Post-Retentionstest:  $t_{(29)} = 2.30, p = 0.029$ ; Abschlusstest:  $t_{(29)} = 0.40, p = 0.693$ ).

Auch im Einstichproben- $t$ -Tests ergab sich im Post-Retentionstest nur für die Schlafgruppe ein Vorhersagestärke-Index größer 0 (Schlaf:  $t_{(14)} = 3.41, p = 0.004$ ; Wach:  $t_{(15)} = 0.95, p = 0.358$ ).

In der Schlafgruppe war der Vorhersagestärke-Index aus Antwortzeiten im Abschlusstest verglichen zum Post-Retentionstest signifikant abgefallen ( $t_{(14)} = 2.32, p = 0.036$ ).

Abbildung 9 zeigt die Vorhersagestärke-Indices der Schlaf- und Wachgruppen aus Fehlerrate und Antwortzeit für alle drei Abrufzeitpunkte.



**Abbildung 9: Die Vorhersagestärke-Indices sind im Post-Retentionstest nach Schlaf signifikant erhöht.** Im Post-Retentionstest unterschieden sich nur die Vorhersagestärke-Indices der Schlafgruppe signifikant von 0. Sie waren außerdem signifikant größer als die Vorhersagestärke-Indices der Wachgruppe. Im Abschlusstest hatten die Vorhersagestärke-Indices der Schlafgruppe verglichen zum Post-Retentionstest wieder signifikant abgenommen. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , (\*) $p < 0.1$ .  $N = 15$  in der Schlafgruppe und  $N = 16$  in der Wachgruppe.

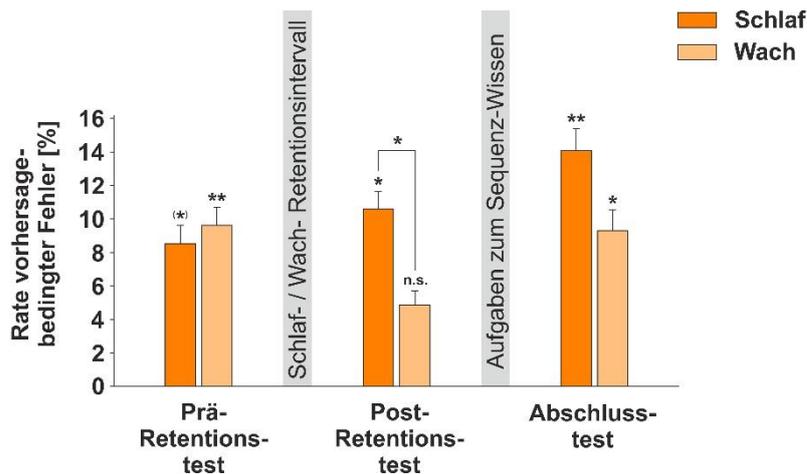
## Vorhersagebedingte Fehler

Im Falle einer erfolgreichen Konsolidierung der Stimulusabfolge sollten die Probanden bei Deviants-Fehlern mit demjenigen Standard-Stimulus antworten, der anstelle des Deviants entsprechend der Sequenz aufgetreten wäre. Ein Deviants-Fehler der diesem Trend folgt, wird als vorhersagebedingter Fehler bezeichnet.

Eine wie oben beschriebene Varianzanalyse der Anzahl der vorhersagebedingten Fehler über alle drei Abruftests offenbarte Trends für eine Interaktion zwischen Abrufzeitpunkt und Subgruppe ( $F_{(2,58)} = 2.42, p = 0.098$ ) und für einen Abrufzeitpunkt-Haupteffekt ( $F_{(2,58)} = 2.88, p = 0.064$ ). In der zweiten Varianzanalyse, die nur den Prä- und Post-Retentionstest betrachtete, war die „Abrufzeitpunkt x Subgruppe“-Interaktion signifikant ( $F_{(1,29)} = 4.54, p = 0.042$ ).

In weiterführenden  $t$ -Tests fanden sich vor dem Retentionsintervall und im Abschlusstest keine signifikanten Unterschiede zwischen den Subgruppen ( $t_{(29)} < 1.32, p > 0.199$ ). Direkt nach dem Retentionsintervall, im Post-Retentionstest, war die Rate vorhersagebedingter Fehler für die Schlafgruppe signifikant höher als für die Wachgruppe ( $t_{(29)} = 2.13, p = 0.042$ ).

Mittels der in 2.6 beschriebenen Berechnung, wurden Zufallslevel für vorhersagebedingte Fehler bestimmt und mit der tatsächlichen Rate verglichen. Bereits im Prä-Retentionstest zeigte sich in der Schlafgruppe ein Trend und in der Wachgruppe eine Signifikanz für eine Rate vorhersagebedingter Fehler oberhalb des Zufallslevels (Schlaf:  $t_{(14)} = 1.96, p = 0.071$ ; Wach:  $t_{(15)} = 3.14, p = 0.007$ ). Über das Schlaf-Retentionsintervall wurde dieser Trend signifikant ( $t_{(14)} = 2.40, p = 0.031$ ). Nach Wachbedingungen verlor er sich ( $t_{(15)} = 0.35, p = 0.731$ ). Nun war die Rate vorhersagebedingter Fehler der Schlafgruppe signifikant größer als die der Wachgruppe (Post-Retentionstest:  $t_{(29)} = 2.15, p = 0.040$ ). Im Abschlusstest schließlich lag die Rate beider Subgruppen wieder signifikant oberhalb des Zufallslevels (Schlaf:  $t_{(14)} = 3.27, p = 0.006$ ; Wach:  $t_{(15)} = 2.25, p = 0.040$ ). Diese Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt, welche die Rate vorhersagebedingter Fehler der Schlaf- und Wachgruppe in allen drei Abruftests abbildet.



**Abbildung 10: Die Rate vorhersagebedingter Fehler liegt im Post-Retentionstest nur nach Schlaf signifikant oberhalb des Zufallslevels.** Die Schlafgruppe wies in allen drei Abrufttests Raten vorhersagebedingter Fehler oberhalb des Zufallslevels auf. Die Rate vorhersagebedingter Fehler der Wachgruppe lag nur in Prä-Retentionstest und Abschlusstest, nicht aber im Post-Retentionstest, signifikant oberhalb des Zufallslevels. Entsprechend war die Rate vorhersagebedingter Fehler der Schlafgruppe im Post-Retentionstest signifikant höher als die der Wachgruppe. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , (\*) $p < 0.1$ , n.s. nicht signifikant.  $N=15$  in der Schlafgruppe und  $N=16$  in der Wachgruppe.

Die Auswertung der SS-Gruppe zeigt deutlich, dass Schlaf einen positiven Einfluss auf das implizite Sequenz-Lernen und die darauf basierende Stimulus-Vorhersage hat. Eindeutig waren die Schlafeffekte dabei im Post-Retentionstest direkt nach dem Retentionsintervall. Im Abschlusstest, in dem die Probanden bereits von dem Vorhandensein der Sequenz wussten, waren die Schlafeffekte nur noch in geringem Maße im Hinblick auf die Fehlerraten erkennbar.

### 3.1.2.2 SL-Gruppe

Die Bedingungen der SS- und SL-Gruppe unterschieden sich ausschließlich im Post-Retentionstest. Dieser fand in der SL-Gruppe in einem verlängerten temporalen Kontext mit langen RSIs statt ( $2000 \pm 500$  ms, statt  $200 \pm 50$  ms). Die Analyse des Abschlusstests war in der SL-Gruppe aus diesem Grund von besonderem Interesse. Die zeitlichen Bedingungen entsprachen darin wieder dem ursprünglichen, gelernten Kontext.

## Fehlerraten

Es wurden dieselben Zwischen- und Innersubjektfaktoren wie in den ANOVAS der SS-Gruppe eingesetzt. Die Varianzanalyse der Fehlerraten deckte einen signifikanten Haupteffekt für den Stimulustyp auf ( $F_{(2,54)} = 13.19, p < 0.001$ ). Zusätzlich ergab sich eine signifikante „Abrufzeitpunkt x Stimulustyp“- ( $F_{(4,108)} = 3.34, p = 0.013$ ) und „Abrufzeitpunkt x Subgruppe“-Interaktion ( $F_{(2,54)} = 5.86, p = 0.005$ ). Die auf den Prä- und Post-Retentionstest beschränkte Betrachtung in der zweiten Varianzanalyse brachte dieselben Effekte hervor (Standards/Deviant/Folge-Standards,  $F_{(2,54)} = 7.39, p = 0.001$ ; Abrufzeitpunkt x Stimulustyp,  $F_{(2,54)} = 3.63, p = 0.033$ ; Subgruppe x Abrufzeitpunkt,  $F_{(1,27)} = 6.94, p = 0.014$ ).

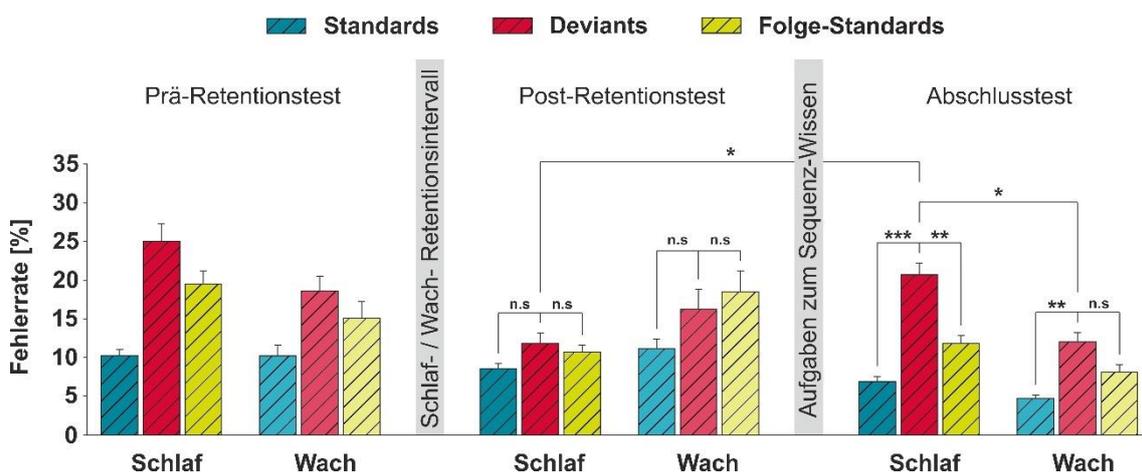
Die separate Analyse des Prä-Retentionstests zeigte signifikant unterschiedliche Fehlerraten für die drei Stimulustypen (Standards/Deviant/Folge-Standards,  $F_{(2,54)} = 8.89, p < 0.001$ ). Die Fehlerrate war für Deviant am höchsten und für Standards am geringsten. Eine „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion wurde nicht nachgewiesen, was aufgrund identischer Bedingungen vor dem Retentionsintervall zu erwarten war ( $F_{(2,54)} = 0.70, p = 0.501$ ). Die Ergebnisse des Prä-Retentionstests decken sich entsprechend mit der SS-Gruppe.

Die Analyse des Post-Retentionstests unter langen RSIs ergab lediglich einen Trend für unterschiedliche Fehlerraten der drei Stimulustypen (Standards/Deviant/Folge-Standards,  $F_{(2,54)} = 3.13, p = 0.052$ ). Es zeigte sich auch keine Interaktion zwischen Stimulustyp und Subgruppe ( $F_{(2,54)} = 0.80, p = 0.454$ ). In Post-hoc-Tests bestand zwischen Deviant und Standards und Deviant und Folge-Standards in keiner Subgruppe ein signifikanter Unterschied (alle  $p > 0.144$ ).

Im Abschlusstest unter der Präsentation der Stimuli mit kurzen RSIs, konnte schließlich wieder ein signifikanter Stimulustyp-Haupteffekt nachgewiesen werden ( $F_{(2,54)} = 19.29, p < 0.001$ ). Schlaf- und Wachprobanden machten signifikant mehr Fehler bei Deviant und Folge-Standards als bei Standards (alle  $p < 0.050$ ). Es zeigte sich außerdem ein Subgruppen-Haupteffekt ( $F_{(1,27)} = 4.38, p = 0.046$ ). Die Wachprobanden wiesen für alle drei Stimulustypen geringere

Fehlerraten auf, als die Schlafgruppe. In Post-hoc-Tests war dies allerdings nur für die Deviants-Fehlerrate signifikant ( $t_{(27)} = 2.13, p = 0.043$ ). Eine signifikante „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktion konnte zwar nicht gezeigt werden ( $F_{(2,54)} = 1.94, p = 0.153$ ), aber Hypothesen-getriebene Post-hoc-Tests offenbarten dennoch, dass die Fehlerrate für Folge-Standards verglichen mit Deviants nur bei Schlafprobanden signifikant geringer war (Schlaf:  $t_{(15)} = 3.26, p = 0.005$ ; Wach:  $t_{(12)} = 1.27, p = 0.230$ ).

Eine Gegenüberstellung der Deviants-Fehlerrate des Post-Retentionstests mit dem Abschlusstests ergab außerdem, dass diese nur in der Schlafgruppe signifikant angestiegen war (Schlaf:  $t_{(15)} = 2.71, p = 0.016$ ; Wach:  $t_{(12)} = 0.92, p = 0.376$ ). Der Abbildung 11 können diese Ergebnisse entnommen werden.



**Abbildung 11: Unter langen RSIs keine Unterschiede in der Fehlerrate für die drei Stimulustypen, aber Schlafeffekte im ursprünglichen zeitlichen Kontext im Abschlusstest.** Unterschiedliche Fehlerraten für die verschiedenen Stimulustypen im Prä-Retentionstest zeigten analog zur SS-Gruppe, die erfolgreiche Enkodierung der Sequenz während des Trainings. Im Post-Retentionstest war diese nicht mehr erkennbar. Unter kurzen RSIs im Abschlusstest wiesen unterschiedliche Fehlerraten für die drei Stimulustypen auf eine erfolgreiche Konsolidierung der Sequenz hin. Außerdem zeigte die Schlafgruppe im Gegensatz zur Wachgruppe eine Abnahme der Fehlerrate für Folge-Standards relativ zu Deviants. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\*\* $p < 0.001$ , \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , n.s. nicht signifikant. N=16 in der Schlafgruppe und N=13 in der Wachgruppe.

Der signifikante Stimulustyp-Haupteffekt im Prä-Retentionstest weist eine erfolgreiche Enkodierung der Sequenz durch die Probanden nach, die im Post-Retentionstest unter langen RSIs nicht mehr ersichtlich war. Auch konnten in diesem verlängerten zeitlichen Kontext keine Schlafeffekte gefunden werden. Im

Abschlusstest ließen die erhöhte Deviants-Fehlerrate und die signifikante Abnahme der Fehlerrate für Folge-Standards nach Schlafbedingungen wieder erfolgreiches Sequenz-Lernen erkennen und wiesen außerdem auf einen positiven Schlafeffekt hin.

