

Aus dem  
Institut für Medizinische Psychologie der Universität Tübingen

**Gedächtnisabstraktion in Abhängigkeit von Schlaf und Zeit**

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

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

**vorgelegt von  
Himbert, Johanna  
2024**

Dekan:	Professor Dr. B. Pichler
1. Berichterstatter:	Privatdozentin Dr. S. Diekelmann
2. Berichterstatter:	Professor Dr. A. Batra
Tag der Disputation:	10.07.2024

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Gedächtnis	1
1.1.1 Speichersysteme	1
1.1.2 Speicherprozesse	2
1.1.3 Gedächtnisabstraktion	3
1.2 Schlaf	9
1.2.1 Schlafstadien	9
1.2.2 Schlaf und Gedächtnis	11
1.2.3 Schlaf und Gedächtnisabstraktion	12
1.3 Hypothesen	13
2 Material und Methoden	14
2.1 Abruf nach 20 min und nach einer Woche	14
2.1.1 Proband:innen	14
2.1.2 Design und Ablauf	15
2.1.3 Stimuli und Aufgabe	19
2.1.4 Polysomnographie	25
2.2 Abruf nach einem Jahr (1-Jahr-Test)	27
2.2.1 Proband:innen	27
2.2.2 Design / Ablauf	27
2.2.3 Stimuli und Aufgabe	27
2.3 Datenauswertung	28
2.4 Statistische Analyse	29
3 Ergebnisse	29
3.1 Abruf nach 20 min und nach einer Woche	29
3.2 Abruf nach einem Jahr	30

3.3	Vergleich Schlaf / Wachheit (1-Woche-Test und 1-Jahr-Test)	31
3.4	Kontrolltests	35
3.5	Korrelationen mit Schlafparametern	38
4	Diskussion	46
4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	46
4.2	Einordnung in bisherige Forschung	47
4.3	Einschränkungen der Studie	49
4.4	Fazit und Ausblick	51
5	Zusammenfassung	52
6	Literaturverzeichnis	54
7	Erklärung zum Eigenanteil	61
8	Veröffentlichung	62
9	Danksagung	63
10	Anhang	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Langzeit-Gedächtnissysteme .....	2
Abbildung 2: Physiologische Schlafarchitektur .....	10
Abbildung 3: Studiendesign.....	16
Abbildung 4: Beispiel eines Figuresets inkl. Prototyp .....	20
Abbildung 5: Enkodierung .....	21
Abbildung 6: Wiedererkennungstest.....	23
Abbildung 7: Vertrauheitsbewertung .....	23
Abbildung 8: Set Rating (Beispiel-Set) .....	24
Abbildung 9: 1-Jahr-Test .....	28
Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung der Wiedererkennungsraten.....	30
Abbildung 11: Wiedererkennungsraten 1-Jahr-Test, Vgl. Prototypen/alte Formen .....	31
Abbildung 12: Wiedererkennungsraten 20-Min- und 1-Woche-Test, Vgl. Schlaf/Wachheit .....	32
Abbildung 13: Wiedererkennungsraten 1-Jahr-Test, Vgl. Schlaf/Wachheit .....	33
Abbildung 14: 1-Jahr-Test, ähnliche und unähnliche Formen .....	34
Abbildung 15: Vergleich Prototypen/verwandte Formen .....	35
Abbildung 16: Wiedererkennungsraten Set Rating.....	37
Abbildung 17: Korrelationen mit posterioren Spindeln und frontalen langsamen Oszillationen.....	39
Abbildung 18: Korrelationen zwischen Verhaltensleistung und SO-Spindel- Verbindung.....	41

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Schlafparameter .....	43
Tabelle 2: Aktigraphie.....	44
Tabelle 3: Wortflüssigkeit, Vigilanz, Schläfrigkeit und Digit Span Test bei den einzelnen Versuchstagen .....	45

## Abkürzungsverzeichnis

2-AFC-T	two-alternative-forced-choice-test
ANOVA	analysis of variance
DRM	Deese-Roediger-McDermott
EEG	Elektroenzephalogramm
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
Hz	Hertz
NREM	Non-rapid-eye-movement
REM	Rapid-eye-movement
SO	slow oscillations
SSS	Stanford Sleepiness Scale
SWS	slow wave sleep

# 1 Einleitung

Nachfolgend werden zunächst Grundlagen des Gedächtnisses und des Schlafes dargelegt. Im Anschluss erfolgt eine Beleuchtung der physiologischen Zusammenhänge mit Bezug auf aktuelle Forschungsarbeit. Abschließend werden die Hypothesen, welche dieser Studie zugrunde liegen, präsentiert.

## 1.1 Gedächtnis

### 1.1.1 Speichersysteme

Neuroanatomisch werden zwei (Langzeit-)Gedächtnissysteme unterschieden: das deklarative und das nicht-deklarative Gedächtnis (Squire, 1992) (für eine Übersicht siehe *Abbildung 1*).

Das deklarative Gedächtnis bezieht sich auf Episoden und Fakten. Deklarative Gedächtnisinhalte werden explizit, d.h. bewusst, enkodiert und abgerufen und sind von hippokampalen Strukturen abhängig (Squire, 1992). Voneinander abzugrenzen sind episodische Gedächtnisinhalte, d.h. autobiographische Erinnerungen, und semantische Gedächtnisinhalte, also der generelle Wissensschatz eines Menschen, resp. Fakten über die Welt (Tulving, 1983; Squire & Zola, 1996). Episodische Gedächtnisinhalte können in Gedanken wiedererlebt werden, sie sind mit zeitlichen und örtlichen Gegebenheiten verknüpft (Tulving, 1983). Das Erlebnis wird also in einen Kontext eingebettet (Tulving, 2002). Semantische Gedächtnisinhalte sind hingegen detailarm und entwickeln sich erst im Laufe der Zeit durch mehrfache Wiederholungen (Moscovitch et al., 2006).

Das nicht-deklarative Gedächtnis beinhaltet z.B. motorische und perzeptuelle Fertigkeiten. Die Gedächtnisinhalte werden implizit, d.h. ohne ein bewusstes Lernen, aufgenommen sowie abgerufen und sind unabhängig von hippokampalen Strukturen (Doyon & Benali, 2005). Das Erlernen von Fertigkeiten erfordert ein Training, welches die Repräsentationen relativ stabil

über längere Zeit werden lässt (Marshall & Born, 2007). Diese Kompetenzen kommen durch Leistung zum Ausdruck (Squire & Zola, 1996).

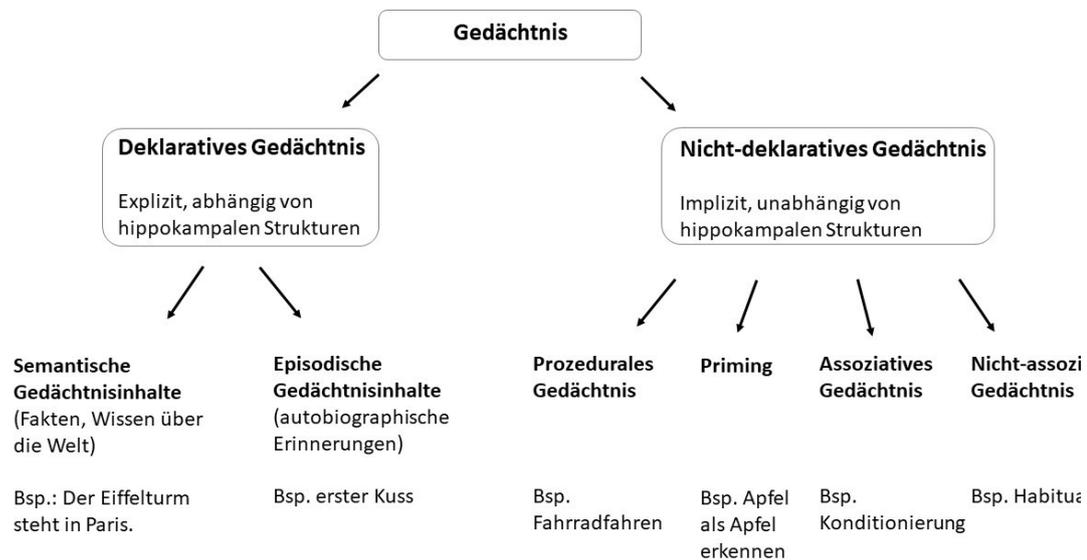


Abbildung 1: Langzeit-Gedächtnissysteme

**Langzeit-Gedächtnissysteme:** Darstellung der Gedächtnissysteme mit Beispielen. Graphik in Anlehnung an Squire & Dede (2015).

Die beschriebenen Speichersysteme stehen in Zusammenhang mit Speicherprozessen, d.h. kognitiven Aktivitäten, die dazu beitragen, wie Informationen in diesen Systemen verarbeitet und abgelegt werden.

### 1.1.2 Speicherprozesse

Man unterscheidet drei Subprozesse von Gedächtnisfunktionen: die Enkodierung, die Konsolidierung und den Abruf.

Unter der Enkodierung versteht man das Lernen, d.h. die Aufnahme der zu speichernden Information in ein neuronales Netzwerk. Diese neuronale

Repräsentation ist anfänglich instabil (Kandel et al., 2012). Die Festigung der neu enkodierten Repräsentationen bezeichnet man als Konsolidierung. Neue, zunächst instabile Informationen werden hierbei in bereits bestehende Langzeitrepräsentationen integriert. Es handelt sich also um Prozesse, die nach dem Lernen fortgesetzt werden und die die neu kodierte Gedächtnisspur, die zunächst zerbrechlich und kurzlebig ist, stabilisieren (Marshall & Born, 2007). Die Konsolidierung des Gedächtnisses erfolgt durch molekulare Prozesse an einzelnen Synapsen (Malenka & Nicoll, 1999), aber auch durch Systemkonsolidierung, die eine Neuorganisation der Gedächtnisspur innerhalb verschiedener Gehirnsysteme umfasst (Wang et al., 2006) (siehe dazu den Abschnitt *Zwei Ebenen Modell*).