### **Antwortzeiten**

Die Varianzanalyse der Antwortzeiten erbrachte ähnliche Ergebnisse wie zuvor die Fehlerrate. Neben dem signifikanten Haupteffekt für den Stimulustyp ( $F_{(2,54)} = 28.77, p < 0.001$ ) zeigte sich wieder eine Interaktion von Abrufzeitpunkt und Stimulustyp ( $F_{(4,108)} = 11.75, p < 0.001$ ). Außerdem ergab sich ein Abrufzeitpunkt-Haupteffekt ( $F_{(2,54)} = 13.38, p < 0.001$ ). Die Ergebnisse der zweiten Varianzanalyse mit ausschließlich Prä- und Post-Retentionstest als Abrufzeitpunkte waren erneut vergleichbar (Standards/Deviants/Folge-Standards,  $F_{(2,54)} = 17.31, p < 0.001$ ; Abrufzeitpunkt x Stimulustyp,  $F_{(2,54)} = 20.21, p < 0.001$ ; Prä-/Post-Retentionstest,  $F_{(1,27)} = 10.87, p = 0.003$ ). Zusätzlich wurde dabei jedoch ein Trend für eine „Abrufzeitpunkt x Subgruppe“-Interaktion gefunden ( $F_{(1,27)} = 3.18, p = 0.086$ ).

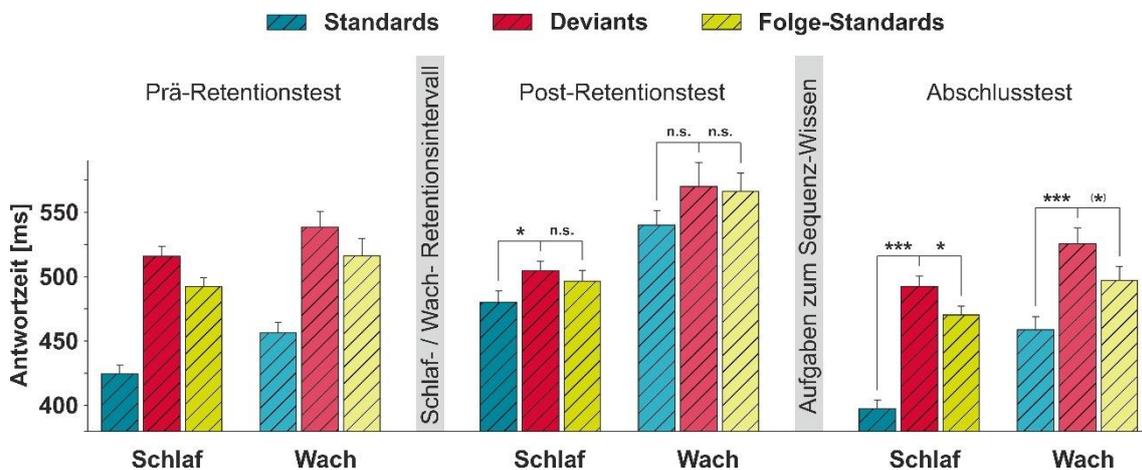
Getrennte Analysen ergaben zwar für alle drei Abruftests Stimulustyp-Haupteffekte, jedoch war die Signifikanz und Effektstärke im Post-Retentionstest am geringsten ausgeprägt (Prä-Retentionstest:  $F_{(2,54)} = 29.61, \eta^2_p = 0.52, p < 0.001$ ; Post-Retentionstest:  $F_{(2,54)} = 3.63, \eta^2_p = 0.12, p = 0.033$ ; Abschlusstest  $F_{(2,54)} = 41.78, \eta^2_p = 0.61, p < 0.001$ ). Signifikante „Stimulustyp x Subgruppe“-Interaktionen konnten für keinen Abruftest aufgedeckt werden ( $F_{(2,54)} < 2.14, p > 0.128$ ).

In  $t$ -Tests erbrachten Deviants im Prä-Retentionstest und Abschlusstest in beiden Subgruppen signifikant längere Antwortzeiten als Standards (alle  $p < 0.001$ ), im Post-Retentionstest hingegen nur in der Schlafgruppe (Schlaf:  $t_{(15)} = 2.66, p = 0.018$ ; Wach:  $t_{(12)} = 1.35, p = 0.202$ ). Die Antwortzeiten für Folge-Standards und Deviants waren in weiteren  $t$ -Tests des Post-Retentionstest in beiden Subgruppen nicht signifikant verschieden (beide  $p > 0.258$ ). Im Abschlusstest fanden sich jedoch kürzere Antwortzeiten für Folge-Standards als für Deviants.

Dies stellte sich in der Schlafgruppe signifikant, in der Wachgruppe nur als Trend dar (Schlaf:  $t_{(15)} = 2.23$ ,  $p = 0.041$ ; Wach:  $t_{(12)} = 1.84$ ,  $p = 0.091$ ). Die Schlafgruppe hatte jedoch bereits im Prä-Retentionstest einen Trend für geringere Antwortzeiten für Folge-Standards als für Deviants gezeigt ( $t_{(15)} = 1.91$ ,  $p = 0.076$ ).

Im Post-Retentionstest fand sich ein signifikanter Subgruppen-Haupteffekt ( $F_{(1,27)} = 4.80$ ,  $p = 0.037$ ). Die Wachgruppe zeigte auch in nachfolgenden  $t$ -Tests längere Antwortzeiten als die Schlafgruppe für Standards, Deviants und Folge-Standards ( $p < 0.045$ ). Dieser Subgruppen-Unterschied war als Trend auch noch im Abschlusstest zu sehen ( $F_{(1,27)} = 3.03$ ,  $p = 0.093$ ). Dort hatte sich auch für die Fehlerraten ein Subgruppen-Haupteffekt, allerdings zugunsten der Wachgruppe, gezeigt. Das legt eine verbesserte Fehlerrate zu Lasten der Antwortzeiten im Abschlusstest nahe.

Abbildung 12 zeigt entsprechend die Ergebnisse der Antwortzeiten beider Subgruppen über die drei Abrufttests hinweg.



**Abbildung 12: Antwortzeiten unter langen RSIs kaum unterschiedlich für die drei Stimulustypen.** Die Enkodierung der Sequenz zeigte sich unter kurzen RSIs im Prä-Retentionstest und die erfolgreiche Konsolidierung im Abschlusstest mit verlängerten Antwortzeiten für Deviants und Folge-Standards. Unter langen RSIs im Post-Retentionstest verlor sich dieser Stimulustyp-Effekt. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\*\* $p < 0.001$ , \* $p < 0.05$ , (\*) $p < 0.1$ , n.s. nicht signifikant. N=16 in der Schlafgruppe und N=13 in der Wachgruppe.

Auch mittels der Antwortzeiten ließ sich unter langen RSIs keine erfolgreiche Konsolidierung der Sequenz nachweisen. Obwohl sich diese im Abschlusstest wieder deutlich zeigte, ließen die Antwortzeiten im Gegensatz zu den Fehlerraten dabei keine Schlafeffekte erkennen.

### **Vorhersagestärke-Index**

Varianzanalysen der Vorhersagestärke-Indices aus Fehlerrate und Antwortzeit erbrachten keinen Interaktionseffekt zwischen Abrufzeitpunkt und Subgruppe, unabhängig davon ob alle drei Abrufstests ( $F_{(2,54)} = 0.17, p > 0.841$ ) oder nur der Prä- und Post-Retentionstest als Abrufzeitpunkte eingeschlossen wurden ( $F_{(1,27)} < 0.10, p > 0.760$ ).

Für den Vorhersagestärke-Index aus den Fehlerraten wurde unter Einbezug aller drei Abrufstests ein Abrufzeitpunkt-Haupteffekt gefunden ( $F_{(2,54)} = 3.20, p = 0.049$ ). Für den Vorhersagestärke-Index aus den Antwortzeiten fand sich ein solcher Trend in der auf Prä- und Post-Retentionstest limitierten Varianzanalyse ( $F_{(1,27)} = 3.60, p = 0.069$ ).

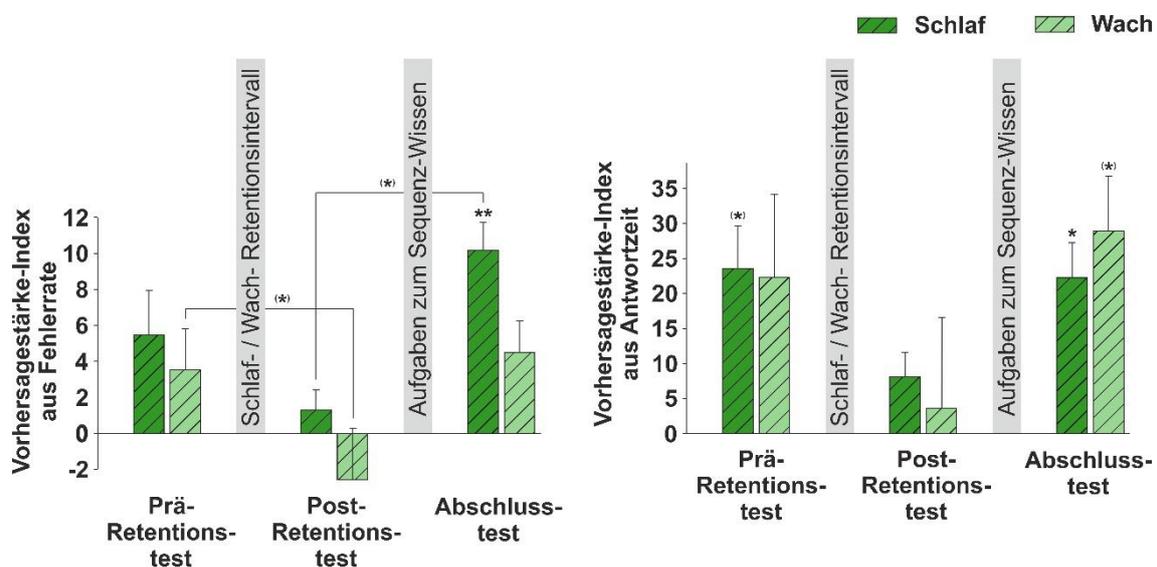
Post-hoc-Analysen zeigten in keinem der drei Tests signifikante Unterschiede der Vorhersagestärke-Indices zwischen den Subgruppen (alle  $p > 0.239$ ). Im Prä- und Post-Retentionstest unterschied sich der Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten unter Schlaf- und Wachbedingungen nicht signifikant gegenüber 0 (alle  $p > 0.289$ ). Das war auch für den Vorhersagestärke-Index aus Antwortzeiten im Prä-Retentionstest der Wachgruppe und im Post-Retentionstest beider Subgruppen der Fall (alle  $p > 0.258$ ). Im Prä-Retentionstest der Schlafgruppe zeigte er sich zumindest in einem Trend größer als 0 ( $t_{(15)} = 1.91, p = 0.067$ ). Im Abschlusstest schließlich waren beide Vorhersagestärke-Indices der Schlafprobanden signifikant größer als 0 (aus Fehlerraten:  $t_{(15)} = 3.26, p = 0.005$ ; aus Antwortzeiten:  $t_{(15)} = 2.23, p = 0.041$ ). In der Wachgruppe zeigte lediglich der Vorhersagestärke-Index aus Antwortzeiten einen derartigen Trend (aus Fehlerraten:  $t_{(12)} = 1.27, p = 0.230$ ; aus Antwortzeiten:  $t_{(12)} = 1.84, p = 0.091$ ).

Es fand sich bei Schlafprobanden auch ein Trend für einen höheren Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten im Abschlusstest als im Post-

Retentionstest ( $t_{(15)} = 2.10$ ,  $p = 0.053$ ) und in der Wachgruppe für einen geringeren Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten im Post- verglichen mit dem Prä-Retentionstest ( $t_{(12)} = 1.85$ ,  $p = 0.089$ ).

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse dieser Analysen präsentiert.

Der Schlafeffekt, der sich in den Fehlerraten des Abschlusstests bereits gezeigt hatte, fand sich also auch in dem daraus berechneten Vorhersagestärke-Index wieder.



**Abbildung 13: Keine Subgruppen-Unterschiede in allen drei Abruftests, aber Vorhersagestärke-Index aus Fehlerrate im Abschlusstest nur unter Schlafbedingungen größer 0.** Im Prä- und Post-Retentionstests unterschieden sich die Vorhersagestärke-Indices nicht signifikant von 0. Der Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten der Schlafprobanden zeigte im Gegensatz zur Wachgruppe zwischen Post-Retentionstest und Abschlusstest einen Trend für eine Zunahme und war im Abschlusstest signifikant erhöht. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , (\* $p < 0.1$ ).  $N = 16$  in der Schlafgruppe und  $N = 13$  in der Wachgruppe.

### Rate vorhersagebedingter Fehler

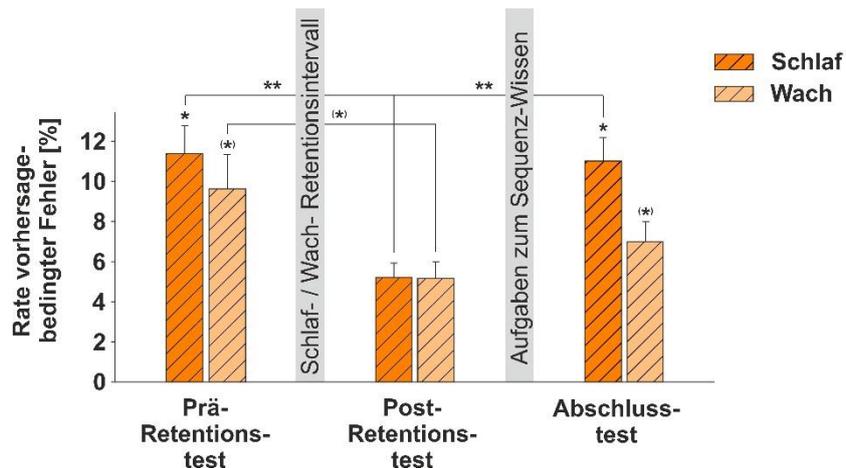
Beide Varianzanalysen der vorhersagebedingten Fehler ergaben einen signifikanten Abrufzeitpunkt-Haupteffekt (Prä-/Post-Retentionstest/Abschlusstest,  $F_{(2,54)} = 7.34$ ,  $p = 0.002$ ; Prä- /Post-Retentionstest,  $F_{(1,27)} = 14.17$ ,  $p < 0.001$ ), jedoch keine signifikante Interaktion des Abrufzeitpunkts mit der Subgruppe (Prä-/Post-Retentionstest/Abschlusstest x Subgruppe,  $F_{(2,54)} = 0.98$ ,  $p = 0.382$ ; Prä-/Post-Retentionstest x Subgruppe,  $F_{(1,27)} = 0.40$ ,  $p = 0.535$ ). Wie

zuvor die Vorhersagestärke-Indices, zeigte auch die Rate vorhersagebedingter Fehler zu keinem Abrufzeitpunkt signifikante Differenzen zwischen Schlaf- und Wachbedingung (alle  $p > 0.218$ ).

Unter langen RSIs im Post-Retentionstest war die Rate vorhersagebedingter Fehler der Schlafgruppe signifikant niedriger als unter kurzen RSIs im Abschlusstest ( $t_{(15)} = 3.34$ ,  $p = 0.004$ ) und im Prä-Retentionstest ( $t_{(15)} = 3.83$ ,  $p = 0.002$ ). In der Wachgruppe zeigte sich beim Vergleich der Rate vorhersagebedingter Fehler zwischen langen und kurzen RSIs lediglich ein Trend für eine Differenz zwischen Prä- und Post-Retentionstest ( $t_{(12)} = 1.83$ ,  $p = 0.092$ ), nicht aber zwischen Post-Retentionstest und Abschlusstest ( $t_{(12)} = 0.94$ ,  $p = 0.365$ ). Zwischen Prä-Retentionstest und Abschlusstest (beide mit kurzen RSIs) fand sich in keiner Subgruppe eine signifikante Differenz (Schlaf:  $t_{(15)} = 0.21$ ,  $p = 0.834$ ; Wach:  $t_{(12)} = 0.95$ ,  $p = 0.361$ ).