Das abschließende Erinnern der gelernten Gedächtnisinhalte wird als Abruf bezeichnet (Born et al., 2006). Besonders beim deklarativen Gedächtnis wird deutlich, dass der Abruf zunächst vom Hippokampus abhängt, aber nach einer Weile hippokampusunabhängiger wird (McClelland et al., 1995; Squire & Zola-Morgan, 1991). Es wird vermutet, dass in der Folge neokortikale Bereiche, insbesondere der mediale präfrontale Kortex, diese Funktion übernehmen (Frankland & Bontempi, 2005).

Während die Subprozesse Enkodierung und Abruf hauptsächlich und am effektivsten im Wachzustand ablaufen, wird die Konsolidierung insbesondere während des Schlafens gefördert (siehe auch Kapitel *1.2.2 Schlaf und Gedächtnis*).

### **1.1.3 Gedächtnisabstraktion**

Da nicht alle Details unserer Erlebnisse abgespeichert werden können, kann es auf Dauer nützlicher sein, sich lediglich das Wesentliche einer Information auf Kosten der Details zu merken (Payne et al., 2009). Infolgedessen können abgerufene Gedächtnisinhalte bedeutend von denen abweichen, die ursprünglich enkodiert wurden (Schacter et al., 1998). Es handelt sich dann um allgemeinere Gedächtnisspuren, die den „Kern“ (auch „Gist“) der enkodierten Informationen widerspiegeln (Dudai, 2012; Winocur & Moscovitch, 2011; Yassa

& Reagh, 2013). So ermöglicht uns das Gist-Gedächtnis beispielsweise, das Wichtigste aus einem Zeitungsartikel zu bewahren, ohne uns mit allen spezifischen Details zu belasten. Dies bietet in späteren Gesprächen oder Diskussionen die Möglichkeit, das Thema des Artikels mit Fakten und Bedeutungen zusammenzufassen, ohne sich an jede einzelne Information erinnern zu müssen. Gedächtnisabstraktion bezieht sich also auf die Fähigkeit, übergeordnete Konzepte und Zusammenhänge aus verschiedenen Gedächtnisinhalten zu extrahieren, um künftige Bedürfnisse resp. ähnliche Situationen in der Zukunft zu bewältigen (Bartlett & Bartlett, 1993; Wilhelm et al., 2011).

Im Zusammenhang mit Gedächtnisabstraktion wird häufig auch von „Erinnerungsverfälschung“ bzw. „falschen Erinnerungen“ gesprochen. Hervorzuheben und von besonderer Relevanz sind in diesem Zusammenhang falsche Zeugenaussagen, d.h. wenn Menschen davon überzeugt sind, sich an Ereignisse zu erinnern, die in Wirklichkeit so nie stattgefunden haben. Solche Zeugenaussagen konnten in der Vergangenheit bereits unter Laborbedingungen erzeugt werden (Shaw & Porter, 2015).

Typisch für diese Art der Erinnerungen ist eine hohe Konfidenz für die Wahrhaftigkeit der Erinnerung sowie eine semantische Assoziation mit realen, tatsächlich kodierten Erlebnissen (Roediger & McDermott, 1995; Schacter, 1996; Seamon et al., 2002). Nach Schacter et al. (1998) kann davon ausgegangen werden, dass auch die Bildung falscher Erinnerungen die drei Subprozesse Enkodierung, Konsolidierung sowie Abruf umfasst. Einige weitere Autor:innen gehen zudem davon aus, dass die Gedächtnisabstraktion resp. Gedächtnisverzerrungen Teil eines physiologischen Gedächtnissystems sind, da sie Prozesse widerspiegeln, die zur effizienten Funktion eines Gedächtnisses beitragen, aber als Folge dessen auch Verzerrungen erzeugen (Brainerd & Reyna, 2005; Schacter et al., 2011; Seamon et al., 2002). In einer Studie von Howe et al. (2011) sollten Kinder und Erwachsene passende Oberbegriffe für kurze Wortlisten generieren. Wenn die Teilnehmer:innen zuvor mit anderen, ähnlich aufgebauten Wortlisten vorbereitet wurden, verbesserte sich die nachfolgende Leistung, wenn die Teilnehmer:innen die Oberbegriffe falsch

erinnerten. Die Autor:innen schlussfolgerten daraus, dass falsche Erinnerungen positive Auswirkungen auf kognitive Funktionen haben können.

Andere Autor:innen argumentieren, dass das Gedächtnis ein flexibles Konstrukt ist, was anfällig für Fehler in der Informationsverarbeitung ist (Addis et al., 2007; Schacter & Slotnick, 2004).

In diesem Forschungsfeld vielfach beschrieben und in diversen Studien genutzt ist das Deese-Roediger-McDermott (DRM) Paradigma (Roediger & McDermott, 1995; Deese, 1959), bei dem Proband:innen Wortlisten mit semantisch miteinander assoziierten Wörtern (z.B. „Nacht“, „dunkel“, „Kohle“, etc.) enkodieren. Zu jeder Wortliste gehörig existiert ein Oberbegriff, der alle Wörter einer Liste vereint („schwarz“ in diesem Beispiel), in der Enkodierungsphase allerdings zu keinem Zeitpunkt erscheint. Proband:innen geben in darauffolgenden Abruftests, die entweder als freier Abruf oder als Wiedererkennungsaufgabe gestaltet sind, vielfach an, sich – mit hoher Konfidenz – an die Oberbegriffe zu „erinnern“, was als ein Maß für die Abstraktion von Gedächtnisinhalten im DRM-Paradigma gewertet wird (Cann et al., 2011; Diekelmann et al., 2010; Payne et al., 2009).

### ***Theorien zur Gedächtnisabstraktion***

Die *fuzzy trace theory* (Reyna & Brainerd, 1998) und die *spreading activation theory / monitoring theory* (Roediger III et al., 2001) sind die wichtigsten Theorien zur Erklärung von Erinnerungsverfälschungen.

Die *fuzzy trace theory* besagt, dass unser Gedächtnis aus zwei separaten, aber miteinander verbundenen Spuren besteht: der Verbatim-Spur und der Gist-Spur. Die Verbatim-Spur enthält die spezifischen Details einer Erfahrung, während die Gist-Spur den Kerninhalt oder die Essenz der Erfahrung repräsentiert, wobei auch überlappende Areale beider Spuren vorliegen. Nach dieser Theorie ist die Gist-Spur widerstandsfähiger gegen Vergessen als die Verbatim-Spur. Die Gist-Spur wird durch wiederholte Aktivierung semantisch ähnlichen Materials gestärkt, was dazu führt, dass der Kerninhalt der Erfahrung – die Gist – langfristig im

Gedächtnis verbleibt (Reyna, 1998). Im DRM-Paradigma wurde argumentiert, dass enkodierte Wörter („wahre Erinnerungen“) sowohl von Verbatim- als auch von Gist-Spuren abhängen, während Gist-Wörter (Oberbegriffe) ausschließlich von Gist-Spuren abhängen, weil sie nie tatsächlich gesehen wurden und daher nicht mit kontextuellen Details verbunden sind (Brainerd & Reyna, 2002).

Nach der *spreading activation theory* löst die Aktivierung eines Konzeptes, d.h. einer im Gedächtnis gespeicherten mentalen Repräsentation (z.B. das Wort „Hund“) die Aktivierung damit verbundener Konzepte (z.B. „Tier“, „Haustier“, „Bellen“) aus. Konzepte im Gedächtnis sind in einem Netzwerk organisiert und miteinander verbunden. Wird ein Konzept aktiviert, breitet sich die Aktivierung wellenartig in diesem Netzwerk aus und aktiviert damit verbundene Konzepte. Diese Ausbreitung der Aktivierung hängt von der Stärke der Verbindungen zwischen den Konzepten ab. Konzepte, die häufig miteinander assoziiert werden, weisen starke Verbindungen auf und werden leichter aktiviert als solche, die selten oder schwach zusammenhängen (Collins et al., 1975). Die assoziative Aktivierung von verwandten oder ähnlichen Objekten wird gespeichert und später irrtümlicherweise mit tatsächlichen Begegnungen verknüpft (Straube, 2012).

Beide Theorien befassen sich also mit der Art und Weise, wie Informationen im Gedächtnis verarbeitet, gespeichert und abgerufen werden. Während sich die *spreading activation theory* eher auf die Informationsverarbeitung und Ausbreitung in Form verschiedener Konzepte fokussiert, geht die *fuzzy trace theory* davon aus, dass Gedächtnisspuren auf zwei Arten (wörtlich/genau und abstrakt/unscharf) existieren – mit dem Sinn, daraus fundierte Entscheidungen abzuleiten.

Zwei Theorien, die sich mit der Beziehung zwischen episodischem und semantischem Gedächtnis beschäftigen, sind die *multiple trace theory* (Nadel & Moscovitch, 1997) und die *transformation theory* (Wiltgen & Silva, 2007; Wiltgen et al., 2010; Winocur et al., 2010).

Die grundlegende Idee der *multiple trace theory* ist, dass der Hippokampus nicht nur für die Aufnahme episodischer Erinnerungen von Bedeutung ist, sondern

auch für deren Abruf eine unverzichtbare Rolle spielt. Bei jedem Abruf einer hippocampalen, d.h. detailreichen, ereignisspezifischen Gedächtnisspur kommt es, dieser Theorie nach, zur Anlage einer neuen Gedächtnisspur, um die ursprüngliche Erinnerung zu festigen. Im Laufe der Zeit erfolgt auf der Basis der somit angesammelten Gedächtnisrepräsentationen eine Abstraktion statistischer Muster, die den „Kern“ der ursprünglichen Erinnerung darstellen. Diese abstrahierte, d.h. allgemeinere, im Neokortex repräsentierte Form wird als semantisches Gedächtnis angesehen.

Darauf aufbauend besagt die *transformation theory*, dass der Übergang der Gedächtnisinhalte von hippocampalen zu neokortikalen Strukturen zwangsläufig mit einem Verlust von detaillierten, kontextuellen Merkmalen einhergeht. In diesem Prozess werden die Erinnerungen zu schematisierten oder semantisierten Formen, während das transformierte Gedächtnis nicht notwendigerweise das ursprüngliche, detaillierte Gedächtnis ersetzen muss, sondern je nach Erfordernis parallel existieren kann.

Ein entscheidender Aspekt der *transformation theory* ist, dass von einer schrittweisen Entlastung des Hippokampus während des Umwandlungsprozesses von episodischen zu semantischen Erinnerungen ausgegangen wird. Somit wird auch der Abruf der Erinnerungen zunehmend unabhängiger von hippocampalen Strukturen, was in Kontrast zu der Annahme der *multiple trace theory* steht, die von einer essenziellen Bedeutung des Hippokampus für den Abruf ausgeht.

Die Mechanismen hinter der Gedächtnisabstraktion in Bezug auf Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis werden im folgenden Abschnitt weiter erläutert.

## **Zwei-Ebenen-Modell**

Das von den Psychologen Craik und Lockhart (1972) veröffentlichte Zwei-Ebenen-Modell stellt die Grundlagen für die Unterscheidung zwischen oberflächlicher und tiefer Informationsverarbeitung dar. Dieses Modell hatte einen großen Einfluss auf die kognitive Psychologie und die Gedächtnisforschung und trug zur Entwicklung eines besseren Verständnisses darüber bei, wie Menschen Informationen wahrnehmen, verarbeiten und erinnern.

Bei der Enkodierung wird die zu speichernde Information parallel in Hirnrindenareale (Neokortex) und in hippokampale Netzwerke abgespeichert. Der Hippokampus stellt in diesem vielfach beschriebenen Zwei-Ebenen-Modell den Kurzzeitspeicher dar, welcher Informationen schnell aufnehmen kann. Der Neokortex als Langzeitspeicher hingegen nimmt neue Inhalte langsamer auf, d.h. er braucht mehrfache Reaktivierungen der Repräsentationen, um diese über lange Zeit zu speichern (Rasch & Born, 2007). Diese Reaktivierungen finden vermehrt während des Schlafes statt (siehe Kapitel *1.2.2 Schlaf und Gedächtnis*).

Wie bereits erwähnt, muss nicht jeder Teilaspekt eines im Wachzustand enkodierten Ereignisses dauerhaft im Langzeitspeicher verbleiben; dies würde vielmehr die begrenzte Speicherkapazität des Gehirns übersteigen. Während neu kodierte Gedächtnisinhalte kurzfristig als episodische Erinnerungen, d.h. mit lebendigen Kontextdetails gespeichert werden, kommt es mit der Zeit zu einer Verallgemeinerung und Dekontextualisierung. Die Darstellung der Erinnerung ist dann eher abstrakterer, unspezifischerer Art (Yassa & Reagh, 2013).

Um die Quintessenz der erlebten Information zunächst herauszufiltern und anschließend langfristig zu speichern, transformieren aktive Systemkonsolidierungsprozesse Gedächtnisrepräsentationen vom initialen Speicher in den Langzeitspeicher (Born et al., 2006).

## 1.2 Schlaf

Neben wichtigen Funktionen und Merkmalen des Schlafes wie der Erholung und der Einsparung von Energie (Siegel, 2005), der reduzierten Reaktionsfähigkeit, relativer Inaktivität und einem veränderten Stoffwechsel (Steriade & McCarley, 2005), stellt der Verlust des Bewusstseins ein bemerkenswertes Merkmal des Schlafes dar (Born et al., 2006). Während dieses unwillkürlichen Zustands durchläuft der Körper systematisch verschiedene Stadien, die im Folgenden erläutert werden.

### 1.2.1 Schlafstadien

Schlaf ist gekennzeichnet durch das zyklische Auftreten von Non-Rapid-Eye-Movement-Schlaf (Non-REM-Schlaf), der die Schlafstadien 1, 2, 3 und 4 umfasst (detaillierte Erläuterung der Stadien siehe unten) und Rapid-Eye-Movement-Schlaf (REM-Schlaf). Die Unterteilung der Phasen beruht auf charakteristischen Unterschieden in Bezug auf die Gehirnaktivität, d.h. unterschiedlicher Frequenzmuster der EEG-Wellen, der damit einhergehenden gesteigerten oder geminderten Aktivität von Neurotransmittern, der tonischen Muskelaktivität sowie der Augenbewegungen. Ein Zyklus, d.h. eine Abfolge von Non-REM und REM-Schlaf, dauert beim Menschen ca. 90 Minuten und wird pro Nacht vier- bis fünfmal durchlaufen (Rechtschaffen & Kales, 1968).

In der Einschlafphase (Stadium S1) folgen auf Alpha-Wellen (8-12 Hz), die der Wachphase zugeordnet werden, langsame Theta-Wellen (4-8 Hz). Die Muskulatur ist in diesem Stadium noch leicht angespannt; langsame, rollende Augenbewegungen sind möglich. Der darauffolgende leichte Schlaf (Stadium S2) ist durch eine entspannte Muskulatur sowie ausbleibende Augenbewegungen gekennzeichnet. Das EEG zeigt neben Theta-Wellen Schlaf-Spindeln (12-15 Hz) sowie K-Komplexe (2 Hz) (Inostroza & Born, 2013; Steriade & Amzica, 1998).

Im frühen Schlaf, d.h. in der ersten Hälfte der Nacht, ist der Tiefschlaf (Stadien S3 und S4) dominierend. Aufgrund der in diesen Stadien vorkommenden niederfrequenten Delta-Wellen (engl. *slow waves*) von 0,5-3 Hertz (Hz), spricht

man auch von Delta-Schlaf oder engl. *slow wave sleep* (SWS). Die Muskulatur ist in diesem Stadium weiterhin entspannt und es lassen sich keine Augenbewegungen feststellen. REM-Schlaf tritt in der ersten Hälfte des Schlafes hingegen nur in geringer Menge auf. Während des späten Schlafes, d.h. in der zweiten Hälfte der Nacht, ist das Verhältnis umgedreht: dominierend ist der REM-Schlaf, in dem typischerweise Theta-Wellen (3-8 Hz) (Llinas & Ribary, 1993) sowie auch Alpha- und Betawellen sichtbar werden, wohingegen Deltaschlaf seltener auftritt (Born et al., 2006). Kennzeichnend für diese Phase sind die schnellen Augenbewegungen (engl. *rapid eye movements*) und eine generelle Muskelatonie (Chase & Morales, 1990).

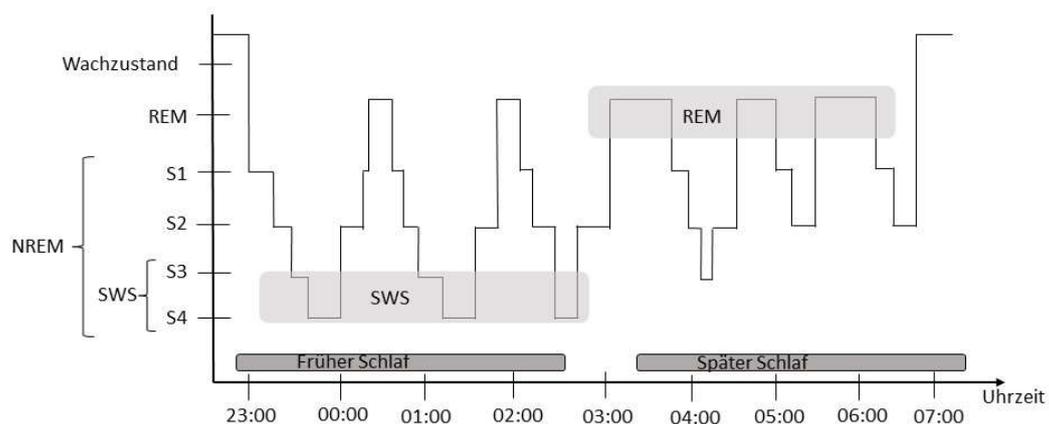


Abbildung 2: Physiologische Schlafarchitektur

**Physiologische Schlafarchitektur:** In der ersten Hälfte der Nacht (früher Schlaf) dominiert der Tiefschlaf (engl. *slow wave sleep*, SWS), während die zweite Hälfte der Nacht (später Schlaf) von REM-Schlafphasen geprägt ist. Graphik in Anlehnung an Inostroza & Born, 2013.

### **1.2.2 Schlaf und Gedächtnis**

Dass Schlaf eine wesentliche Rolle bei der Gedächtniskonsolidierung spielt, wurde in der Vergangenheit von vielen Autor:innen belegt (Born et al., 2006; Rasch & Born, 2007; Smith, 1995; Walker & Stickgold, 2006). Die aktive Rolle des Schlafes in Bezug auf die Gedächtnisbildung ist heutzutage vielfach anerkannt, während die Schlafforschung in ihren Anfängen von einer rein passiven Funktion des Schlafes durch die Vermeidung von Interferenz, d.h. der gegenseitigen Störung ähnlicher Informationen, ausging (Ellenbogen et al., 2006; Plihal & Born, 1997).

Die Gedächtnisbildung im Schlaf hängt von der Art des Gedächtnissystems ab: Während das hippokampal vermittelte deklarative Gedächtnis insbesondere von Deltaschlaf profitiert, hat das nicht-hippokampal vermittelte prozedurale und emotionale Gedächtnis insbesondere einen Nutzen von REM-reichem Schlaf (Born et al., 2006), auch wenn darauf hingewiesen werden muss, dass Gedächtnisaufgaben nie rein deklarativ oder prozedural sind resp. dass beide Speichersysteme während der schlafabhängigen Konsolidierung zusammenwirken (Fischer et al., 2006; Peigneux et al., 2001). Neuere Studien deuten darauf hin, dass der Hippokampus eine wichtige Rolle bei der Langzeitkonsolidierung während des Schlafes spielt – selbst bei Erinnerungen, die bisher als hippokampusunabhängig angesehen wurden (Schapiro et al., 2019; Sawangjit et al., 2018).