Vergleiche der Zufallsrate mit der tatsächlichen Rate vorhersagebedingter Fehler ergaben im Post-Retentionstest in keiner Subgruppe signifikante Unterschiede (alle  $p > 0.289$ ). Im Prä-Retentionstest und im Abschlusstest lag die Rate vorhersagebedingter Fehler von Schlafprobanden signifikant oberhalb des Zufallslevels (beide  $p > 0.011$ ), die von Wachprobanden zeigte hierfür jeweils einen Trend ( $0.05 < \text{beide } p < 0.076$ ).

Abbildung 14 zeigt die Rate vorhersagebedingter Fehler beider Subgruppen während der drei Abrufttests.



**Abbildung 14: Die Rate vorhersagebedingter Fehler sinkt unter langen RSIs auf Zufallslevel.** Die Rate vorhersagebedingter Fehler lag im Post-Retentionstest im Gegensatz zum Prä-Retentionstest und Abschlusstest mit kurzen RSIs nicht oberhalb des Zufallslevels. Schlafprobanden zeigten im Post-Retentionstest eine signifikant geringere Rate vorhersagebedingter Fehler als zu den beiden anderen Abrufzeitpunkten. Bei Wachprobanden fand sich lediglich ein Trend für einen Rückgang vom Prä- zum Post-Retentionstest. Signifikante Subgruppen-Unterschiede bestanden in keinem der drei Abruftests. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , (\*) $p < 0.1$ .  $N = 16$  in der Schlafgruppe und  $N = 13$  in der Wachgruppe.

Die Ergebnisse der Rate vorhersagebedingter Fehler bestärken also die vorherige Erkenntnis, dass die Probanden die Sequenz zwar erfolgreich konsolidierten, deren Leistung unter langen RSIs jedoch kein Sequenz-Lernen erkennen lässt. Dennoch fanden sich auch in der SL-Gruppe im Abschlusstest Hinweise auf einen positiven Schlafeffekt (Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten nur bei Schlafprobanden signifikant größer als 0).

### 3.1.2.3 SS- und SL-Gruppe im Vergleich

Um den Einfluss der langen RSIs auf das allgemeine Antwortverhalten der Probanden unabhängig von Störungen der Sequenz durch Deviants zu untersuchen, wurden in einer großen Varianzanalyse aller Probanden nur die Fehlerraten und Antwortzeiten für Standards eingeschlossen. Als Zwischensubjektfaktor wurde die Gruppe (SS/SL) und als Innersubjektfaktor der Abrufzeitpunkt angegeben. Dabei ergab sich ein signifikanter Abrufzeitpunkt-Haupteffekt (Fehlerraten:  $F_{(2,116)} = 5.51$ ,  $p = 0.005$ ; Antwortzeiten:  $F_{(2,116)} = 56.13$ ,  $p < 0.001$ ) und eine signifikante „Abrufzeitpunkt x Gruppe“-Interaktion (Fehlerraten:  $F_{(2,116)} = 4.26$ ,  $p = 0.016$ ; Antwortzeiten:  $F_{(2,116)} = 35.12$ ,  $p < 0.001$ ).

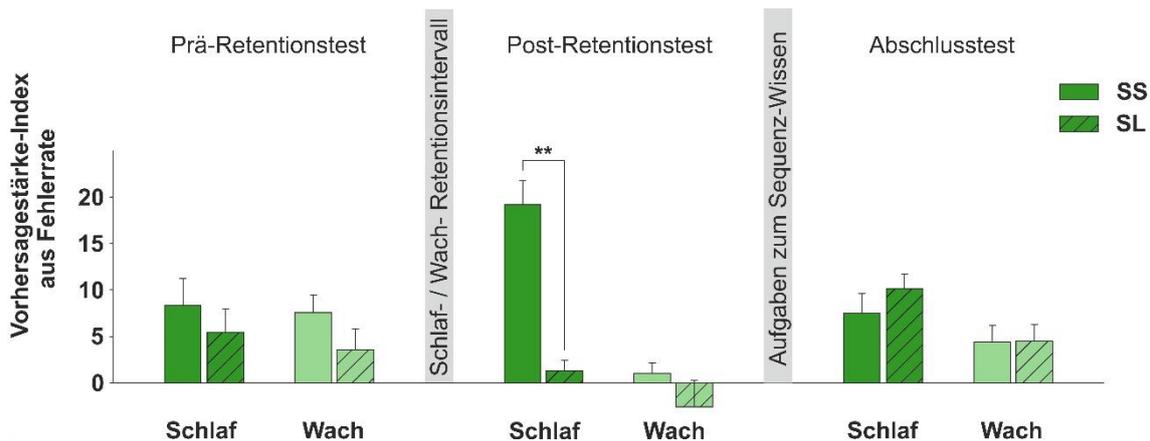
In nachfolgenden  $t$ -Tests waren die Antwortzeiten für Standards unter langen RSIs sowohl bei Schlaf-, als auch Wachprobanden signifikant länger als unter kurzen RSIs (beide  $p < 0.013$ ). Für die Fehlerraten ergab sich kein signifikanter Unterschied (beide  $p > 0.121$ ). Ein verlängertes RSI führte also zu verlängerten Antwortzeiten auf Standard-Stimuli.

Um die Auswirkungen des verlängerten zeitlichen Kontexts auf die korrekte Stimulus-Vorhersage zu testen, wurden Varianzanalysen zu den Vorhersagestärke-Indices und vorhersagebedingten Fehlern durchgeführt mit dem Zwischensubjektfaktor Gruppe und Innersubjektfaktor Abrufzeitpunkt (Prä - /Post-Retentionstest/Abschlusstest). Die Schlafprobanden zeigten für alle drei Parameter signifikante „Abrufzeitpunkt x Gruppe“-Interaktionen ( $F_{(2,58)} > 3.86$ ,  $p < 0.027$ ), die Wachgruppen hingegen nicht ( $F_{(2,54)} < 0.37$ ,  $p > 0.690$ ).

Im Prä-Retentionstest und im Abschlusstest waren die Versuchsbedingungen der SS- und SL-Gruppe identisch. Entsprechend erwartungsgemäß fanden Post-hoc-Analysen dieser beiden Abruftests weder für die Schlaf- noch Wachgruppen hinsichtlich der Vorhersagestärke-Indices und der Rate vorhersagebedingter Fehler signifikante Gruppen-Unterschiede (alle  $p > 0.394$ ).

Im Post-Retentionstest waren unter Schlafbedingungen alle drei Parameter in der SL-Gruppe signifikant niedriger als in der SS-Gruppe ( $t_{(29)} > 2.19$ ,  $p < 0.010$ ). Dieselben  $t$ -Tests erbrachten für die Wachbedingung keine signifikanten Unterschiede zwischen SS- und SL-Gruppe ( $t_{(27)} < 0.63$ ,  $p > 0.533$ ).

In Abbildung 15 ist der Zusammenhang zwischen langen, bzw. kurzen RSIs (SS- /SL-Gruppe) und der Stimulus-Vorhersage am Beispiel des Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten über alle drei Abrufzeitpunkte für jede der vier Subgruppen dargestellt.



**Abbildung 15: Verringerte Vorhersagestärke unter langen RSIs.** Der Vorhersagestärke-Index aus Fehlerraten zeigte unter kurzen RSIs keine Gruppen-Unterschiede. Unter Schlafbedingungen senkten die langen RSIs der SL-Gruppe den Vorhersagestärke-Index signifikant unter den der SS-Gruppe mit kurzen RSIs. Bei den Wachprobanden wurden Gruppen-Unterschiede aufgrund der bereits geringen Vorhersagestärke nicht signifikant. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler.  $**p < 0.01$ . N=15 in der SS-Schlafgruppe, N=16 in der SS-Wachgruppe, N=16 in der SL-Schlafgruppe und N=13 in der SL-Wachgruppe.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorhersagestärke unter langen RSIs signifikant geringer ist. Da eine hohe Vorhersagestärke schlafabhängig war, zeigte sich dieser Zusammenhang nur in den Schlafgruppen. Die Vorhersagestärke der Wachprobanden war bereits so gering, dass der Wechsel des zeitlichen Kontexts keine signifikanten Gruppen-Unterschiede hervorrief.

### 3.2 Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz

Auf Grundlage der Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz wurden vier Probanden aus den nachfolgenden Analysen ausgeschlossen (siehe 2.1 Versuchspersonen). Alle übrigen in die Analysen eingeschlossenen Probanden wiesen eine geringe Wahrscheinlichkeit für explizites Wissen auf.

#### 3.2.1 Freie Reproduktion

Im Anschluss an den Post-Retentionstest wurden die Probanden mit zunehmender Spezifität bezüglich einer Regelmäßigkeit während des Experiments befragt. 34 Probanden gaben an, eine Regelmäßigkeit bemerkt zu haben. Mit 82% war der überwiegenden Mehrheit diese Regelmäßigkeit erstmals

im Training aufgefallen. Dabei schilderten die meisten diese Wahrnehmung als intuitiv. Außerdem berichteten sie darüber, in den darauffolgenden Abrufttests keine Regelmäßigkeit mehr wahrgenommen zu haben. Als ursächlich hierfür wird die Einführung der Deviants in die Sequenz angenommen.

Im Anschluss an diese Befragung fand eine freie Reproduktion der Sequenz mit schriftlicher Protokollierung statt (Freie Reproduktion 1 schriftlich). Keiner der Probanden wies dabei vollständiges Wissen über die Sequenz auf. Die freie Reproduktion wurde nach anschließender Aufklärung über das Vorhandensein der Sequenz (Freie Reproduktion 2) sowie ein weiteres Mal nach dem Abschlusstest (Freie Reproduktion 3) am Computer mit zweimaliger Eingabe von 12 Stimuluspositionen wiederholt. Zur Auswertung wurde die maximale Zahl direkt aufeinanderfolgender korrekt angegebener Stimuluspositionen konservativ, bzw. liberal bestimmt (siehe 2.6 Statistische Auswertung). Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 als prozentualer Anteil an der Anzahl von 12 Stimuli für alle vier Subgruppen mit Angabe  $\pm$  des Standardfehlers aufgeführt.

Mittels  $t$ -Tests für unabhängige Stichproben wurden die Daten auf Subgruppen-Unterschiede (Schlaf/Wach) innerhalb der SS-, bzw. SL-Gruppe untersucht. Die jeweiligen Vergleiche zeigten keine signifikanten Differenzen auf (alle  $p > 0.131$ ). Zwischen der freien Reproduktion 2 und 3 fanden zwei weitere Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz sowie der Abschlusstest statt. Um zu untersuchen, ob hierdurch ein weiterer Wissenszuwachs entstanden war, wurden gepaarte  $t$ -Tests durchgeführt. Die Ergebnisse der konservativen Auswertung aller Probanden waren zwischen freier Reproduktion 2 und 3 nicht signifikant unterschiedlich ( $t_{(59)} = 0.84$ ,  $p = 0.406$ ). In der liberalen Auswertung fand sich jedoch ein Trend für eine gesteigerte Leistung in der freien Reproduktion 3 ( $t_{(59)} = 1.86$ ,  $p = 0.067$ ).

**Tabelle 1: Ergebnisse der freien Reproduktion.** Es ist jeweils der Prozentanteil der Anzahl aufeinanderfolgend korrekt angegebener Stimuluspositionen ab der ersten Stimuluseingabe (konservative Auswertung), bzw. ab jeder beliebigen Stimulusangabe (liberale Auswertung) an allen 12 Stimuluspositionen der Sequenz  $\pm$  Standardfehler angegeben. Es bestanden keine signifikanten Subgruppen- oder Gruppen-Unterschiede, da in  $t$ -Tests alle  $p > 0.131$ . Zwischen der freien Reproduktion 2 und 3 fand sich in der liberalen Auswertung ein Trend für eine Verbesserung der Leistung aller Probanden. <sup>(\*)</sup> $p < 0.1$ . N=15 in der SS-Schlafgruppe, N=16 in der SS-Wachgruppe, N=16 in der SL-Schlafgruppe und N=13 in der SL-Wachgruppe.

		SS-Gruppe		SL-Gruppe	
		Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
<b>Freie Reproduktion 1</b>	Liberal	10 $\pm$ 3.1	4.7 $\pm$ 2.1	8.9 $\pm$ 2.3	8.3 $\pm$ 2.7
<b>Freie Reproduktion 2</b>	Konservativ	17 $\pm$ 1.6	15 $\pm$ 1.5	20 $\pm$ 2.9	21 $\pm$ 3.8
<b>Freie Reproduktion 3</b>	Liberal	28 $\pm$ 2.1	26 $\pm$ 1.4	32 $\pm$ 3.8	29 $\pm$ 3.2
	<sup>(*)</sup> Konservativ	18 $\pm$ 3.6	20 $\pm$ 3.9	23 $\pm$ 3.6	17 $\pm$ 2.5
	Liberal	33 $\pm$ 4.6	32 $\pm$ 3.4	34 $\pm$ 2.7	29 $\pm$ 2.6

### 3.2.2 Triplet-Erkennungsaufgabe und Triplet-Vervollständigungsaufgabe

Die zwei weiteren Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz (Triplet-Erkennungsaufgabe und Triplet-Vervollständigungsaufgabe) wurden in der SS-Gruppe mit kurzen RSIs und in der SL-Gruppe mit langen RSIs durchgeführt.

In der Triplet-Erkennungsaufgabe wurden Triplets aus drei Stimuli präsentiert. Die Probanden trafen anschließend eine Entscheidung, ob ihnen die Stimulusabfolge bekannt vorkam oder nicht und gaben bezüglich dieser Entscheidung eine Konfidenzbewertung auf einer Skala von 1-4 ab.

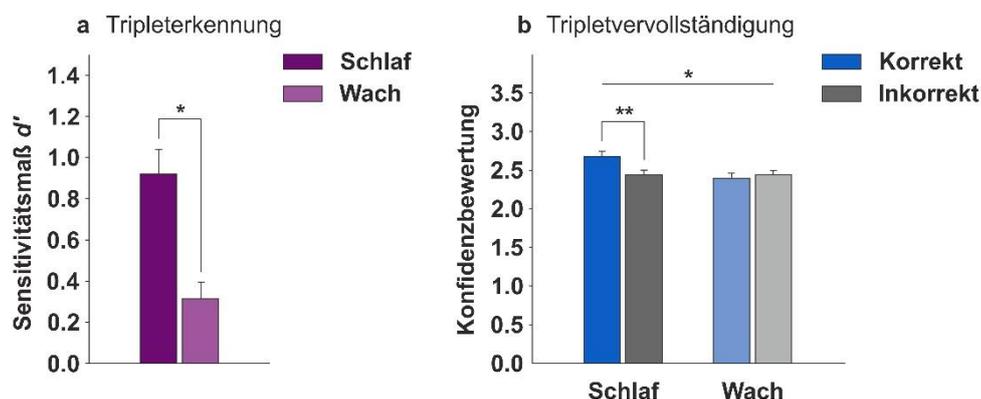
Das Sensitivitätsmaß  $d'$  aus korrekten und inkorrekten Durchgängen mit hoher Konfidenzbewertung von 3 oder 4 (siehe 2.6. Statistische Auswertung) war in der Schlafgruppe der SS-Gruppe signifikant größer als in der Wachgruppe ( $t_{(29)} = 2.09$ ,  $p = 0.045$ ). In der SL-Gruppe fanden sich keine Subgruppen-Differenzen

( $t_{(27)} = 0.486, p = 0.631$ ). Zwischen beiden Gruppen (SS/SL) bestanden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ( $t_{(58)} = 0.20, p = 0.842$ ).