Eine zentrale Hypothese in der Schlafforschung besagt, dass die Gedächtnisbildung im Schlaf auf einer Reaktivierung derselben neuronalen Netzwerke beruht, die während der Enkodierung aktiv waren. Diese Reaktivierungshypothese wurde durch tierexperimentelle Untersuchungen gestützt. Wilson und McNaughton (1994) zeigten diese neuronalen Reaktivierungsprozesse bei Ratten für hippokampal vermitteltes Gedächtnis im Delta-Schlaf, nach einer Enkodierungsphase, die im Wiederauffinden des richtigen Weges in einem Labyrinth bestand.

In den auf die Enkodierung folgenden Schlafphasen, insbesondere während des Deltaschlafes, finden diese neuronalen Reaktivierungen der im Hippokampus

initial aufgenommenen Inhalte wiederholt statt. So kommt es parallel auch zu einer Reaktivierung der entsprechenden Erinnerungsspuren im Neokortex und schließlich zu einem Transfer der reaktivierten Information vom Hippokampus in den Neokortex, d.h. die Langzeitrepräsentationen sind schließlich unabhängig vom Kurzzeitspeicher (Gais et al., 2007; Sutherland & McNaughton, 2000). Die Festigung der Erinnerungen während des Schlafes wird also durch eine Wiederaktivierung genau derjenigen Netzwerke verursacht, die für die Enkodierung von Informationen während des Wachzustands zuständig waren (Buzsáki, 1996).

### **1.2.3 Schlaf und Gedächtnisabstraktion**

Zusätzlich zu den positiven Effekten von Schlaf auf die Gedächtniskonsolidierung wird außerdem eine verstärkende Wirkung von Schlaf auf die Gedächtnisabstraktion, d.h. auf das Herausfiltern der Quintessenz aus der gelernten Information, angenommen (Diekelmann et al., 2010; Payne et al., 2009). Manche Autor:innen fanden jedoch keinen Unterschied oder sogar – im Vergleich zum Wachzustand – eine Verringerung der Gedächtnisabstraktion (Darsaud et al., 2011; Fenn et al., 2009; Lo et al., 2014). Eine Studie von Pardilla-Delgado und Payne (2017) etwa zeigte nach Zeitintervallen von 24 oder 48 Stunden sowohl eine höhere Wiedererkennungsrates für tatsächlich kodierte Stimuli als auch für Gist-Wörter (d.h. für die Oberbegriffe der Wortlisten, „schwarz“ im o.g. Bsp.), wenn Proband:innen nach der Enkodierung schliefen. Gist-Wörter wurden allerdings nur bei „*low performers*“, also bei Proband:innen, deren Gedächtnisleistung im Allgemeinen schlechter war, vermehrt erkannt. Zudem konnten die Forscher:innen eine negative Korrelation zwischen SWS und falschen Erinnerungen nachweisen, was sich mit vorherigen Studien deckt (Payne et al., 2009).

Des Weiteren scheinen sowohl Schlafbeschränkung als auch Schlafentzug zu einer signifikanten Zunahme von falschen Erinnerungen zu führen, was auf eine ungenaue Verarbeitung von aufgenommenen Informationen zurückgeführt wurde (Chatburn et al., 2017). In einer Studie von Diekelmann et al. (2008)

erhöhte Schlafentzug zum Zeitpunkt des Abrufs die Wiedererkennungsrate der Gist-Wörter. Interessanterweise hob die Verabreichung von Koffein vor dem Abruf diesen Effekt auf. Schlaf nach der Enkodierung hingegen führte nicht zu einer gesteigerten Wiedererkennungsrate der Gist-Wörter.

Anders als vorherige Schlafstudien, die sich auf die Abstraktion verbaler Informationen fokussierten, nutzten Lutz et al. (2017) eine nonverbale, visuelle Version des DRM-Paradigmas, welche darauf abzielt, durch Abstraktion neue Muster zu bilden und nicht auf bereits existente, semantische Schemata zurückzugreifen. Die Forscher fanden einen positiven Effekt von Schlaf auf die Gedächtnisabstraktion nach einem Jahr: Der Anteil an wiedererkannten nicht-enkodierten Prototypen, die in diesem Paradigma vergleichbar sind mit den Oberbegriffen („schwarz“ im o.g. Beispiel) des verbalen DRM-Paradigmas, war im Vergleich zu den gelernten visuellen Formen höher, wenn die Proband:innen nach der Enkodierung ein Jahr zuvor schliefen, als wenn sie danach wach gewesen sind. Allerdings zeigten sich bereits kurz nach der Enkodierung hohe Wiedererkennungsraten der Prototypen. Dies lässt vermuten, dass die Gedächtnisabstraktion bereits früher stattfindet, aber Schlaf notwendig ist, um die abstrahierten Gedächtnisspuren auf lange Zeit stabil zu halten.

Vergleichbare Studien kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Gedächtnisabstraktion ein langsamer Prozess ist, der über längere Zeitintervalle hinweg entsteht (Dudai et al., 2015; Squire et al., 2015; Winocur & Moscovitch, 2011).

### **1.3 Hypothesen**

Zusammenfassend möchten wir mit dieser Studie beurteilen, wie sich die Gedächtnisabstraktion im visuellen DRM-Paradigma im Laufe der Zeit entwickelt und ob Schlaf im Anschluss an die Enkodierung einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Gedächtnisabstraktion hat.

Mittels einer abgewandelten Form des visuellen DRM-Paradigmas (Diekelmann et al., 2011; Lutz et al., 2017; Slotnick & Schacter, 2004) soll

Gedächtnisabstraktion hervorgerufen werden – repräsentiert durch Wiedererkennungsraten von abstrakten Prototypen.

Wir erwarten bereits kurz nach Enkodierung hohe Wiedererkennungsraten der Prototypen, insbesondere bei zuvor enkodierten Formen, die eine hohe Ähnlichkeit zum Prototyp aufweisen. Für Formen, die dem Prototyp unähnlich sind, nehmen wir hingegen eine langsamere Abstraktion an.

Wir nehmen zudem an, dass verstärkende Einflüsse des Schlafes auf die Gedächtnisabstraktion bereits nach einer Woche sichtbar werden, sowie, dass deren Auswirkungen auch nach einem Jahr noch ersichtlich sind, wie es zuvor in einer Studie von Lutz et al. (2017) gezeigt werden konnte. Die Erkennungsrate von Prototypen soll, unserer Hypothese nach, bei gleichzeitigem Vergessen der enkodierten Stimuli, nach diesen Zeiträumen also erhöht sein.

## **2 Material und Methoden**

Im Folgenden wird das methodische Gerüst beschrieben, welches in dieser Studie zur Prüfung der dargelegten Hypothesen diente. Getrennt für die getesteten Zeitintervalle wird der entsprechende Versuchsaufbau sowie die Vorgehensweise präzise erläutert.

### **2.1 Abruf nach 20 min und nach einer Woche**

#### **2.1.1 Proband:innen**

An der vorliegenden Studie nahmen 16 gesunde Personen (8 Frauen, 8 Männer) zwischen 18 und 32 Jahren teil. Die Rekrutierung erfolgte über eine Rundmail an der Eberhard Karls Universität Tübingen mit anschließender detaillierter Aufklärung der Proband:innen über den Ablauf der Studie sowie der Prüfung aller notwendigen Voraussetzungen zur Teilnahme. Während der Teilnahme an der Studie waren die Teilnehmer:innen dazu angehalten, an den Versuchsterminen

weder Alkohol noch Medikamente sowie mindestens zwei Tage vor den Terminen kein Koffein zu sich zu nehmen und einen normalen Schlaf-Wach-Rhythmus (d.h. regelmäßiges Zubettgehen zwischen 22:00 und 00:00 Uhr und Aufstehen zwischen 07:00 und 09:00 Uhr) einzuhalten. Es bestanden nach Angaben der Teilnehmer:innen keinerlei neurologische oder psychiatrische Erkrankungen. Alle Proband:innen gaben Deutsch als Muttersprache an. Des Weiteren wurden sie für die Teilnahme finanziell entschädigt (180€, bei vorzeitigem Ausscheiden entsprechend anteilig; dies betraf 2 Proband:innen) und willigten schriftlich in die freiwillige Teilnahme ein. Eine Prüfung der Studie durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Universität Tübingen war im Vorfeld entsprechend der geltenden Richtlinien erfolgt.

### **2.1.2 Design und Ablauf**

Im Rahmen eines *Innersubjekt-Designs* nahmen alle Teilnehmer:innen sowohl an einer Schlaf- als auch an einer Wachbedingung teil, wobei die Startbedingung zuvor pseudorandomisiert wurde. Um Interferenz zu vermeiden resp. deren Risiko zu minimieren, bestand zwischen beiden Bedingungen ein Zeitabstand von mindestens zwei Wochen.

Jede Bedingung beinhaltete drei zu bearbeitende Aufgabentypen: die Enkodierung, d.h. das Lernen von Figurensets, einen Wiedererkennungstest sowie eine Vertrautheitsbewertung (siehe auch Kapitel 2.1.3 *Stimuli und Aufgabe*). Nach der Enkodierung, die in der Schlafbedingung abends und in der Wachbedingung morgens stattfand, absolvierten die Teilnehmer:innen nach 20 Minuten einen ersten Wiedererkennungstest (20-Min-Test) inkl. einer Vertrautheitsbewertung. Je nach Bedingung verbrachten die Proband:innen im Anschluss die Nacht im Schlaflabor (Schlafbedingung) oder wurden ohne anschließenden Schlaf nach Hause entlassen (Wachbedingung).

Eine Woche später fand in jeder Bedingung ein zweiter Wiedererkennungstest (1-Woche-Test) inkl. einer Vertrautheitsbewertung statt. Im Anschluss an die Teilnahme an beiden Bedingungen durchliefen alle Proband:innen einmalig das Set Rating.

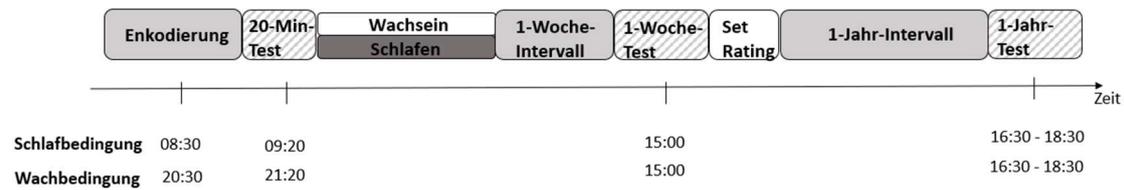


Abbildung 3: Studiendesign

**Studiendesign:** Vergleich der Schlafbedingung und der Wachbedingung im Rahmen des Innersubjekt-Designs.

Die Versuche fanden im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie, Otfried-Müller-Str. 25 in Tübingen, statt. Um eventuelle Einflussfaktoren weitgehend auszuschließen, wurde darauf geachtet, dass die Proband:innen zu jedem Termin in denselben Räumen getestet wurden (dies war in zwei Fällen aus technischen Gründen leider nicht möglich).

Unabhängig von der Startbedingung fanden beim ersten Erscheinen der Proband:innen im Schlaflabor Vortests statt, um die Sehschärfe (Freiburg Vision Test, FrACT) sowie das physiologische Farbsehen (<http://www.colorblindness.com/color-arrangement-test/>) zu verifizieren. Ferner fand an jedem Versuchstag zu Beginn eine kurze Abfrage bzgl. Gesundheit, der Einnahme von Medikamenten/Drogen sowie dem letzten Konsum von Koffein oder Alkohol statt. Alle relevanten Kriterien waren erfüllt, keiner der Proband:innen gab einen entsprechenden unerwünschten Konsum während der Versuchszeit an. Zudem hatten alle eingeschlossenen Proband:innen eine Sehschärfe von  $\geq 100\%$  und keine Farbsehschwächen. Am Ende jeder Sitzung wurden Fragen zu den Gedächtnistests in Bezug auf die subjektive Schwierigkeit des Experiments und ggf. angewandter Techniken gestellt (siehe *Debriefing* im Anhang).

Im Folgenden werden der detaillierte Ablauf der Versuchstage sowie Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen näher erläutert.

## **Schlafbedingung**

Zu einer Eingewöhnungsnacht erschienen die Teilnehmer:innen um 21:30 Uhr im Schlaflabor, um eine Reihe von ersten Tests zu durchlaufen (Wortflüssigkeitstest (Aschenbrenner et al., 2000), Händigkeitstest (Oldfield, 1971) sowie eine Nacht im Schlaflabor (23:00 bis 07:00 Uhr) inkl. polysomnographischer Aufzeichnung zu verbringen. Nach Ausfüllen eines Schlafqualitäts-Fragebogens (*Schlaffragebogen A/Revidierte Fassung SF-A/R*; Görtelmeyer (2011)) verließen die Proband:innen das Schlaflabor.

Zwei bis drei Tage nach der Eingewöhnungsnacht erschienen die Proband:innen um 20:15 Uhr zu der Experimentalnacht, während sie nach einigen ersten Tests (Vigilanztest (Diekelmann et al., 2013) und Angabe der subjektiven Schläfrigkeit (SSS) (Hoddes et al., 1972)) mit der Enkodierungssitzung um 20:30 Uhr begannen. Nach der Aufgabe wurden die Proband:innen erneut auf ihre Schläfrigkeit (SSS) getestet. Nach einer 20-minütigen Pause, in der entspannende Musik abgespielt wurde (Lutz et al., 2017), absolvierten sie einen ersten Wiedererkennungstest (20-Min-Test) sowie eine Vertrautheitsbewertung. Im Anschluss wurde ein Digit Span Test sowie ein Debriefing durchgeführt. Die Proband:innen gingen gegen 22:50 Uhr zu Bett, bevor um 23:00 Uhr das Licht gelöscht wurde.

In der Experimentalnacht erfolgte eine polysomnographische Aufzeichnung sowie eine Messung der Bewegungsaktivität mittels Aktigraphie (*MotionWatch 8*®, CamNtech Ltd., Cambridge, UK). Die entsprechenden Elektroden wurden während der 20-minütigen Pause sowie nach der Vertrautheitsbewertung angebracht und die *MotionWatch* wurde vor dem Zubettgehen ausgehändigt. Unmittelbar nach dem Wecken der Proband:innen um 7:00 Uhr füllten sie einen Fragebogen zur subjektiven Schlafqualität (*Schlaffragebogen A/Revidierte Fassung SF-A/R*; Görtelmeyer (2011)) aus und verließen nach entsprechenden Instruktionen (siehe Abschnitt *1-Woche-Intervall*) das Labor.

## ***Wachbedingung***

Die Enkodierungssitzung begann in der Wachbedingung um 8:00 Uhr mit einigen Vortests (Vigilanztest (Diekelmann et al., 2013) und SSS (Hoddes et al., 1972)) und der eigentlichen Enkodierung um 08:30 Uhr. Wie in der Schlafbedingung folgte daraufhin eine 20-minütige Pause mit entspannender Musik sowie ein erster Wiedererkennungstest inkl. der Vertrautheitsbewertung (20-Min-Test). Außerdem fand anschließend ein Digit Span Test sowie ein Debriefing statt. Das Institut wurde gegen 10:30 Uhr mit Instruktionen (siehe Abschnitt *1-Woche-Intervall*) verlassen.

## ***1-Woche-Intervall***

In beiden Bedingungen wurde den Proband:innen für die Zeitspanne von einer Woche, die sie zwischen den Versuchstagen zuhause verbrachten, eine *MotionWatch* ausgehändigt. Zudem erfolgten entsprechende Instruktionen zum Umgang mit dieser sowie zum Ausfüllen des Schlafstagebuchs (siehe Anhang). Während der Zeit zuhause waren die Proband:innen ausdrücklich dazu angehalten, keinen Mittagsschlaf zu halten sowie einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus einzuhalten, keinen Alkohol und spätestens zwei Tage vor dem nächsten Versuchstag kein Koffein zu sich zu nehmen.

## ***Abruf nach einer Woche (1-Woche-Test)***

Eine Woche nach der Experimentalsitzung erfolgten in jeder Bedingung die 1-Woche-Tests, d.h. der Wiedererkennungstest sowie die Vertrautheitsbewertung, welche am Nachmittag um 15:00 Uhr durchgeführt wurden. Zuvor wurde wiederum die Vigilanz sowie die subjektive Schläfrigkeit überprüft. Teil dieses Termins waren zudem ein Digit Span Test sowie die Fragebögen PSQI (*Pittsburgh Sleep Quality Index*; Buysse et al., 1989) und MEQ (*Morningness-Eveningness Questionnaire*; Horne & Ostberg, 1976).

## **Set-Rating**

Alle Teilnehmer:innen durchliefen nach Ablauf der beiden Bedingungen zudem eine abschließende Bewertungssitzung, welche ein bis zwei Wochen nach der letzten Erkennungssitzung in denselben Räumlichkeiten um 15:00 Uhr stattfand. Nach entsprechender Testung der Vigilanz und der Schläfrigkeit absolvierten die Teilnehmer:innen die eigentliche Aufgabe und verließen das Labor gegen 16:15 Uhr.

### **2.1.3 Stimuli und Aufgabe**

Die verwendeten Stimuli-Sets bestanden jeweils aus zehn abstrakten Formen, die von einem einzelnen Prototyp abgeleitet wurden (Slotnick & Schacter, 2004). Für die Zwecke dieser Studie wurden alle Figurensätze jeweils in zwei Teilmengen geteilt, die anhand einer unabhängigen Gruppe von Proband:innen im Voraus nach ihrer Ähnlichkeit zum jeweiligen Prototypen bewertet wurden (Lutz et al., 2017). Eine Teilmenge enthält fünf Formen, die dem Prototyp ähnlicher sind („ähnliche Formen“); die andere Teilmenge enthält hingegen fünf Formen, die dem Prototyp weniger ähnlich sind („unähnliche Formen“). Im Folgenden wird die Präsentation der Formen während der einzelnen Aufgaben näher erläutert.

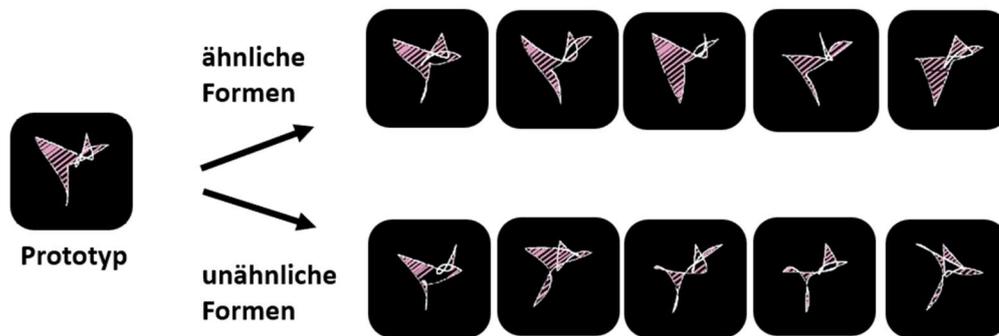


Abbildung 4: Beispiel eines Figurenssets inkl. Prototyp

**Beispiel eines Figurenssets inkl. Prototyp:** Jedes Set bestand aus 10 abstrakten Formen, die alle von einem Prototyp abgeleitet wurden. Darstellung der beiden Teilmengen (ähnlich/unähnlich).