Bei der Triplet-Vervollständigungsaufgabe ergänzten die Probanden anhand ihres Wissens über die Sequenz eine Abfolge zweier Stimuli um einen dritten Stimulus und gaben im Anschluss daran erneut eine Konfidenzbewertung ab.

Eine Varianzanalyse der Konfidenzbewertungen der SS-Gruppe mit dem Zwischensubjektfaktor Subgruppe und Innersubjektfaktor Antwort (korrekt/inkorrekt) erbrachte keinen Haupteffekt für korrekte/inkorrekte Antworten ( $F_{(1,29)} = 2.57, p = 0.120$ ), dafür aber eine Interaktion zwischen Antworten und Subgruppe ( $F_{(1,29)} = 5.41, p = 0.027$ ). Nach Schlafbedingungen wurden für korrekte Antworten höhere Konfidenzbewertungen abgegeben als für inkorrekte Antworten ( $t_{(14)} = 3.12, p = 0.008$ ). In der Wachgruppe war dies nicht der Fall ( $t_{(15)} = 0.47, p = 0.644$ ).

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der SS-Gruppe für die Triplet-Erkennungsaufgabe (Sensitivitätsmaß  $d'$ ) und die Triplet-Vervollständigungsaufgabe (Konfidenzbewertung für korrekte und inkorrekte Antworten) im Subgruppenvergleich.



**Abbildung 16: Höhere Konfidenz für korrekte Antworten bei Schlafprobanden der SS-Gruppe in der Triplet-Vervollständigungs- und Triplet-Erkennungsaufgabe.** (a) In der Triplet-Erkennungsaufgabe zeigten die Schlafprobanden der SS-Gruppe relativ zu Wachprobanden ein größeres Sensitivitätsmaß  $d'$  aus korrekten und inkorrekten Durchgängen für hohe Konfidenzbewertung ( $\geq 3$ ). (b) In der Triplet-Vervollständigungsaufgabe waren die Konfidenzbewertungen bei den Schlafprobanden der SS-Gruppe für korrekte Antworten höher als für inkorrekte Antworten. Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler. \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ . N=15 in der Schlafgruppe, N=16 in der Wachgruppe.

Die Varianzanalyse der SL-Gruppe stellte keine „Antwort x Subgruppen“-Interaktion fest ( $F_{(1,27)} = 0.07, p = 0.801$ ). Es zeigten sich jedoch Haupteffekte für korrekte/inkorrekte Antworten ( $F_{(1,27)} = 12.69, p = 0.001$ ) und die Subgruppe ( $F_{(1,27)} = 7.49, p = 0.011$ ). Post-hoc-Tests bestätigten, dass die Konfidenzbewertung beider Subgruppen für korrekte Antworten höher war, als für inkorrekte Antworten (Schlaf:  $t_{(15)} = 2.76, p = 0.015$ ; Wach:  $t_{(12)} = 2.33, p = 0.038$ ). Die Konfidenzbewertungen der Schlafgruppe waren dabei insgesamt höher als die der Wachgruppe, was den Subgruppen-Haupteffekt erklärt (Korrekte Antworten  $t_{(27)} = 1.88, p = 0.071$ ; Inkorrekte Antworten  $t_{(27)} = 2.02, p = 0.053$ ).

Beide Aufgaben offenbarten in der SS-Gruppe also signifikante Schlafeffekte. Im Gegensatz zur Wachgruppe zeigten Schlafprobanden für korrekte Antworten eine höhere Konfidenz als für inkorrekte Antworten.

### **3.3 Kontrollvariablen**

#### **3.3.1 Schlafparameter: SF-A/R und Actiwatch®**

Zur Erhebung der Schlafparameter der Schlafprobanden wurde als objektives Messinstrument eine Actiwatch® und als subjektives Messinstrument ein Fragebogen (SF-A/R) eingesetzt.

Alle Probanden zeigten ein normales Schlafmuster ohne Auffälligkeiten. In Tabelle 2 sind die erhobenen Daten in Minuten dargestellt (Mittelwert  $\pm$  Standardfehler) und der Korrelationskoeffizient nach Pearson ( $r$ ) sowie die Signifikanz ( $p$ ) der Korrelationen zwischen Actiwatch®-Aufzeichnung und Schlafragebogen angegeben.

Die Korrelation war für die Parameter „Zeit im Bett“, „Schlafperiode“ und „Wachphasen nach dem Einschlafen“ signifikant. Die subjektive und objektive Erhebung der Einschlaf-Latenzzeit zeigte keine signifikante Korrelation. Die Mittelwerte lassen dennoch eine gute Übereinstimmung erkennen.

**Tabelle 2: Schlafparameter.** Angabe der Actiwatch®, bzw. SF-A/R-Daten in Minuten ± Standardfehler. SF-A/R: Schlafragebogen. Korrelation: Korrelationskoeffizient nach Pearson. Actiwatch-Daten: N=19 für Zeit im Bett, N=29 für Schlafperiode, N=24 für Einschlaf-Latenzzeit und Wachphasen nach dem Einschlafen. SF-A/R-Daten: N=31.

	Actiwatch®	SF-A/R	Korrelation
<b>Zeit im Bett</b>	455.5 ± 8.7	445.8 ± 4.8	$r = 0.739$ *** $p < 0.001$
<b>Schlafperiode</b>	422.2 ± 13.9	429.2 ± 5.2	$r = 0.463$ * $p < 0.011$
<b>Einschlaf-Latenzzeit</b>	14.0 ± 2.7	16.6 ± 2.3	$r = 0.155$ $p < 0.471$
<b>Wachphasen nach dem Einschlafen</b>	29.03 ± 3.4	8.1 ± 2.1	$r = .416$ * $p < 0.025$

Die Analyse der Actiwatch®-Daten der Wachgruppen und die ergänzende Auswertung der Fragebögen zu Tagesaktivitäten bestätigte, dass keiner der Wachprobanden während des Retentionsintervalls geschlafen hatte.

### 3.3.2 Eyetracker

Um ein okulomotorisches Lernen der Sequenz zu vermeiden (Albouy et al. 2006), wurden alle Probanden angehalten, während der SRTT nicht direkt auf die Stimuli zu blicken, sondern ein Kreuz in der Mitte des Bildschirms zu fixieren. Um dies zu kontrollieren wurde ein Eyetracker zur Überwachung der Augenbewegungen eingesetzt. Die Resultate der Aufzeichnungen sind in Tabelle 3 für beide Gruppen als Mittelwerte ± Standardfehler dargestellt. Es sind vier Kategorien angegeben, die nach Fixierung auf folgende Regionen definiert sind: 1°, 3° und 5° um das zentrale Kreuz sowie Stimulusposition (Stimulus-Fixation). Es wurde jeweils der prozentuale Anteil an allen über die gesamte SRTT aufgezeichneten Gesamtereignissen für jede Kategorie bestimmt.

**Tabelle 3: Eyetracking-Aufzeichnung während der SRTT.** Es ist jeweils für alle Probanden einer Gruppe der arithmetisch gemittelte prozentuale Anteil einer Fixations-Kategorie an allen aufgezeichneten Gesamtereignissen  $\pm$  Standardfehler angegeben. In der SS- und der SL-Gruppe bestanden jeweils keine signifikanten Subgruppen-Unterschiede (alle  $p > 0.05$ ). N=27 im Training, N=26 im Prä- und Post-Retentionstest, N = 21 im Abschlusstest.

	1° Fixation	3° Fixation	5° Fixation	Stimulus-Fixation
<b>SS-Gruppe</b>	18.61 $\pm$ 1.89	63.87 $\pm$ 3.08	78.92 $\pm$ 2.55	2.54 $\pm$ 0.52
<b>SL-Gruppe</b>	14.98 $\pm$ 3.30	50.62 $\pm$ 6.36	67.14 $\pm$ 5.64	3.26 $\pm$ 1.51

Beide Gruppen zeigten eine gute Fixation auf den zentralen Bereich des Bildschirms bei 5° um das Fixationskreuz und einen nur sehr geringen Stimulus-Fixationsanteil. Dementsprechend ist eine okulomotorische Lernkomponente im Rahmen dieser Experimente sehr unwahrscheinlich. Außerdem bestanden keine signifikanten Subgruppenunterschiede in der SS- (3°, 5°, Stimulus-Fixation:  $p > 0.316$ ; 1° Fixation:  $p = 0.092$ ) und der SL-Gruppe (alle  $p > 0.421$ ).

### 3.3.3 Schläfrigkeit und Vigilanz

Anhand der Stanford-Schläfrigkeitsskala SSS (Hoddes et al. 1972) wurden die Probanden aufgefordert ihren subjektiven Schläfrigkeitzzustand auf einer Werteskala von 1-7 einzuschätzen (1=hellwach bis 7=extrem schläfrig). Diese Befragung fand insgesamt drei Mal statt: in der ersten Sitzung vor dem Training (SSS Training), nach der 30-minütigen Pause vor dem Prä-Retentionstest (SSS Prä) und in der zweiten Sitzung vor dem Post-Retentionstest (SSS Post). Außerdem wurde jeweils zu Beginn der beiden Sitzungen ein fünfminütiger Vigilanztest (Vigilanz 1 und Vigilanz 2) zur objektiven Bestimmung der Aufmerksamkeit der Probanden durchgeführt (Diekelmann et al. 2013).

Bei der SS-Gruppe fanden sich in der SSS zu keinem der drei Befragungszeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen Schlaf- und Wachbedingung (alle  $p > 0.205$ ). Auch die beiden Vigilanztests erbrachten keine

Subgruppen-Unterschiede (Vigilanz 1:  $t_{(29)} = 0.71$ ,  $p = 0.485$ ; Vigilanz 2:  $t_{(29)} = 0.93$ ,  $p = 0.362$ ).

Subgruppenvergleiche der SL-Gruppe ließen in der ersten Sitzung (SSS Training, SSS Prä und Vigilanz 1) ebenfalls keine Unterschiede zwischen Schlaf- und Wachgruppe erkennen (alle  $p > 0.127$ ). In der zweiten Sitzung (SSS Post) zeigte sich hingegen eine größere Schläfrigkeit der Wachgruppe im Vergleich zur Schlafgruppe ( $t_{(27)} = 2.16$ ,  $p = 0.040$ ). Diese spiegelte sich auch in der Auswertung des Vigilanztests wider. Hierbei zeigte die Wachgruppe signifikant längere Reaktionszeiten als die Schlafgruppe ( $t_{(27)} = 2.16$ ,  $p = 0.040$ ). Beide Messinstrumente (SSS und Vigilanz) zeigten eine signifikante Korrelation ( $r = .49$ ,  $p = 0.007$ ). Vorherige Analysen der SRTT hatten einen Subgruppen-Haupteffekt der SL-Gruppe im Post-Retentionstest aufgedeckt. Die Wachgruppe zeigte auch hier längere Antwortzeiten als die Schlafgruppe. Eine Korrelation zwischen der SSS Post und Antwortzeiten für Standards im Post-Retentionstest der SL-Gruppe war signifikant ( $r = 0.371$ ,  $p = 0.047$ ). Mit den Fehlerraten fand sich hier keine Korrelation ( $r = 0.022$ ,  $p = 0.910$ ). Abgesehen davon, zeigten sich in einer Korrelationsmatrix mit den Ergebnissen der SSS Prä und SSS Post und den entsprechenden Fehlerraten und Antwortzeiten für Standards in Prä- und Post-Retentionstest der SRTT in der SS- und in der SL-Gruppe (Ausnahme Post-Retentionstest in der SL-Gruppe, s.o.) keine Hinweise auf eine signifikante Beeinflussung der Leistung durch die Schläfrigkeit (SS:  $r < 0.286$ ,  $p = 0.119$ ; SL:  $r < 0.214$ ,  $p > 0.264$ ).

Tabelle 4 listet die Ergebnisse der SSS und der Vigilanztests für die vier Subgruppen auf.

**Tabelle 4: SSS und Vigilanz.** Die Daten sind Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler. Die Vigilanz ist als Reaktionszeit in Millisekunden und die SSS (Stanford-Schläfrigkeitsskala) in Werten auf einer Skala von 1-7 (1=hellwach bis 7=extrem schläfrig) angegeben. \* $p < 0.05$ , signifikanter Unterschied zwischen Schlaf- und Wachgruppe. N=15 in der SS-Schlafgruppe, N=16 in der SS-Wachgruppe, N=16 in der SL-Schlafgruppe und N=13 in der SL-Wachgruppe.

	SS-Gruppe		SL-Gruppe	
	Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
<b>Vigilanz 1</b>	458.7 $\pm$ 14.6	471.0 $\pm$ 9.8	431.6 $\pm$ 12.2	459.7 $\pm$ 12.9
<b>SSS Training</b>	2.63 $\pm$ 0.19	2.41 $\pm$ 0.15	2.34 $\pm$ 0.21	2.23 $\pm$ 0.18
<b>SSS Prä</b>	3.00 $\pm$ 0.24	2.63 $\pm$ 0.16	3.00 $\pm$ 0.22	2.46 $\pm$ 0.27
<b>Vigilanz 2</b>	444.3 $\pm$ 13.8	460.4 $\pm$ 10.6	425.5 $\pm$ 11.2	461.2 $\pm$ 12.2*
<b>SSS Post</b>	2.63 $\pm$ 0.21	2.78 $\pm$ 0.28	2.28 $\pm$ 0.19	2.96 $\pm$ 0.26*

Signifikante Subgruppen-Unterschiede hinsichtlich Schläfrigkeit laut SSS und Vigilanz fanden sich also nur in der SL-Gruppe zu Beginn der zweiten Sitzung, unmittelbar vor dem Post-Retentionstest. Wesentlich ist jedoch, dass während der Enkodierung der Sequenz im Training (SSS Training) keine Schläfrigkeits-Unterschiede zwischen den Subgruppen bestanden.

### 3.3.4 Weitere Kontrollvariablen

Neben Schlafparametern, Eyetracker-Daten, Schläfrigkeit und Vigilanz wurden noch weitere Kontrollvariablen ermittelt. Dazu gehörten der Chronotyp anhand des Selbsteinschätzungs-Fragebogens D-MEQ-SA (Horne & Ostberg 1976; Griefahn et al. 2001), die Augendominanz nach der Dolman Methode (Chaurasia & Mathur 1976; Cheng et al. 2004) und die Bestimmung der Sehstärke und des Kontrastsehens mittels des „Freiburg Visual Acuity and Contrast Test“ (Bach 2007). Weiterhin wurden die Blockspanne und die Supraspanne erhoben (Corsi 1973). Die Blockspanne ist die Anzahl aufeinanderfolgender Stimuli, die aus einer visuellen Sequenz gemerkt wird. Die Supra-Spanne gibt die Anzahl an

Wiederholungen an, die notwendig sind, bis eine Sequenz visueller Stimuli mit einer Stimulusanzahl von der individuellen Blockspanne + 1 implizit gelernt wird. In einer zweiten Befragung wurde eine Selbsteinschätzung eingeholt zum Schwierigkeitsgrad während des Experiments die Mitte des Bildschirms zu fixieren und der Anstrengung durch die Teilnahme am Experiment (Skala von 1=überhaupt nicht anstrengend bis 10=extrem anstrengend) sowie der Motivation durch das Antwortzeit-Feedback in der 30-sekündigen Pause zwischen den Experimentalblöcken (Skala von -5=sehr demotivierend bis +5=sehr motivierend).