### **Enkodierung**

In jeder Bedingung (Schlaf-/Wach-) lernten die Proband:innen während der Enkodierungssitzung 40 Figurenssets aus je fünf abstrakten Formen, wobei die Hälfte der Sets als ähnliche Formen und die andere Hälfte als unähnliche Formen gezeigt wurde. Insgesamt wurden also pro Bedingung 200 abstrakte Figuren gelernt, wobei die Prototypen der einzelnen Sets zu keinem Zeitpunkt gesehen wurden. Die einzelnen Figuren eines Sets wurden dabei zweimal hintereinander in derselben Reihenfolge gezeigt. Über diese Wiederholung der Figuren wurden die Proband:innen im Voraus informiert. Alle Formen eines Sets wurden nacheinander auf derselben Bildschirmseite (links/rechts) angezeigt und erschienen für jeweils 2,5 Sekunden mit einer Pause von drei Sekunden zur darauffolgenden Figur. Die Aufgabe der Proband:innen bestand darin, sich die visuellen Merkmale der Formen sowie deren Position auf dem Bildschirm so genau wie möglich einzuprägen. Eine spätere Überprüfung der

Gedächtnisleistung in Bezug auf das Wiedererkennen der Figuren wurde vor der Enkodierung angekündigt. Die Enkodierung dauerte ca. 45 min.

Um die Vergleichbarkeit zwischen Bedingungen und Gruppen sicherzustellen, wurde die Präsentation von ähnlichen oder unähnlichen Formen eines Sets zwischen den Teilnehmern ausgeglichen. Ferner wurden auch die Seiten (rechts/links) der Darstellung ausgeglichen. Zudem wurde auf die Abbildung von mehr als drei ähnlichen oder drei unähnlichen Sets hintereinander verzichtet.

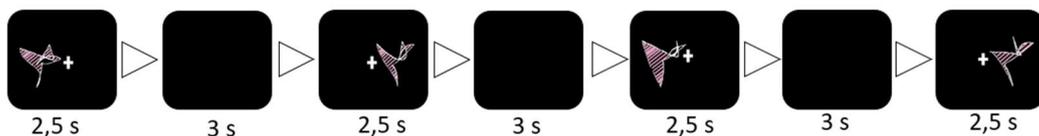


Abbildung 5: Enkodierung

**Enkodierung:** Insgesamt wurden 40 Sets à 5 Figuren (entweder ähnliche Formen oder unähnliche Formen) dargestellt. Die Figuren wurden entweder links oder rechts auf dem Bildschirm präsentiert. Die Darstellung erfolgte jeweils für 2,5 Sekunden, woraufhin die Proband:innen für 3 Sekunden einen schwarzen Bildschirm sahen. Im Anschluss wurde die nächste Figur dieses Sets für 2,5 Sekunden gezeigt, usw. Jedes Set wurde einmal wiederholt.

### **Wiedererkennungstest und Vertrautheitsbewertung**

Die Hälfte der enkodierten Sets wurde nach einer 20-minütigen Pause in Bezug auf Wiedererkennungsraten getestet (20-Min-Test), die andere Hälfte eine Woche nach Enkodierung (1-Woche-Test). Dem Wiedererkennungstest folgte jeweils eine Vertrautheitsbewertung.

Im Wiedererkennungstest wurden den Teilnehmer:innen in der Mitte des Bildschirms einzelne Formen präsentiert. Sie sollten hierbei pro Set folgende Arten von Formen bewerten: eine „alte“ Form aus der enkodierten (z.B.

ähnlichen) Teilmenge, eine „verwandte“ Form aus der nicht enkodierten (z.B. unähnlichen) Teilmenge, zwei „neue“ Formen aus nicht enkodierten, unterschiedlichen Sets und der nicht enkodierte Prototyp. Für jede Form sollten die Proband:innen angeben, ob diese ihrer Einschätzung nach „alt“ (also während der Enkodierung gesehen wurde) oder „neu“ war (also nicht gesehen wurde). Wenn die Form als „alt“ eingeschätzt wurde, sollte zusätzlich die Position auf dem Bildschirm während der Enkodierung angegeben werden (Auswahl „alt links“, „alt rechts“ oder „neu“). Für jede Form, die die Proband:innen als „alt“ einstufen, sollten sie zusätzlich angeben, ob sie sich an die Form „erinnern“ oder ob sie lediglich „wissen“ oder „raten“. „Erinnern“ meint hier, dass sich die Proband:innen beispielsweise bewusst daran erinnern, was sie in dem Moment dachten, während sie die Figur enkodierten, und ist demnach die stärkste Expression. „Wissen“ sollte angegeben werden, wenn es keine solcher detaillierten Erinnerungen gab und „Raten“, wenn lediglich geraten wurde. Über diese Differenzierung der Begriffe wurden die Proband:innen vor Absolvieren der Aufgabe aufgeklärt. Außerdem sollten sie so schnell wie möglich, aber auch so genau wie möglich antworten, wobei es keine explizite Zeitvorgabe gab. Des Weiteren wurde für jede Form mittels einer 4-Punkte-Skala abgefragt, wie sicher sich die Proband:innen in ihrer Einschätzung waren (1 = sehr unsicher bis 4 = sehr sicher).

Im Anschluss erfolgte eine Vertrautheitsbewertung, bei der den Teilnehmer:innen drei Formen (1 Prototyp, 1 alte Form [z.B. ähnlich], 1 verwandte Figur [z.B. unähnlich]) gleichzeitig präsentiert wurden. Ihre Aufgabe bestand darin, diese absteigend nach ihrer subjektiven Vertrautheit zu ordnen, d.h. von der Figur, die ihnen am bekanntesten erschien, bis zu der Figur, die ihnen am wenigsten bekannt erschien. Danach sollten die Proband:innen auf einer 4-Punkte-Skala angeben, wie sicher sie sich mit ihrer Angabe gewesen sind (1 = sehr unsicher bis 4 = sehr sicher). Pseudorandomisiert wurde ein Drittel der Sets ausgewählt, das mit alten Formen begonnen hat, ein weiteres Drittel, das mit verwandten Formen begonnen hat und ein letztes Drittel, das mit Prototypformen begonnen hat. Des Weiteren wurde sichergestellt, dass der gleiche Stimulus-Typ aus den verschiedenen Sets, also alte, verwandte oder Prototypformen, nicht mehr als

zweimal hintereinander präsentiert wurde. Ebenso erfolgte eine Randomisierung für jede:n Teilnehmer:in.

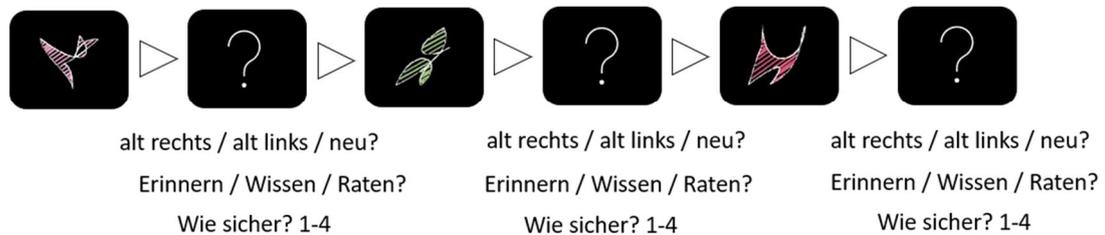
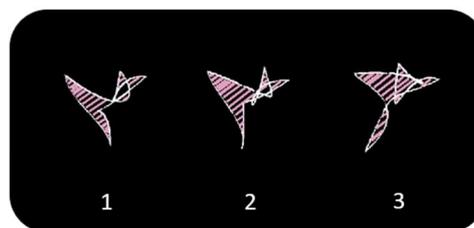


Abbildung 6: Wiedererkennungstest

**Wiedererkennungstest:** Präsentation von fünf Formen pro Set, jeweils in der Mitte des Bildschirms (1 alte, 1 verwandte, 2 neue Formen sowie der Prototyp). Bei jeder gezeigten Form sollten die Proband:innen angeben, ob sie die Form kennen und, wenn ja, auf welcher Seite des Bildschirm sie erschien (alt rechts/alt links) oder ob die Figur neu ist. Zudem wurde jeweils abgefragt, ob sie sich erinnern, wissen oder raten und wie sicher sie sich ihrer Aussage sind (1 = sehr unsicher bis 4 = sehr sicher).



Absteigend nach Vertrautheit ordnen  
Wie sicher? 1-4

Abbildung 7: Vertrautheitsbewertung

**Vertrautheitsbewertung:** Direkt im Anschluss an den Wiedererkennungstest sollten die Proband:innen drei Formen (1 Prototyp, 1 alte Form, 1 verwandte Form) nach ihrer Vertrautheit (absteigend von am vertrautesten bis am wenigsten vertraut) ordnen. Zudem sollten sie wiederum angeben, wie sicher sie sich ihrer Aussage sind (1 = sehr unsicher bis 4 = sehr sicher).

## Set-Rating

Um der Frage nachzugehen, ob die verwendeten Prototypen tatsächlich die Sets prototypisch repräsentieren, sahen die Proband:innen in einem abschließenden Test nacheinander alle 80 Formensets inkl. der jeweiligen Prototypen (d.h. alle 10 Formen eines Sets + den ursprünglich nicht enkodierten Prototyp = 11 Formen). Ihre Aufgabe bestand nun darin, zwei Formen auszuwählen, die ihrer Meinung nach das Set am besten repräsentierten, d.h. prototypisch für das Set sind. Die erste Wahl sollte auf die Form fallen, die dies ihrer Meinung nach am besten tut.

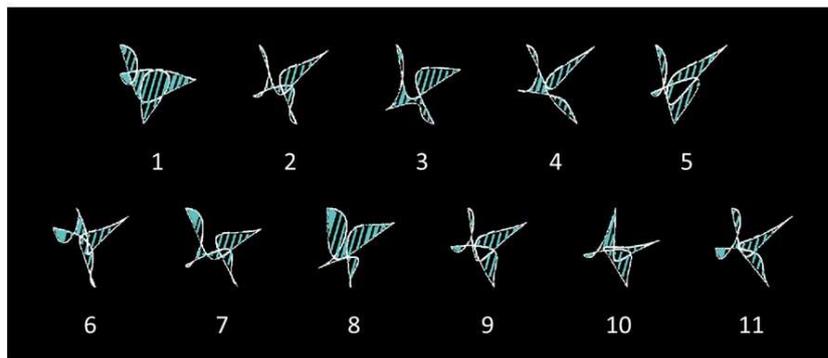


Abbildung 8: Set Rating (Beispiel-Set)

**Set Rating (Beispiel-Set):** Präsentiert wurden alle 80 Formensets inkl. des jeweiligen Prototyps (Nr. 9). Die Teilnehmer:innen sollten jeweils zwei Formen wählen, die das Set ihrer Meinung nach am besten repräsentieren.

#### 2.1.4 Polysomnographie

Eine polysomnographische Aufzeichnung erfolgte sowohl in der Eingewöhnungsnacht als auch in der Experimentalnacht, wobei erstere hauptsächlich der Eingewöhnung diente und ausschließlich letztere in die Datenauswertung einbezogen wurde.

Insgesamt wurden 15 Elektroden platziert. Zur Messung der elektrischen Hirnaktivität mittels eines Elektroenzephalogramms (EEG) wurden nach entsprechender Vermessung des Schädels die Elektroden C3, C4, F3, F4, P3, P4, O1, O2 auf der Kopfhaut angebracht, welche alle gegen zwei Elektroden an den Mastoiden referenziert wurden. Ferner wurde eine Ground Elektrode (Erdung) zentral auf der Stirn platziert. Zur Aufzeichnung der Muskelaktivität (Elektromyogramm, EMG) wurden zwei bipolare Elektroden am Kinn genutzt, während die Aufzeichnung der Augenbewegungen (Elektrookulographie, EOG) über zwei bipolare Elektroden über/unter den Augen erfolgte. Das Signal wurde ungefiltert mit einer Abtastrate von 500 Hz aufgezeichnet. Für das Schlafscoring wurden für EEG und EOG Filter mit einer Frequenz von 0.16 Hz (Hochpass) und 30 Hz (Tiefpass) bzw. für das EMG Filter mit einer Frequenz von 5.31 Hz (Hochpass) und 90 Hz (Tiefpass) angewandt. Zusätzlich wurde ein Notch-Filter mit einer Frequenz von 50 Hz verwendet. Das Schlafscoring erfolgte manuell nach Standardkriterien (Rechtschaffen und Kales, 1968).

Offline-Analysen von langsamen Oszillationen (*engl. slow oscillations, SO*) und Schlafspindeln wurden mit Hilfe von in *SpiSOP* (RRID:SCR\_015673) implementierten Algorithmen durchgeführt (basierend auf den Schlafstadien S2, S3 und S4 mit Standardparametern). Spindeln wurden in einem Bereich von  $\pm 1$  Hz um die individuelle Frequenzspitze (Mittelwert = 13,22; SD = 0,5) im Spindelfrequenzbereich auf der Grundlage kanalgemittelter Leistungsspektren erkannt. Unser Fokus lag auf den posterioren Spindeln und den frontalen langsamen Oszillationen, d. h. dort, wo sie bei jungen gesunden Erwachsenen ihre maximale Amplitude erreichen (Klinzing et al., 2016), daher wurden die Messungen der Spindeln für die vorliegende Studie über die Elektroden P3, P4, O1 und O2 und die Messungen der langsamen Oszillationen über die Elektroden F3 und F4 gemittelt (vgl. Lutz et al., 2021). Das gleichzeitige Auftreten von

Spindeln und langsamen Oszillationen wurde auf zwei Arten bewertet. Zunächst wurde für jeden Teilnehmer und jede Elektrodenstelle der Prozentsatz der Spindeln, die mit einer langsamen Oszillation (SO-Tal)  $\pm 1,2$  s um das Spindeltal zusammenfielen, bestimmt und dann über alle Elektrodenstellen gemittelt. Ferner wurden nur für Spindeln, die mit einer langsamen Oszillation zwischen den beiden negativen und positiven Nulldurchgängen einer langsamen Oszillation zusammenfielen (Denis et al., 2021; Kurz et al., 2022), das Signal ( $\pm 3$  s um den SO-Trog) in der niedrigen Phase gefiltert, d. h. mit einem Hochpassfilter von 0,3 Hz und einem Tiefpassfilter von 3,5 Hz. Dasselbe Signal wurde dann in der hohen amplitudengebenden Frequenz gefiltert, d. h. wiederum  $\pm 1$  Hz um die individuell bestimmte Spindelfrequenzspitze. Die Hilbert-Transformation wurde dann auf jede Zeitreihe angewandt, um die momentane Phase des SO-gefilterten Signals bzw. die momentane Amplitude des Spindelfrequenz-gefilterten Signals zu extrahieren. Für jedes SO-Spindel-Ereignis wurde dann die SO-Phase am Amplitudenmaximum der Spindel extrahiert und mit Hilfe der *circstat-Toolbox* (Berens, 2009) in *Matlab* über die Elektroden eines Teilnehmers gemittelt.

Während des Anbringens sowie unmittelbar vor der Aufzeichnung wurden die jeweiligen Impedanzen gemessen, welche maximal  $5\Omega$  betragen. Zur Verringerung des Hautwiderstandes wurden die entsprechenden Hautareale zuvor jeweils mit Alkohol und einer Peeling-Paste gereinigt. Die Elektroden wurden mittels einer Leitpaste angebracht und zusätzlich mit Klebeband befestigt. Aufgrund allergischer Hautreaktionen zweier Teilnehmer:innen auf die Leitpaste wurde bei den darauffolgenden Proband:innen auf selbstklebende Elektroden für das Gesicht umgestellt.

## **2.2 Abruf nach einem Jahr (1-Jahr-Test)**

### **2.2.1 Proband:innen**

Die Proband:innen der Hauptstudie wurden nach ca. einem Jahr per Universitätsmail erneut kontaktiert und über den Ablauf der Nacherhebung informiert. So konnten 12 der ursprünglich 16 Proband:innen für eine erneute Teilnahme gewonnen werden. Sie willigten schriftlich in die freiwillige Teilnahme ein und wurden für diese finanziell entschädigt (25€). Nach anamnestischer Befragung gaben die Proband:innen weder neu entstandene neurologische oder psychiatrische Erkrankungen, noch eine Verschlechterung ihres Visus / Farbensehens an.

### **2.2.2 Design / Ablauf**

Die Testung fand zwischen 16:30 und 18:30 Uhr in denselben Räumlichkeiten wie vor einem Jahr statt. Die Proband:innen waren dazu angehalten, am Tag des Versuchs kein Koffein sowie keinen Alkohol zu sich zu nehmen.

### **2.2.3 Stimuli und Aufgabe**

Im Rahmen eines *two-alternative-forced-choice* Tests (2-AFC-T) sahen die Proband:innen jeweils zwei Formen gegenübergestellt, wobei es sich entweder um eine alte Form, d.h. eine Form, die sie damals während der Enkodierung gesehen hatten und eine neue Form oder um einen Prototyp sowie eine neue Form handelte. Die Aufgabe bestand im ersten Schritt darin, zu entscheiden, welche der beiden Formen ihnen vertrauter vorkommt und im zweiten Schritt auf einer 4-Punkte-Skala anzugeben, wie sicher sie sich bei ihrer jeweiligen Antwort sind (1 = sehr unsicher bis 4 = sehr sicher). Nach einigen abschließenden Fragen zum Test verließen sie das Labor nach ca. 40 min.

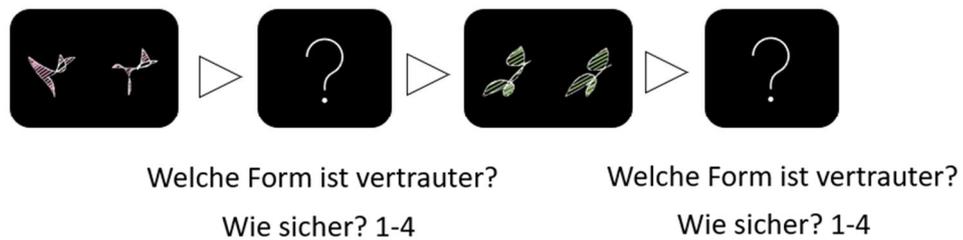


Abbildung 9: 1-Jahr-Test

**1-Jahr-Test:** Gegenübergestellt wurden entweder eine alte Figur und eine neue Figur oder ein Prototyp und eine neue Figur. Nach jeder Darstellung sollten die Proband:innen jeweils angeben, welche der beiden Figuren ihnen vertrauter erscheint und wie sicher sie sich ihrer Aussage sind (1 = sehr unsicher bis 4 = sehr sicher).

### 2.3 Datenauswertung

Die Verhaltensdaten wurden mit *Matlab/Psychtoolbox* erfasst. Als Maß für die Gedächtnisabstraktion wurde die Wiedererkennungsrates für die Prototypen gewählt, wohingegen das Maß für das episodische Gedächtnis die Wiedererkennungsleistung für alte Formen war.