Die Daten aller Kontrollvariablen sind für die vier Subgruppen in Tabelle 5 aufgeführt. Sie wurden mittels *t*-Tests auf Subgruppen-Unterschiede geprüft. Schlaf- und Wachgruppen zeigten für keine der Kontrollvariablen signifikante Differenzen (alle  $p > 0.254$ )

**Tabelle 5: Kontrollvariablen.** Daten sind Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler. Chronotyp in Stufen von 1=eindeutig Abendtyp bis 5=eindeutig Morgentyp. Augendominanz ist 1=links oder 2=rechts. Blockspanne ist die Stimulus-Anzahl einer gelernten visuellen Sequenz. Supra-Spanne ist die Anzahl an Wiederholungen bis zum impliziten Lernen einer visuellen Sequenz mit Stimulusanzahl=individuelle Blockspanne+1. Sehschärfe in Bogenminute Auflösung. Kontrastsehen in Weber-Einheiten. Fixierung und Anstrengung in Werten auf einer Skala von 1 bis 10 (1=überhaupt nicht anstrengend bis 10=extrem anstrengend). Motivation in Werten auf einer Skala von -5 bis +5 (-5=sehr demotivierend bis +5=sehr motivierend). Keine signifikanten Subgruppenunterschiede (alle  $p > 0.254$ ).

Daten zu Augendominanz, Sehschärfe, Kontrastsehen, Fixierung, Anstrengung und Motivation: N = 15 in der SS-Schlafgruppe, N = 16 in der SS-Wachgruppe und der SL-Schlafgruppe, N = 13 in der SL-Wachgruppe; Daten zur Blockspanne: N = 15 in der SS-Schlafgruppe, N = 16 in der SS-Wachgruppe, N = 15 in der SL-Schlafgruppe, N = 12 in der SL-Wachgruppe; Daten zur Supraspanne: N = 15 in der SS-Schlafgruppe, der SS-Wachgruppe und der SL-Schlafgruppe, N = 13 in der SL-Wachgruppe.

	SS-Gruppe		SL-Gruppe	
	Schlaf	Wach	Schlaf	Wach
<b>Chronotyp</b>	3.00 $\pm$ 0.14	2.88 $\pm$ 0.16	3.13 $\pm$ 0.20	3.00 $\pm$ 0.30
<b>Augendominanz</b>	1.67 $\pm$ 0.13	1.75 $\pm$ 0.11	1.56 $\pm$ 0.13	1.77 $\pm$ 0.12
<b>Blockspanne</b>	6.47 $\pm$ 0.32	6.56 $\pm$ 0.30	6.73 $\pm$ 0.32	6.58 $\pm$ 0.40
<b>Supraspanne</b>	3.73 $\pm$ 0.71	4.81 $\pm$ 0.91	4.47 $\pm$ 0.91	5.15 $\pm$ 0.96
<b>Sehschärfe</b>	1.46 $\pm$ 0.07	1.45 $\pm$ 0.05	1.53 $\pm$ 0.06	1.59 $\pm$ 0.06
<b>Kontrastsehen</b>	1.58 $\pm$ 0.14	1.73 $\pm$ 0.11	1.48 $\pm$ 0.13	1.63 $\pm$ 0.16
<b>Fixierung</b>	4.53 $\pm$ 0.45	4.56 $\pm$ 0.56	4.00 $\pm$ 0.46	3.54 $\pm$ 0.46
<b>Anstrengung</b>	3.73 $\pm$ 0.46	4.44 $\pm$ 0.40	4.28 $\pm$ 0.49	4.77 $\pm$ 0.41
<b>Motivation</b>	3.73 $\pm$ 0.27	3.81 $\pm$ 0.25	3.56 $\pm$ 0.26	3.54 $\pm$ 0.35

## 4 Diskussion

In dieser SRTT-Studie lernten Versuchspersonen implizit eine deterministische Sequenz. In Abrufttests wurde pro Sequenzdurchlauf ein von der korrekten Position abweichender Deviant-Stimulus gezeigt, sodass drei Stimulustypen analysiert wurden: vorhersagbare Standards, nicht-vorhersagbare Deviants und unmittelbar auf Deviants folgende, wieder vorhersagbare Folge-Standards.

Deutliche Schlafeffekte zeigten sich im Post-Retentionstest nach dem Schlaf-/Wach-Retentionsintervall in der SS-Gruppe: Die Deviants-Fehlerrate war in der Schlafgruppe signifikant höher als in der Wachgruppe. Dasselbe galt für die Vorhersagestärke und die Rate vorhersagebedingter Fehler, welche nur nach Schlaf signifikant oberhalb des Null-, bzw. Zufallslevels lagen.

In der SL-Gruppe fanden sich im Post-Retentionstest unter verlängerten zeitlichen Bedingungen (lange RSIs) keine Unterschiede mehr in der Antwort auf die verschiedenen Stimulustypen und entsprechend keine Hinweise auf stattgehabtes Sequenz-Lernen. Die Vorhersagestärke war nicht signifikant erhöht und in einem SS/SL-Vergleich unter langen RSIs geringer als unter kurzen RSIs. Auch die Rate vorhersagebedingter Fehler sank auf Zufallslevel ab. Unter kurzen RSIs im Abschlusstest kam das stattgehabte Sequenz-Lernen schließlich wieder zum Ausdruck, wobei sich im Hinblick auf die aus Fehlerraten ermittelte Vorhersagestärke positive Schlafeffekte andeuteten. Das war auch in der SS-Gruppe der Fall. Hier stellten sich die Schlafeffekte im Abschlusstest verglichen mit dem Post-Retentionstest jedoch weniger deutlich dar.

### 4.1 Schlaf fördert Predictive Coding durch einen positiven Einfluss auf die Konsolidierung von intrinsischen Gedächtnismodellen beim impliziten Sequenz-Lernen

Vor dem Hintergrund des Predictive Coding-Ansatzes (siehe Abschnitt 1.3 Predictive Coding) kann anhand der oben beschriebenen Ergebnisse von den nachfolgenden Annahmen ausgegangen werden: Im Verlauf des Trainings wurde die stets wiederkehrende Stimulusabfolge als bottom-up Information enkodiert.

Während der nachfolgenden Konsolidierung wurde die Sequenz in ein intrinsisches Gedächtnismodell eingebettet. Dieser Konsolidierungsprozess war schlafabhängig. Das intrinsische Modell der Sequenz konnte anschließend genutzt werden, um während der Abrufttests bessere top-down Vorhersagen über die Position des jeweils nächsten Stimulus zu treffen. Handelte es sich dabei um einen Deviant, der nicht der Sequenz folgte, führte dies zu einem Vorhersagefehler (Prediction Error). Dieser spiegelte sich in einer erhöhten Fehlerrate und verlängerten Antwortzeit wider. Besonders eindrücklich kamen diese Vorhersagefehler in der Rate vorhergesagter Fehler zur Darstellung, welche nur in der Schlafgruppe signifikant erhöht war.

Da es nur nach Schlaf zu einer verbesserten Reaktion auf Folge-Standards kam (Abnahme der Fehlerrate und Antwortzeit), kann angenommen werden, dass das schlafabhängig konsolidierte intrinsische Sequenz-Modell die gesamte Stimulusabfolge umfasste. Denn um trotz eines Deviants den nachfolgenden Folge-Standard korrekt und schnell vorherzusagen, muss die Sequenz als Ganzes gelernt werden, was über die simple Bildung von paarweisen Assoziationen zwischen zwei Stimuli hinausgeht. Schlafprobanden entwickelten also ein intrinsisches Modell der vollständigen Sequenz, welches robust gegenüber Deviant-Unterbrechungen war. Letztere Eigenschaft wurde durch das Auftreten der Deviants im Prä-Retentionstest zusätzlich begünstigt. Regelmäßige Sequenz-Unterbrechungen konnten auf diese Weise bereits während des Retentionsintervalls konsolidiert werden. Schlafabhängig wurde also gelernt, dass Abweichungen der Sequenz auftreten, welche sich jedoch stets auf einen Stimulus beschränken und den weiteren Fortgang der Sequenz nicht beeinflussen.

Zusammenfassend könnte also folgende Schlussfolgerung getroffen werden: Es kommt schlafabhängig durch bottom up Informationen zur Ausbildung und Konsolidierung eines intrinsischen ganzheitlichen Sequenz-Modells, welches zur Stimulus-Vorhersage während der Abrufttests herangezogen wird und gegenüber Störungen durch Deviants immun ist. Unter der Annahme, dass es in der vorliegenden Sequenz-Lern-Aufgabe zu diesem Predictive Coding-Verhalten kam, kann die Hypothese 1 bestätigt werden: Schlaf fördert Predictive Coding in

einer impliziten Sequenz-Lernaufgabe durch eine gesteigerte Konsolidierung von Vorhersagemodellen.

In Bezug auf das Sequenz-Lernen wurde gezeigt, dass Schlaf das implizite Lernen einer Sequenz fördert. Die aktuelle Datenlage zum Einfluss von Schlaf auf implizites Sequenz-Lernen ist jedoch weitgehend inkonsistent. In zahlreichen SRTT-Experimenten wurde kein Zusammenhang zwischen Schlaf und implizitem Sequenz-Lernen festgestellt (Robertson et al. 2004; Song et al. 2007b; Nemeth et al. 2010; Song and Cohen 2014). In einigen anderen Studien wiederum war implizites Sequenz-Lernen schlafabhängig (Fischer et al. 2007; Spencer et al. 2006). Welche Gründe hat diese gegensätzliche Datenlage? Dieser Fragestellung widmet sich unter anderem ein Bericht von King et al. (King et al. 2017). Sie analysierten zahlreiche Arbeiten und kamen zu dem Schluss, dass die Konsolidierung von implizitem Sequenz-Lernen im Schlaf dann stattfindet, wenn durch spezielle Variationen der SRTT eine hippocampale Aktivierung erreicht wird. Oder andersherum: die Beteiligung des Hippocampus während eines Lernprozesses fördert dessen schlafabhängige Konsolidierung. Das wurde für explizite Gedächtnisinhalte bereits mehrfach festgehalten (Wagner et al. 1998; Peigneux et al. 2004; Gais et al. 2007; Marshall and Born 2007; Diekelmann et al. 2009; Rauchs et al. 2011).

Ein laut King et al. wichtiger Einflussfaktor in der Rekrutierung des Hippocampus während einer SRTT zum impliziten Sequenz-Lernen ist die genaue Konzeption der zugrundeliegenden Regelmäßigkeit. So begründeten auch Spencer et al. ihre Ergebnisse mit einer Hippocampus-Beteiligung, die durch die kontextuelle Ausrichtung der Lernaufgabe hervorgerufen wurde. Die Probanden reagierten auf die Farbsequenz von Stimuli, während deren Position einer räumlichen Sequenz folgte, die implizit gelernt und wie sich herausstellte, schlafabhängig konsolidiert wurde (Spencer et al. 2006). Das steht in Einklang zu einer vorangegangenen Studie, in der die schlafabhängige Konsolidierung einer kontextuellen impliziten visuellen Suchaufgabe bei Probanden mit Hippocampus-Schädigungen beeinträchtigt war (Chun & Phelps 1999). Die Enkodierung von

kontextbezogenen Assoziationen scheint also hippocampus-abhängig und die nachfolgende Konsolidierung entsprechend schlafabhängig zu sein.

Aufgrund der hoch prädiktiven Bedingungen des vorliegenden Experiments ist jedoch die Unterscheidung von Sequenzen in probabilistisch und deterministisch von besonderem Interesse. In deterministischen Sequenzen kann jeder Stimulus anhand des vorangegangenen Stimulus (1. Ordnung) oder mehrerer vorangegangener Stimuli (höhere Ordnung) sicher vorausgesagt werden. Demgegenüber stehen probabilistische Sequenzen, die eine Stimulus-Vorhersage nur basierend auf Wahrscheinlichkeiten erlauben. In einer SRTT-Studie von Curran, in der eine probabilistische Sequenz 1. Ordnung und eine deterministische Sequenz 2. Ordnung implizit gelernt wurde, konnte bei Probanden mit Hippocampus-Schädigungen ein selektives Defizit für das implizite Lernen der deterministischen Sequenzen nachgewiesen werden (Curran 1997). Der Hippocampus scheint also für die Bildung höherer Assoziationen zwischen Stimuli (assoziatives Lernen), nicht jedoch für das paarweise Lernen probabilistischer Sequenzen 1. Ordnung bedeutend zu sein. Die Aktivität des Hippocampus beim impliziten Lernen der von Curran eingesetzten deterministischen Sequenz wurde später nochmals auf neuronaler Ebene mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRI) nachgewiesen (Schendan et al. 2003). Vor diesem Hintergrund sind auch die Ergebnisse von Song und Nemeth schlüssig, die in ihren SRTT-Experimenten mit einer probabilistischen Sequenz keine schlafabhängige Konsolidierung fanden.

Eine Studie in der visuelle Bildpaare implizit gelernt wurden, zeigte in fMRI-Messungen eine erhöhte Aktivität des anterioren Hippocampus vor vorhersagbaren im Vergleich zu nicht vorhersagbaren Bildern (Turk-Browne et al. 2010). Es liegt also nahe, dass die Konzentration auf prädiktive Aspekte und die damit einhergehende Verwendung einer deterministischen Sequenz in der vorliegenden Studie dazu beitrug, Hippocampus-bedingt ein schlafabhängiges implizites Lernen zu generieren.

Weiterhin ist auch der perzeptuelle Aspekt der Sequenz zu beachten. In einer Studie von Rose et al. lernten Probanden entweder eine rein motorische oder eine rein perzeptuelle Sequenz. Messungen der Hirnaktivität mittels MRI zeigten

dabei, dass der Hippocampus nur beim perzeptuellen, nicht aber beim motorischen Lernen der Sequenz aktiv war (Rose et al. 2011). Im Widerspruch dazu steht ein Experiment, welches auch beim rein motorischen impliziten Sequenz-Lernen eine Aktivität des anterioren Hippocampus nachwies (Gheysen et al. 2010). In der vorliegenden Studie war das implizite Sequenz-Lernen sowohl perzeptuell als auch motorisch möglich. Beides könnte entsprechend für die schlafabhängige Konsolidierung bedeutsam gewesen sein.

Auch die Verwendung der Deviant-Sequenzen im Prä-Retentionstest, also noch vor dem Retentionsintervall, dürfte die schlafabhängige Konsolidierung gefördert haben. Bisherige Daten legen nahe, dass der Hippocampus insbesondere zu Beginn, bzw. während der Enkodierung einer visuellen Aufgabe aktiv ist, wenn die wahrgenommenen Stimuli noch unbekannt sind (Tulving et al. 1994; Stern et al. 1996). Eine Beteiligung insbesondere des anterioren Hippocampus wurde außerdem an der Verarbeitung von unvorhersehbaren Stimuli gezeigt, die auf Basis bisheriger Erfahrungen nicht korrekt vorausgesagt werden konnten (Dolan & Fletcher 1999; Strange et al. 1999). In der vorliegenden Studie fungierten die regelmäßigen Deviants als unerwartete Signale, die nicht zu den Stimulus-Assoziationen der bislang erlebten Sequenz passten und zu Vorhersagefehlern führten. Die Rate vorhersagebedingter Fehler war bereits im Prä-Retentionstest erhöht. Das Auftreten neuer Informationen in Form von unerwarteten Deviants könnte die Hippocampus-Aktivität also auch während des Prä-Retentionstests aufrechterhalten und auf diese Weise die anschließende schlafabhängige Konsolidierung zusätzlich gefördert haben.

Zuletzt ist es wahrscheinlich, dass auch die Einführung einzelner Deviants pro Sequenzdurchlauf die Detektion von Schlafeffekten erleichterte. Das Maß für das implizite Sequenz-Lernen und die Vorhersagestärke (Differenzen zwischen Standards, Deviants und Folge-Standards) ist durch vereinzelte, aber insgesamt häufig auftretende Deviants sensibler, verglichen mit einem Experimentalaufbau aus wenigen, sich abwechselnden Blöcken zufälliger oder strukturierter Stimuli (Robertson et al. 2004; Song and Cohen 2014).

## **4.2 Ein langes Antwort-Stimulus-Intervall maskiert das Sequenz-Lernen auch nach Schlaf**

Ein langes Intervall zwischen Tastendruck und nächstem Stimulus im Post-Retentionstest der SL-Gruppe verhinderte den verhaltensexperimentellen Nachweis des Sequenz-Lernens, auch unter Schlafbedingungen. Die Hypothese 2, dass Schlaf den Transfer von implizitem Sequenz-Wissen in einen verlängerten zeitlichen Kontext ermöglicht, konnte nicht bestätigt werden. Die Beobachtungen von Willingham et al. wurden entsprechend repliziert, die in ihren SRTT-Experimenten ebenso nur unter kurzen, jedoch nicht unter langen RSIs implizites Sequenz-Lernen auf Verhaltensebene nachweisen konnten (Willingham et al. 1997).

Eine mögliche Ursache für die Maskierung des Sequenz-Lernens könnten Deckeneffekte sein, die der verlängerten Vorbereitungszeit auf den nächsten Stimulus geschuldet waren. Entgegen der Erwartungen kam es unter langen RSIs jedoch zu signifikant verlängerten Antwortzeiten auf Standard-Stimuli. Es ist möglich, dass die Probanden den zeitlichen Kontrast zwischen der Dauer des Stimulus-Antwort-Intervalls (Antwortzeit) und Antwort-Stimulus-Intervalls (RSI) unbewusst reduzierten und sich gewissermaßen an den langsamen zeitlichen Rhythmus des Experiments adaptierten. Dabei kam es jedoch nicht zu einer Fehlerreduktion und auch die Rate vorhersagebedingter Fehler lag auf Zufallslevel. Eine unter langen RSIs verminderte Konzentration und Motivation sollte daher ebenfalls in Betracht gezogen werden. Diese wäre auf die längere Dauer des Experiments zurückzuführen und darauf, dass die verlängerte Zeitspanne zwischen Tastendruck und nächstem Stimulus mehr Raum für extrinsische und intrinsische Distraktoren ließ.

### **4.3 Explizites Wissen stört den Abruf von schlafabhängig konsolidierten Vorhersagemodellen beim Predictive Coding**

Im Abschlusstest bildeten sich die Schlafeffekte nur sehr schwach ab. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Tests waren die Probanden zu diesem Zeitpunkt bereits über das Vorhandensein einer Sequenz aufgeklärt worden. Außerdem hatten sie die Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz absolviert. Somit lagen hier unterschiedliche Bedingungen und Voraussetzungen vor. Während die Probanden im Training und im Prä- und Post-Retentionstest ohne Bewusstsein über eine zugrundeliegende Sequenz lediglich so schnell und korrekt wie möglich auf die Stimuli reagierten, führte das Wissen über die Sequenz im Abschlusstest unwillkürlich zu einer bewussten Wahrnehmung der Stimulus-Assoziationen.

Die freie Reproduktion der Sequenz fand zum ersten Mal nach dem Post-Retentionstest und ein weiteres Mal nach dem Abschlusstest statt. Zwischen beiden Tests zeigte sich ein Trend für einen Wissenszuwachs. Da es sich bei der freien Reproduktion um eine deklarative Aufgabe handelt, spiegelt diese vor allem das explizite Wissen wider, was darauf hindeutet, dass während des Abschlusstests explizite Lernprozesse abgelaufen sein könnten. Fletcher et al. wiesen nach, dass der Versuch explizit eine alternierende Sequenz zu Lernen, das implizite Lernen beeinträchtigt (Fletcher et al. 2005). Zwar hatten die Probanden die Sequenz in der vorliegenden Studie zum Zeitpunkt des Abschlusstests bereits implizit gelernt, jedoch könnte die explizite Komponente mit dem Abruf des impliziten Wissens interferiert haben. Dafür spricht eine Arbeit von Song et al., die zeigte, dass der Ausdruck von implizitem Sequenz-Lernen in Verhaltensexperimenten durch die Anwendung von explizitem Wissen beeinträchtigt sein kann (Song et al. 2007a).

Obwohl die Aufgabenstellung des Abschlusstests lediglich die schnelle und korrekte Antwort auf die Stimuli diktierte, ist es dennoch wahrscheinlich, dass die Probanden dabei bewusst auf die Sequenz achteten oder diese sogar suchten. Dass parallele Zusatz-Aufgaben während einer SRTT den Ausdruck des

stattgehabten Sequenz-Lernens auf Verhaltensebene verhindern, wurde bereits nachgewiesen (Seidler et al. 2002). Seidler et al. fanden dabei allerdings keinerlei Hinweise auf implizites Sequenz-Lernen. Im Abschlusstest der vorliegenden Experimente präsentierte sich dieses nach wie vor mit erhöhten Deviants-Fehlerraten und -Antwortzeiten und in der Wachbedingung der SS-Gruppe zeigten sich keine Unterschiede zwischen dem Post-Retentionstest und Abschlusstest. Es kam lediglich in der SS-Schlafgruppe zu einer Abnahme der Vorhersagestärke, durch einen Verlust der im Post-Retentionstest präsentierten Immunität gegenüber Deviants. Bei diesem Effekt handelt es sich also nicht um eine generalisierte verhaltensbedingte Maskierung jeglichen Sequenz-Lernens, wie sie unter langen RSIs in der SL-Gruppe gefunden wurde. Der Abruf des grundlegenden impliziten Sequenz-Wissens, welches alle Probanden gleichermaßen entwickelt hatten, war nicht eingeschränkt. Lediglich die Schlafeffekte zeigten einen deutlichen Rückgang in ihrer Ausprägung. Die explizite Komponente könnte entsprechend auf höherer Ebene zu einer Interferenz geführt und als Störfaktor fungiert haben, welcher spezifisch schlafabhängige Predictive Coding-Prozesse behinderte.

Eine ähnliche Situation fand sich in einer SRTT-Studie von Fischer et al.. Um den expliziten Wissenszuwachs im Schlaf zu untersuchen, klärten sie ihre Probanden bereits vor dem Retentionsintervall über das Vorhandensein der implizit gelernten Sequenz auf. Im nachfolgenden Abrufftest wiesen sie das stattgehabte Sequenz-Lernen zwar nach, konnten jedoch keine Unterschiede zwischen Schlaf- und Wachprobanden feststellen (Fischer et al. 2006). Dass die Konzeption ihrer SRTT den Nachweis von positiven Schlafeffekten prinzipiell zuließ, zeigte sich ein Jahr später (Fischer et al. 2007). Auch hier könnte also das explizite Wissen die Anwendung von schlafabhängig konsolidierten intrinsischen Sequenz-Modellen gestört haben.

Aufgrund des späten Zeitpunkts bei Durchführung des Abschlusstests am Ende der zweiten Sitzung, sollten als weitere Ursachen für die Ergebnisse auch Ermüdungserscheinungen und eine nachlassende Konzentration in Betracht gezogen werden. Jedoch wäre in diesem Fall eher eine Auswirkung auf die gesamte Leistung, also alle drei Stimulustypen und insbesondere die Schlaf- und

Wachprobanden in gleichem Maße zu erwarten gewesen (wie sie unter langen RSIs beobachtet wurde). Da die Reaktion auf Folge-Standards isoliert betroffen war, ist es wahrscheinlicher, dass diese spezifische Störung entsprechend der oben beschriebenen Interferenz-Theorie zwischen explizitem Wissen und den Gedächtnismodellen des Predictive Coding zustande kam.

Das steht in Einklang zu der Hypothese 3, in der bereits ein negativer Einfluss von explizitem Wissen und vermehrter Müdigkeit auf den Abruf des implizit gelernten Sequenz-Wissens und die Anwendung schlafabhängig konsolidierter Vorhersagemodelle beim Predictive Coding vermutet wurde.

#### **4.4 Schlaf fördert den expliziten Zugriff auf implizites Wissen**

Anhand der Aufgaben zur Bestimmung des Wissens über die Sequenz wurden vier Probanden mit überdurchschnittlich guten Leistungen ( $> 2$  Standardabweichungen vom Gruppendurchschnitt) von den Analysen ausgeschlossen. Auf diese Weise wurde für alle analysierten Probanden gewährleistet, dass kein vollständiges explizites Wissen vorlag.

In der Triplet-Erkennungsaufgabe (Triplets als Sequenz-zugehörig oder nicht Sequenz-zugehörig einordnen) und der Triplet-Vervollständigungsaufgabe (zwei aufeinanderfolgende Stimuli zum Triplet ergänzen) zeigten Schlafprobanden der SS-Gruppe eine signifikant höhere Übereinstimmung ihrer Konfidenz-Einschätzungen mit den vorangegangenen korrekten, bzw. inkorrekten Antworten als die Wachprobanden. Für korrekte Antworten gaben sie also höhere Konfidenzbewertungen ab als für inkorrekte Antworten. Das lässt darauf schließen, dass Schlaf nicht nur die Konsolidierung, sondern auch den Zugriff auf die implizit gelernte Sequenz fördert, ohne dass diese als explizites Wissen ins volle Bewusstsein gelangt. Dieser Befund passt zur aktuellen Datenlage. So lag das Ergebnis der freien Reproduktion in dem bereits erwähnten SRTT-Experiment von Fischer et al. nur nach Schlaf im Retentionsintervall oberhalb des Zufallslevels (Fischer et al. 2006). Fischer et al. schlussfolgerten, dass frisch konsolidierte Gedächtnisinhalte während des Schlafs umstrukturiert werden und implizite und explizite Gedächtnissysteme dabei interagieren. Auf diese Weise

kommt es im Schlaf selektiv zur Förderung expliziter Gedächtnisinhalte. Wagner et al. führten zwar keine SRTT durch, doch die Probanden lernten auch in ihrer Studie implizit eine Regelmäßigkeit zwischen Stimuli und korrekten Antworten. Unter allen Probanden, die sich dieser Stimulus-Antwort-Sequenz bewusst wurden, waren doppelt so viele Schlaf-, wie Wachprobanden (Wagner et al. 2004). Auch diese Beobachtung suggeriert, dass Schlaf das Bewusstwerden von implizit gelernten Regelmäßigkeiten fördert. Weitere aktuellere Daten untermauern dieses Ergebnis (Yordanova et al. 2008; Wilhelm et al. 2013; Yordanova et al. 2017). In der Studie von Wilhelm et al. war der explizite Abruf der Sequenz mit einer erhöhten Aktivität im Hippocampus assoziiert. Wie in Abschnitt 4.1 bereits erörtert wurde, führte die Konzeption der SRTT in der vorliegenden Arbeit aller Wahrscheinlichkeit nach eine hohe Hippocampus-Beteiligung herbei. In Anbetracht der Ergebnisse von Wilhelm könnte dieser Effekt auch den verstärkten bewussten Zugriff auf die implizit gelernte Sequenz nach Schlaf vermittelt zu haben.

Dass sich in der SL-Gruppe bei diesen Aufgaben keine Schlafeffekte zeigten, dürfte auf ähnliche Gründe zurückzuführen sein, wie sie bereits in Abschnitt 4.2 zur Maskierung des Sequenz-Wissens unter langen RSIs diskutiert wurden. Denn auch die Triplet-Vervollständigungs- und die Triplet-Erkennungsaufgabe fanden in der SL-Gruppe mit langen RSIs statt. Die Gesamtleistung der SL-Gruppe war nicht signifikant schlechter als die der SS-Gruppe. Der verlängerte zeitliche Abstand zwischen den Stimuli scheint hier also lediglich zur Maskierung möglicher Differenzen zwischen Schlaf- und Wachprobanden geführt zu haben.

#### **4.5 Ausschluss zirkadianer Effekte**

Je nach Schlaf- oder Wachbedingung im Retentionsintervall fanden die beiden Sitzungen der Studie entweder morgens oder abends statt. Dennoch ist der Einfluss zirkadianer Effekte auf die Ergebnisse aus verschiedenen Gründen als vernachlässigbar anzusehen. In der ersten Sitzung gab es trotz unterschiedlicher Tageszeit, bei ansonsten gleichen Bedingungen keine Unterschiede in den SRTT-Ergebnissen zwischen den Subgruppen. Auch hinsichtlich der

Schläfrigkeit und Vigilanz bestanden in der ersten Sitzung keine Subgruppenunterschiede.

Lediglich vor dem Post-Retentionstest zu Beginn der zweiten Sitzung am Abend ließen in der SL-Gruppe die Wachprobanden eine höhere Schläfrigkeit und eine verminderte Vigilanz als die Schlafprobanden erkennen. Auf das Resultat der Studie hat dies jedoch keine Auswirkungen, da der verhaltensbasierte Nachweis des Sequenz-Lernens in der Schlaf- und Wachbedingung der SL-Gruppe aufgrund der langen RSIs im Post-Retentionstest ohnehin nicht möglich war.

Hinzu kommt, dass auch das verwendete Maß zur Bestimmung des Sequenz-Lernens relativ robust gegenüber diversen Gruppenunterschieden ist. So ist es wahrscheinlich, dass sich zirkadiane Einflüsse, Motivationsdifferenzen und unterschiedliche interindividuelle Fähigkeiten gleichsam auf alle Stimulustypen auswirken würden. Die aus einem Vergleich der Antworten auf die drei Stimulustypen abgeleiteten Ergebnisse blieben dann von solchen Variablen relativ unbeeinflusst.

Letztlich führten auch Robertson et al. ergänzende Untersuchungen in ihren SRTT-Experimenten zu implizitem und explizitem Lernen durch und stufen zirkadiane Effekte daraufhin als vernachlässigbar ein (Robertson et al. 2004).

#### **4.6 Zukünftige Fragestellungen und mögliche Folgestudien**

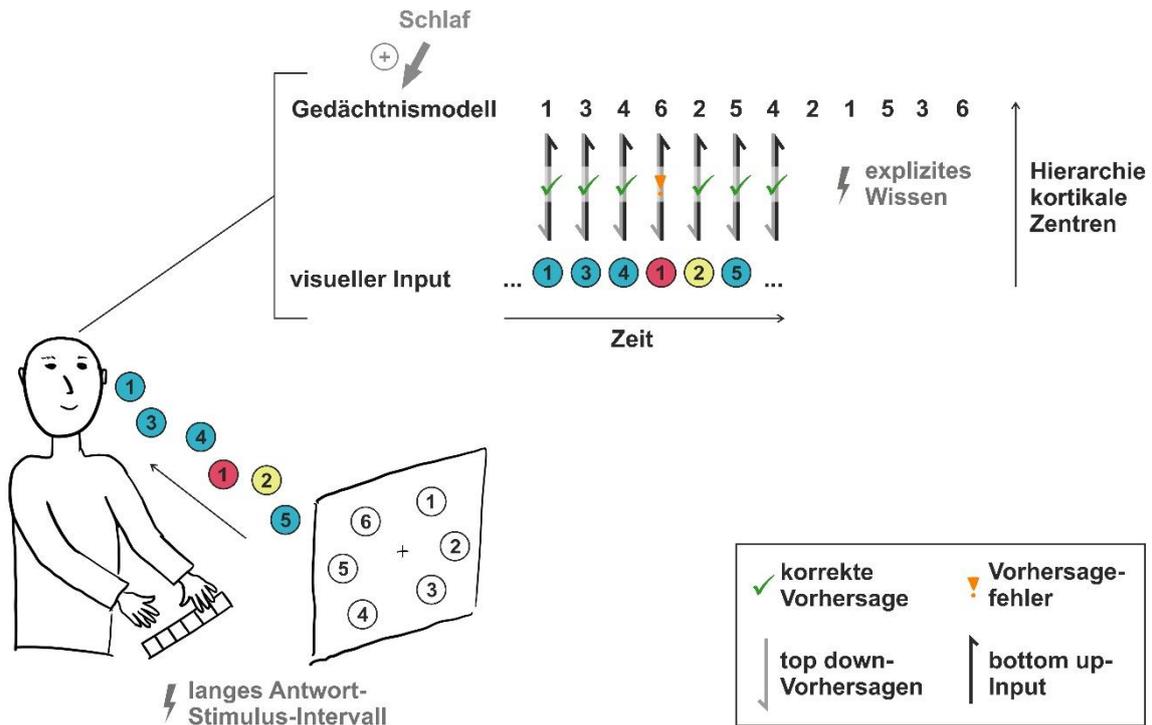
Die vorliegende Studie legt verhaltensbasiert in einer impliziten visuellen Sequenz-Lernaufgabe einen positiven Einfluss von Schlaf auf Predictive Coding nahe. Ein folgerichtiges Bestreben wäre nun der Nachweis von Predictive Coding-Signalen auf neuronaler Ebene im visuellen Kortex. Ein zu diesem Zweck geeignetes Verfahren ist die funktionelle Magnetresonanztomographie zur Aufzeichnung von BOLD-Signalen (blood oxygenation-level dependent) während einer SRTT. Damit ist es bereits gelungen, Aktivitäten im primären visuellen Kortex nachzuweisen, die räumlich und zeitlich eine gelernte visuelle Sequenz widerspiegeln (Ekman et al. 2017). Das Ziel einer derartigen Folgestudie wäre der neurowissenschaftliche Nachweis von Vorhersage- bzw. Vorhersagefehler-Signalen (Aktivität *vor/während* voraussagbaren Standards, bzw. *während/nach*

nicht voraussagbaren Deviants) mit der Hypothese einer erhöhten Darstellbarkeit unter Schlafbedingungen.

Auch die positive Wirkung des Schlafs lässt Raum für weitere Untersuchungen. Um spezifische Einflussfaktoren wie die Schlafphase und neuronale Prozesse im Gehirn zu identifizieren, die eine gesteigerte Konsolidierung des intrinsischen Sequenz-Modells bewirken, könnten Studien mit einer physiologischen und neuronalen Überwachung des Schlafs (Schlaf-EEG) neue Erkenntnisse bringen.

#### **4.7 Fazit**

Schlaf fördert die erfolgreiche Vorhersage von Stimuli einer implizit gelernten visuellen Sequenz. Dies könnte auf der Grundlage von Predictive Coding stattfinden. Darin basiert die Stimulus-Vorhersage nach Schlaf auf einem ganzheitlichen intrinsischen Gedächtnismodell der Sequenz, das eine hohe Vorhersagestärke trotz der durch Deviants provozierten Vorhersagefehler erlaubt. In der vorliegenden Arbeit wurde nachgewiesen, dass Schlaf in diesem Prozess eine bedeutsame Rolle spielt. Auch der explizite Zugriff auf implizites Sequenz-Wissen wurde durch Schlaf erleichtert. Eine beeinträchtigte Darstellung der Schlafeffekte fand hingegen durch Explizitheit über die zugrundeliegende bereits implizit gelernte Sequenz statt. Verlängerte Antwort-Stimulus-Intervalle führten zu einer vollständigen verhaltensbedingten Maskierung des stattgehabten Sequenz-Lernens. Daraus lassen sich wichtige konzeptuelle Anforderungen und vermeidbare Störfaktoren für zukünftige Studien ableiten. In Abbildung 17 ist Predictive Coding während der SRTT mit den entsprechenden Einflussfaktoren schematisch dargestellt.



**Abbildung 17: Predictive Coding während der SRTT nach Schlaf und seine Störeinflüsse.** Während der visuellen Perception werden Stimulus-Vorhersagen top down von höheren an tiefere kortikale Zentren weitergegeben. Diese basieren auf einem intrinsischen Gedächtnismodell der vollständigen Sequenz, dessen Konsolidierung durch Schlaf gefördert wird. Der visuelle Input wird bottom up an höhere kortikale Zentren geleitet. Während Standard-Stimuli (blau) und Folge-Standards (gelb) korrekt vorhergesagt werden, kommt es bei nicht-vorhersagbaren Deviants (rot) zu Vorhersagefehlern. Explizites Wissen stört den Abruf des intrinsischen Gedächtnismodells und die Generierung von top down-Vorhersagen, was die Darstellung von Schlafeffekten inhibiert. Ein langes Antwort-Stimulus-Intervall beeinflusst hingegen das Verhalten der Probanden, wodurch es zu einer Maskierung der Lerneffekte kommt.

## 5 Zusammenfassung

In der Evolution ist Adaptation notwendig, um der natürlichen Selektion zu entgehen. Auch im kleinen Rahmen steht der Mensch tagtäglich vor der Aufgabe sich an die wechselnde Umwelt anzupassen. Damit das gelingt, ist die Wahrnehmung der Umgebung Grundvoraussetzung. Ein Mechanismus zur Optimierung der visuellen Detektion ist Predictive Coding. Dabei kommunizieren Hirnzentren unterschiedlicher hierarchischer Stufen. Es werden perzipierte Signale implizit in Gedächtnismodellen gespeichert und für Vorhersagen über zukünftigen visuellen Input genutzt. Die Gedächtniskonsolidierung profitiert stark von Schlaf, woraus sich folgende Fragestellung ergibt: Fördert Schlaf Predictive Coding? Im Rahmen dieses Experiments wurde eine serielle Antwortzeitaufgabe mit einer deterministischen Sequenz durchgeführt, die implizit gelernt wurde. Den Probanden wurde in Abrufttests, die teils nach einem Schlaf-/Wach-Retentionsintervall stattfanden, pro Sequenzdurchlauf ein nicht vorhersagbarer Deviant-Stimulus gezeigt. Dabei war die Deviants-Fehlerrate in der Schlafgruppe signifikant höher als in der Wachgruppe, ebenso die Vorhersagestärke und die Rate vorhersagebedingter Fehler. Das könnte auf die schlafabhängige Konsolidierung eines intrinsischen Sequenz-Modells beim Predictive Coding hinweisen. Dabei wird von einer Beteiligung des Hippocampus ausgegangen, möglicherweise hervorgerufen durch die prädiktive Konzeption der Studie.

Der Wechsel des zeitlichen Kontexts durch Verlängerung des Antwort-Stimulus-Intervalls führte zu einer Maskierung des stattgehabten Sequenz-Lernens, was auf eine verminderte Motivation und Konzentration zurückgeführt werden könnte. In einem letzten Abrufttest, in dem die Probanden bereits über das Vorhandensein der Sequenz aufgeklärt waren, stellten sich die positiven Schlafeffekte reduziert dar. Folglich scheint das explizite Wissen mit dem Abruf des implizit konsolidierten Sequenz-Modells interferiert zu haben. In Aufgaben zum Wissen über die Sequenz stimmte die Konfidenz nach Schlaf signifikant besser mit korrekten, bzw. inkorrekten Angaben überein. Folglich demonstriert diese Verhaltensstudie nicht nur, dass Schlaf implizites Sequenz-Lernen fördert, sondern auch den expliziten Zugriff auf implizites Wissen unterstützt.

## 6 Literaturverzeichnis

- Albouy, G., Ruby, P., Phillips, C., Luxen, A., Peigneux, P. & Maquet, P., 2006, 'Implicit oculomotor sequence learning in humans: Time course of offline processing.', *Brain research*, 1090(1), 163–171.
- Alink, A., Schwiedrzik, C.M., Kohler, A., Singer, W. & Muckli, L., 2010, 'Stimulus predictability reduces responses in primary visual cortex.', *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 30(8), 2960–2966.
- Bach, M., 2007, 'The Freiburg Visual Acuity Test-Variability unchanged by post-hoc re-analysis', *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 245(7), 965–971.
- Bar, M., 2009, 'The proactive brain: memory for predictions.', *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 364(1521), 1235–1243.
- Born, J., Rasch, B. & Gais, S., 2006, 'Sleep to remember', *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 12(5), 410–24.
- Chaurasia, B.D. & Mathur, B.B.L., 1976, 'Eyedness', *Cells Tissues Organs*, 96(2), 301–305.
- 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*, 45(8), 2856–2860.
- Chun, M.M. & Phelps, E.A., 1999, 'Memory deficits for implicit contextual information in amnesic subjects with hippocampal damage.', *Nature neuroscience*, 2(9), 844–847.
- Corsi, P.M., 1973, *Human memory and the medial temporal region of the brain.*, *Dissertatopm Abstracts International*, 34, 891.
- Curran, T., 1997, 'Higher-order associative learning in amnesia: evidence from the serial reaction time task.', *Journal of cognitive neuroscience*, 9(4), 522–533.
- Dennis, N.A., Howard, J.H.J. & Howard, D. V., 2006, 'Implicit sequence learning without motor sequencing in young and old adults.', *Experimental brain research*, 175(1), 153–164.
- Destrebecqz, A. & Cleeremans, A., 2001, 'Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure.', *Psychonomic bulletin & review*, 8(2), 343–50.
- Diekelmann, S., Wilhelm, I. & Born, J., 2009, 'The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation', *Sleep Medicine Reviews*, 13(5), 309–321.

- Diekelmann, S., Wilhelm, I., Wagner, U. & Born, J., 2013, 'Sleep to Implement an Intention', *Sleep*, 36(1), 149–153.
- Dolan, R.J. & Fletcher, P.F., 1999, 'Encoding and retrieval in human medial temporal lobes: an empirical investigation using functional magnetic resonance imaging (fMRI).', *Hippocampus*, 9(1), 25–34.
- Ekman, M., Kok, P. & Lange, F.P. de, 2017, 'Time-compressed preplay of anticipated events in human primary visual cortex', *Nature communications*, 8, 15276.
- 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*, 18(3), 311–319.
- Fischer, S., Hallschmid, M., Elsner, A.L. & Born, J., 2002, 'Sleep forms memory for finger skills.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(18), 11987–11991.
- Fischer, S., Wilhelm, I. & Born, J., 2007, 'Developmental differences in sleep's role for implicit off-line learning: comparing children with adults.', *Journal of cognitive neuroscience*, 19(2), 214–227.
- Fiser, J. & Aslin, R.N., 2002, 'Statistical learning of higher-order temporal structure from visual shape sequences.', *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 28(3), 458–467.
- Fletcher, P.C., Zafiris, O., Frith, C.D., Honey, R.A.E., Corlett, P.R., Zilles, K. & Fink, G.R., 2005, 'On the benefits of not trying: brain activity and connectivity reflecting the interactions of explicit and implicit sequence learning.', *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 15(7), 1002–1015.
- Friston, K., 2009, 'The free-energy principle: a rough guide to the brain?', *Trends in cognitive sciences*, 13(7), 293–301.
- Friston, K., 2010, 'The free-energy principle : a unified brain theory ?', 11(2), 127–138.
- Friston, K., Kilner, J. & Harrison, L., 2006, 'A free energy principle for the brain.', *Journal of physiology, Paris*, 100(1–3), 70–87.
- Gais, S., Albouy, G., Boly, M., Dang-Vu, T.T., Darsaud, A., Desseilles, M., Rauchs, G., Schabus, M., Sterpenich, V., Vandewalle, G., Maquet, P. & Peigneux, P., 2007, 'Sleep transforms the cerebral trace of declarative memories.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(47), 18778–18783.
- Gais, S., Lucas, B. & Born, J., 2006, 'Sleep after learning aids memory recall.', *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)*, 13(3), 259–262.
- Gais, S., Plihal, W., Wagner, U. & Born, J., 2000, 'Early sleep triggers memory for early visual discrimination skills.', *Nature neuroscience*, 3(12), 1335–1339.

- Gheysen, F., Opstal, F. Van, Roggeman, C., Waelvelde, H. Van & Fias, W., 2010, 'Hippocampal contribution to early and later stages of implicit motor sequence learning.', *Experimental brain research*, 202(4), 795–807.
- Griefahn, B., Künemund, C., Bröde, P. & Mehnert, P., 2001, *Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg: The Validity of a German Version of the Morningness-Eveningness-Questionnaire Developed by Horne and Östberg*, vol. 5.
- Hoddes, E., Zarcone, V., Smythe, H., Phillips, R. & Dement, W.C., 1972, *Hoddes\_1973\_quantification of sleepiness.pdf*, 431–436.
- Honey, C.J., Newman, E.L. & Schapiro, A.C., 2018, 'Switching between internal and external modes: A multiscale learning principle.', *Network neuroscience (Cambridge, Mass.)*, 1(4), 339–356.
- Horne, J. a. & Ostberg, O., 1976, *A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms*, *Int J Chronobiol*, 4(2), 97–110.
- Janacsek, K. & Nemeth, D., 2012, 'Predicting the future : From implicit learning to consolidation ☆', *International Journal of Psychophysiology*, 83(2), 213–221.
- Jo Nissen, M. & Bullemer, P., 1987, *Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures\*1*, vol. 19.
- Kaposvari, P., Kumar, S. & Vogels, R., 2018, 'Statistical Learning Signals in Macaque Inferior Temporal Cortex.', *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 28(1), 250–266.
- Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B.S., Askenasy, J.J. & Sagi, D., 1994, 'Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill.', *Science (New York, N.Y.)*, 265(5172), 679–682.
- King, B.R., Hoedlmoser, K., Hirschauer, F., Dolfen, N. & Albouy, G., 2017, 'Sleeping on the motor engram: The multifaceted nature of sleep-related motor memory consolidation.', *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 80, 1–22.
- Kok, P., Jehee, J.F.M. & Lange, F.P. de, 2012, 'Less is more: expectation sharpens representations in the primary visual cortex.', *Neuron*, 75(2), 265–270.
- L. Brophy, A., 1986, *Alternatives to a table of criterion values in signal detection theory*, vol. 18.
- Lerner, I. & Gluck, M., 2019, 'Sleep and the Extraction of Hidden Regularities: A Systematic Review and the Importance of Temporal Rules', *Sleep Medicine Reviews*.

- Lutz, N.D., Wolf, I., Hubner, S., Born, J. & Rauss, K., 2018, 'Sleep Strengthens Predictive Sequence Coding.', *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 38(42), 8989–9000.
- Makovski, T., 2018, 'Meaning in learning: Contextual cueing relies on objects' visual features and not on objects' meaning.', *Memory & cognition*, 46(1), 58–67.
- Maquet, P., 2001, 'The Role of Sleep in Learning and Memory', *Science*, 294(November), 1048–1052.
- Marshall, L. & Born, J., 2007, 'The contribution of sleep to hippocampus-dependent memory consolidation.', *Trends in cognitive sciences*, 11(10), 442–450.
- Mumford, D., 1992, 'On the computational architecture of the neocortex', *Biological Cybernetics*, 66(3), 241–251.
- Nemeth, D., Janacsek, K., Londe, Z., Ullman, M.T., Howard, D. V & Howard, J.H., 2010, 'Sleep has no critical role in implicit motor sequence learning in young and old adults', *Experimental Brain Research*, 201(2), 351–358.
- Ohayon, M.M., Carskadon, M.A., Guilleminault, C. & Vitiello, M. V, 2004, 'Meta-analysis of quantitative sleep parameters from childhood to old age in healthy individuals: developing normative sleep values across the human lifespan.', *Sleep*, 27(7), 1255–1273.
- Oldfield, R.C., 1971, 'The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory', *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113.
- Payne, J.D., Tucker, M.A., Ellenbogen, J.M., Wamsley, E.J., Walker, M.P., Schacter, D.L. & Stickgold, R., 2012, 'Memory for semantically related and unrelated declarative information: the benefit of sleep, the cost of wake.', *PloS one*, 7(3), e33079.
- Peigneux, P., Laureys, S., Delbeuck, X. & Maquet, P., 2001, 'Sleeping brain, learning brain. The role of sleep for memory systems.', *Neuroreport*, 12(18), A111-24.
- Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Collette, F., Perrin, F., Reggers, J., Phillips, C., Degueldre, C., Fiore, G. Del, Aerts, J., Luxen, A. & Maquet, P., 2004, 'Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep?', *Neuron*, 44(3), 535–545.
- Peigneux, P., Maquet, P., Meulemans, T., Destrebecqz, A., Laureys, S., Degueldre, C., Delfiore, G., Aerts, J., Luxen, A., Franck, G., Linden, M. Van der & Cleeremans, A., 2000, 'Striatum forever, despite sequence learning variability: a random effect analysis of PET data.', *Human brain mapping*, 10(4), 179–194.
- Rao, R.P.N. & Ballard, D.H., 1999, 'Predictive coding in the visual cortex : a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects', 79–87.

- Rasch, B. & Born, J., 2013, 'About sleep's role in memory', *Physiological reviews*, 93(2), 681–766.
- Rauchs, G., Feyers, D., Landeau, B., Bastin, C., Luxen, A., Maquet, P. & Collette, F., 2011, 'Sleep contributes to the strengthening of some memories over others, depending on hippocampal activity at learning', *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 31(7), 2563–2568.
- Rauss, K. & Pourtois, G., 2013, 'What is bottom-up and what is top-down in predictive coding', *Frontiers in Psychology*, 4(MAY), 1–8.
- Rauss, K., Schwartz, S. & Pourtois, G., 2011, 'Top-down effects on early visual processing in humans: A predictive coding framework', *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(5), 1237–1253.
- Robertson, E.M., Pascual-Leone, A. & Press, D.Z., 2004, 'Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep.', *Current biology : CB*, 14(3), 208–212.
- Rose, M., Haider, H., Salari, N. & Buchel, C., 2011, 'Functional dissociation of hippocampal mechanism during implicit learning based on the domain of associations.', *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 31(39), 13739–13745.
- 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*, 37(6), 1013–1025.
- Seidler, R.D., Purushotham, A., Kim, S.-G., Ugurbil, K., Willingham, D. & Ashe, J., 2002, 'Cerebellum activation associated with performance change but not motor learning.', *Science (New York, N. Y.)*, 296(5575), 2043–2046.
- Siegel, J.M., 2005, 'Clues to the functions of mammalian sleep.', *Nature*, 437(7063), 1264–1271.
- Song, S. & Cohen, L.G., 2014, 'Practice and sleep form different aspects of skill.', *Nature communications*, 5, 3407.
- Song, S., Howard, J.H.J. & Howard, D. V., 2007a, 'Sleep does not benefit probabilistic motor sequence learning.', *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 27(46), 12475–12483.
- Song, S., Howard, J.H.J. & Howard, D. V., 2007b, 'Implicit probabilistic sequence learning is independent of explicit awareness.', *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N. Y.)*, 14(3), 167–176.
- Spencer, R.M.C., Sunm, M. & Ivry, R.B., 2006, 'Sleep-dependent consolidation of contextual learning.', *Current biology : CB*, 16(10), 1001–1005.

- Stern, C.E., Corkin, S., Gonzalez, R.G., Guimaraes, A.R., Baker, J.R., Jennings, P.J., Carr, C.A., Sugiura, R.M., Vedantham, V. & Rosen, B.R., 1996, 'The hippocampal formation participates in novel picture encoding: evidence from functional magnetic resonance imaging.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93(16), 8660–8665.
- Stickgold, R., 2005, 'Sleep-dependent memory consolidation', *Nature*, 437(7063), 1272–1278.
- Stickgold, R., 2013, 'Parsing the role of sleep in memory processing.', *Current opinion in neurobiology*, 23(5), 847–853.
- Stickgold, R., Whidbee, D., Schirmer, B., Patel, V. & Hobson, J.A., 2000, 'Visual Discrimination Task Improvement: A Multi-Step Process Occurring During Sleep', *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(2), 246–254.
- Strange, B.A., Fletcher, P.C., Henson, R.N., Friston, K.J. & Dolan, R.J., 1999, 'Segregating the functions of human hippocampus.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(7), 4034–4039.
- Summerfield, C. & Lange, F.P. de, 2014, *Expectation in perceptual decision making: neural and computational mechanisms.*, *Nature reviews Neuroscience*, 15(11), 745–756.
- Summerfield, C., Trittschuh, E.H., Monti, J.M., Mesulam, M.M. & Egner, T., 2008, 'Neural repetition suppression reflects fulfilled perceptual expectations.', *Nature neuroscience*, 11(9), 1004–1006.
- Tulving, E., Markowitsch, H.J., Kapur, S., Habib, R. & Houle, S., 1994, 'Novelty encoding networks in the human brain: positron emission tomography data.', *Neuroreport*, 5(18), 2525–2528.
- Turk-Browne, N.B., Scholl, B.J., Johnson, M.K. & Chun, M.M., 2010, 'Implicit perceptual anticipation triggered by statistical learning.', *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 30(33), 11177–11187.
- Vinken, K., Vogels, R. & Beeck, H. Op de, 2017, 'Recent Visual Experience Shapes Visual Processing in Rats through Stimulus-Specific Adaptation and Response Enhancement.', *Current biology : CB*, 27(6), 914–919.
- Wagner, A.D., Schacter, D.L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A.M., Rosen, B.R. & Buckner, R.L., 1998, 'Building memories: remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity.', *Science (New York, N.Y.)*, 281(5380), 1188–1191.
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R. & Born, J., 2004, 'Sleep inspires insight', *Nature*, 427(6972), 352–355.
- Walker, M.P., 2005, 'A refined model of sleep and the time course of memory formation.', *The Behavioral and brain sciences*, 28(1), 51–104.

- Walker, M.P., Brakefield, T., Morgan, A., Hobson, J.A. & Stickgold, R., 2002, 'Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning.', *Neuron*, 35(1), 205–211.
- Walker, M.P. & Stickgold, R., 2004, 'Sleep-dependent learning and memory consolidation', *Neuron*, 44(1), 121–133.
- Walker, M.P. & Stickgold, R., 2006, 'Sleep, Memory, and Plasticity', *Annual Review of Psychology*, 57(1), 139–166.
- Wilhelm, I., Rose, M., Imhof, K.I., Rasch, B., Büchel, C. & Born, J., 2013, 'The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge', *Nature Neuroscience*, 16, 391.
- Willingham, D.B., 1999, 'Implicit motor sequence learning is not purely perceptual.', *Memory & cognition*, 27(3), 561–572.
- Willingham, D.B. & Goedert-Eschmann, K., 1999, 'The Relation Between Implicit and Explicit Learning: Evidence for Parallel Development', *Psychological Science*, 10(6), 531–534.
- 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 & cognition*, 25(4), 534–542.
- Willingham, D.B., Salidis, J. & Gabrieli, J.D.E., 2002, 'Direct comparison of neural systems mediating conscious and unconscious skill learning.', *Journal of neurophysiology*, 88(3), 1451–1460.
- Witt, K., Margraf, N., Bieber, C., Born, J. & Deuschl, G., 2010, 'Sleep consolidates the effector-independent representation of a motor skill.', *Neuroscience*, 171(1), 227–234.
- Yordanova, J., Kolev, V., Bruns, E., Kirov, R. & Verleger, R., 2017, 'Sleep Spindles in the Right Hemisphere Support Awareness of Regularities and Reflect Pre-Sleep Activations.', *Sleep*, 40(11).
- Yordanova, J., Kolev, V., Verleger, R., Bataghva, Z., Born, J. & Wagner, U., 2008, 'Shifting from implicit to explicit knowledge: different roles of early- and late-night sleep.', *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)*, 15(7), 508–515.

## **7 Erklärungen zum Eigenanteil der Dissertationsschrift**

Die Arbeit wurde im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie unter Betreuung von Prof. Dr. Jan Born durchgeführt. Die Konzeption der Studie erfolgte durch Prof. Dr. Jan Born, Dr. Karsten Rausch und Nicolas Lutz, M.Sc.. Die Programmierung des Presentation(R)-Skripts für das Experiment erfolgte durch Nicolas Lutz. Sämtliche Versuche der Studie mit 64 Probanden wurden nach Einweisung durch Nicolas Lutz von mir eigenständig durchgeführt. Die Datenverarbeitung erfolgte durch Nicolas Lutz. Die statistische Auswertung erfolgte nach Anleitung und Beratung durch Nicolas Lutz durch mich. Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 30.07.2019

Ines Milena Wolf

## 8 Veröffentlichung

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

Lutz, N.D., Wolf, I., Hübner, S., Born, J. & Rauss, K., 2018,  
'Sleep Strengthens Predictive Sequence Coding.',  
*The Journal of Neuroscience*, 38(42), 8989–9000.

## 9 Anhang

### Erste Befragung zum Experiment (Regelmäßigkeit)

Wortlaut der Fragen:

1. Ist Dir während des Experiments irgendetwas aufgefallen?
2. Sind Dir während des Experiments irgendwelche Regelmäßigkeiten aufgefallen?
3. Ist Dir irgendeine Regelmäßigkeit in der Abfolge der Positionen der Muster (Stimuli) aufgefallen?

**Tabelle 6: Tabellarische Übersicht des Versuchsablaufs.**

#### **Probanden-Rekrutierung**

---

Studieninformation

#### **Sitzung 1:**

---

##### **Erhebung von Probandendaten und Kontrollvariablen:**

Einverständniserklärung

Formular zur Überweisung des Probandenentgeltes

Fragebogen zu Probandendaten Teil 1

Bestimmung der Sehschärfe und des Kontrast-Sehens (FrACT)

Augendominanz-Test

Vigilanztest

Stanford Schläfrigkeits-Skala (SSS)

##### **Experiment:**

Übungsblock SRTT (Eingewöhnung, 20 zufällige Stimuli)

Training SRTT (5 Experimentalblöcke)

30-minütige Pause

Stanford Schläfrigkeits-Skala (SSS)

Prä-Retentionstest (3 Experimentalblöcke)

Aushändigung und Anlegen der Actiwatch®

Aushändigung Fragebogen zu Tagesaktivitäten und ggf. Schlafqualität

## **Sitzung 2:**

---

### **Erhebung von Probandendaten und Kontrollvariablen:**

Zurücknahme der Actiwatch®

Abgabe Fragebogen zu Tagesaktivitäten und ggf. Schlafqualität

Fragebogen zu Probandendaten Teil 2

Fragebogen zum Chronotyp (D-MEQ-SA)

Fragebogen zur Händigkeit (Edinburgh Handedness Inventory)

Vigilanztest

Standford Schläfrigkeits-Skala (SSS)

### **Experiment:**

Übungsblock (Eingewöhnung, 20 zufällige Stimuli)

Post-Retentionstest (3 Experimentalblöcke)

Erste Befragung (Regelmäßigkeit + schriftliche freie Reproduktion 1)

Aufklärung über das Vorhandensein der 12-gliedrigen Sequenz

Freie Reproduktion 2

Triplet-Erkennungsaufgabe

Triplet-Vervollständigungsaufgabe

Abschlusstest (3 Experimentalblöcke)

Zweite Befragung (subjektives Erleben)

Freie Reproduktion 3

Test zur Bestimmung der räumlich-visuellen Merkspanne

Informationen zum wissenschaftlichen Hintergrund der Studie (freiwillig)

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Jan Born für die Möglichkeit bedanken meine medizinische Doktorarbeit am Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie durchzuführen und für seine wichtigen Anregungen zu dieser Studie.

Mein zweites großes Dankeschön gilt Dr. Karsten Rauss für die freundliche Aufnahme in seine Forschungsgruppe, die Bereitstellung des Promotionsthemas und die exzellente Betreuung.

Außerordentlich danken möchte ich weiterhin Nicolas Lutz, für die zuverlässige Unterstützung bei der praktischen Durchführung und Auswertung dieser Studie. Außerdem für seine konstruktiven Korrekturvorschläge an meiner Dissertationsschrift und die hervorragende und engagierte Betreuung.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts bedanke ich mich für die große Hilfsbereitschaft und freundliche Atmosphäre.

Herzlichen Dank möchte ich auch an alle Probanden richten, die diese Forschungsarbeit durch ihre Studienteilnahme ermöglicht haben.

Ein ganz besonderes Dankeschön schulde ich außerdem meiner Schwester Katrin Wolf, die viel Zeit investiert hat, um mich bei der Erstellung der Abbildungen zu unterstützen.

Ein persönlicher Dank geht an meinen Freund Christian T., für die Durchsicht dieser Dissertation, die Anregungen zu den Schaubildern und seine Teilnahme als Übungsproband. Ganz besonders aber, für die ständige Begleitung, auch in anstrengenden Phasen, für das geduldige Verständnis und die ermutigende Unterstützung, derer ich mir jederzeit sicher sein konnte.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, dafür dass sie mir meine Ausbildung so kompromisslos ermöglichen und mich dabei in jeglicher Hinsicht unterstützen sowie bei meiner ganzen tollen Familie, auf die ich mich immer verlassen kann.