Zur Abschätzung des Schlaf-Wach-Rhythmus der Teilnehmer:innen wurden Aktigraphiedaten, d.h. Daten über Bewegung sowie Aktivität der Proband:innen, erhoben, die durch zusätzliche Fragebögen ergänzt wurden. Die Teilnehmer:innen wurden gebeten, beim Ausschalten des Lichts am Abend und beim Aufstehen am Morgen durch Betätigen eines Knopfes auf dem Aktigraphen (tragbar am Handgelenk, ähnlich einer Armbanduhr) einen Marker zu setzen. Im Fragebogen sollten die Probanden angeben, wann sie das Licht ausgeschaltet haben, wann sie eingeschlafen sind, wie oft und wie lange sie in der Nacht wach waren und wann sie am Morgen aufgestanden sind. Als *Zeit im Bett* wurde die Zeitspanne zwischen dem Ausschalten des Lichts und dem Aufstehen berechnet,

während die *Schlafdauer* als die Zeitspanne zwischen dem Einschlafen und dem Aufwachen festgelegt wurde. Ferner wurde die zeitliche Differenz zwischen dem Ausschalten des Lichts und dem Einschlafen als *Einschlaf-Latenzzeit* bestimmt. Wenn Proband:innen nach dem Einschlafen nochmals aufwachten, wurde diese Zeit ebenso erfasst. Die Analyse der Aktigraphiedaten wurde mittels *Motionware*-Software unter Verwendung eines Standardalgorithmus durchgeführt.

## **2.4 Statistische Analyse**

Für alle statistischen Analysen wurden zweiseitige Tests gewählt. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p = 0,05$  festgelegt. Es wurden ANOVAs mit wiederholten Messungen, wie sie in *jamovi* (<https://www.jamovi.org/>) implementiert sind, in Kombination mit nachfolgenden t-Tests durchgeführt. Die Greenhouse-Geisser-Korrektur der Freiheitsgrade wurde angewendet, wenn die Annahme der Sphärizität verletzt war. In diesen Fällen werden die ursprünglichen Freiheitsgrade und korrigierten p-Werte angegeben.

## **3 Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Studie dargelegt. Entsprechend der beschriebenen Methodik wird hierbei Bezug genommen auf die zeitliche Entwicklung der Gedächtnisabstraktion, den Einfluss des Schlafes sowie die Rolle einzelner Stimulustypen.

### **3.1 Abruf nach 20 min und nach einer Woche**

Die Analyse des Wiedererkennungstests wurde mit einer Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren *Zeit* (20-Min-Test/1-Woche-Test) und *Stimulustyp* (alt/neu/Prototyp) durchgeführt. Es zeigte sich, dass alte Formen und Prototypen ähnlich oft und im Vergleich zu neuen Formen signifikant häufiger „wiedererkannt“, d.h. von den Proband:innen als alte Formen eingestuft wurden

(Haupteffekt des Stimulustyps,  $F(2,30) = 41,5$ ;  $\eta_p^2 = 0,732$ ;  $p < ,001$ ; Post-hoc Vergleich: alt vs. Prototyp,  $t(15) = 1,15$ ;  $p = ,267$ ; alt vs. neu,  $t(15) = 7,12$ ;  $p < ,001$ ; Prototyp vs. neu,  $t(15) = 7,61$ ;  $p < ,001$ ; siehe *Abbildung 10*). Nach dem Retentionsintervall von einer Woche waren die Wiedererkennungsraten im Vergleich zum Abruf nach 20 min etwas geringer (Haupteffekt von 20-Min-Test/1-Woche-Test),  $F(1,15) = 3,42$ ;  $\eta_p^2 = 0,185$ ;  $p = ,084$ ).

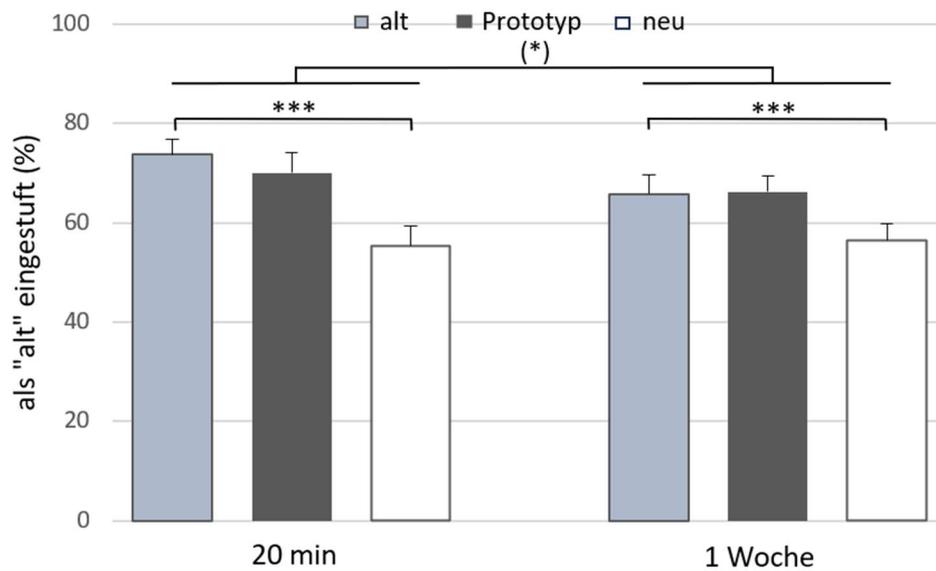


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung der Wiedererkennungsraten

**Zeitliche Entwicklung der Wiedererkennungsraten:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ) für den 20-Min-Test und den 1-Woche-Test, jeweils Vgl. alt/neu/Prototyp. \*\*\* $p < 0,001$ ; (\*)  $p < 0,1$ .  $N = 16$ .

### 3.2 Abruf nach einem Jahr

Die Analyse des *two-alternative-forced-choice* Tests (2-AFC) wurde mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit dem Faktor *Stimulustyp* (alt/Prototyp) durchgeführt, welche eine signifikant höhere Wiedererkennungsraten für Prototypen ergab (Haupteffekt des Stimulustyps,  $F(1,11) = 5,45$ ;  $\eta_p^2 = 0,33$ ;  $p = ,039$ ; *Abbildung 11*).

Die Ergebnisse zeigen, dass Prototypen, die während des Lernens nicht gesehen wurden, somit bereits während oder unmittelbar nach der Enkodierung entwickelt werden und über Intervalle von einer Woche und einem Jahr hinweg stabil bleiben.

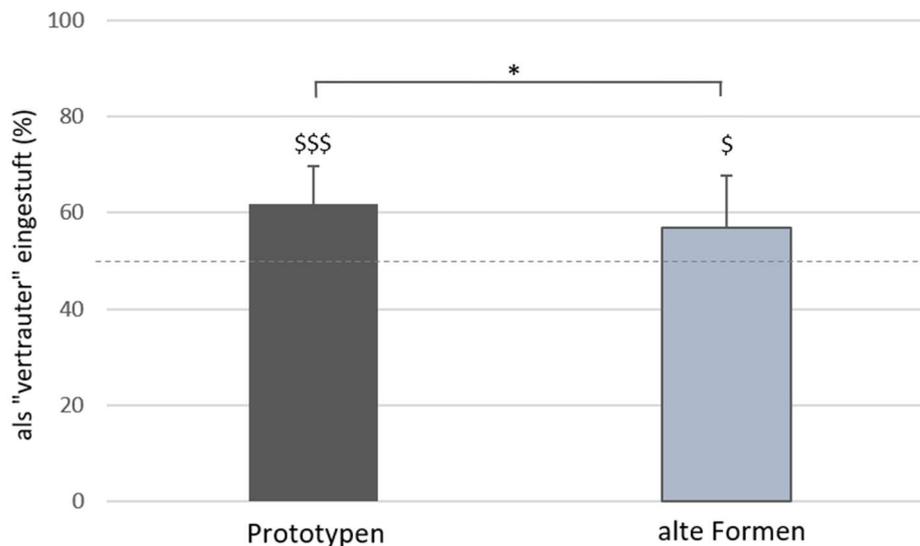


Abbildung 11: Wiedererkennungsraten 1-Jahr-Test, Vgl. Prototypen/alte Formen

**Wiedererkennungsraten 1-Jahr-Test, Vgl. Prototypen/alte Formen:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ). \* $p < 0,05$  für Vgl. zwischen den Stimulustypen; \$\$\$ $p < 0,001$ ; \$ $p < 0,05$  für Vgl. bzgl. Zufallsniveau (50%).  $N = 16$ .

### 3.3 Vergleich Schlaf / Wachheit (1-Woche-Test und 1-Jahr-Test)

Um den Einfluss von Schlaf auf die Gedächtnisabstraktion zu untersuchen, wurde eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren *Schlaf/Wachheit*, *Zeit* (20min/1-Woche) und *Stimulustyp* (alt/neu/Prototyp) durchgeführt. Beim Vergleich der Schlaf- und der Wachbedingung zeigten sich Leistungsunterschiede bzgl. der Wiedererkennungsraten im Verlauf einer Woche (Schlaf/Wachheit x 20-Min-Test/1-Woche-Test,  $F(1,15) = 5,94$ ;  $\eta_p^2 = 0,284$ ;  $p = ,028$ ).

Post-hoc Tests zeigten, dass diese Schlaf/Wachheit x 20-Min-Test/1-Woche-Test Interaktion auf eine verringerte Leistung bei alten Formen nach der Konsolidierung während des Schlafes zurückzuführen war ( $t(15) = 2,90$ ;  $p = ,011$ ); keiner der anderen Vergleiche war signifikant,  $p \geq ,081$ ; Abbildung 12. Entgegen der Hypothese entwickelten sich die Wiedererkennungsraten in Abhängigkeit von Schlaf nicht unterschiedlich für verschiedene Stimulustypen (Schlaf/Wachheit x 20-Min-Test/1-Woche-Test x Stimulustyp,  $F(2,30) = 0,45$ ;  $p = ,642$ ). Darüber hinaus war die 2-AFC-Leistung nach einem Jahr für die Stimulussets, die in den Schlaf- und Wach-Bedingungen gesehen wurden, gleichwertig (kein Haupteffekt von Schlaf/Wachheit,  $F(1,11) = 0,00$ ;  $p = 1,00$ ) und unabhängig vom Stimulustyp (keine Schlaf/Wachheit x Stimulus-Interaktion,  $F(1,11) = 0,33$ ;  $p = ,577$ ) (Abbildung 13).

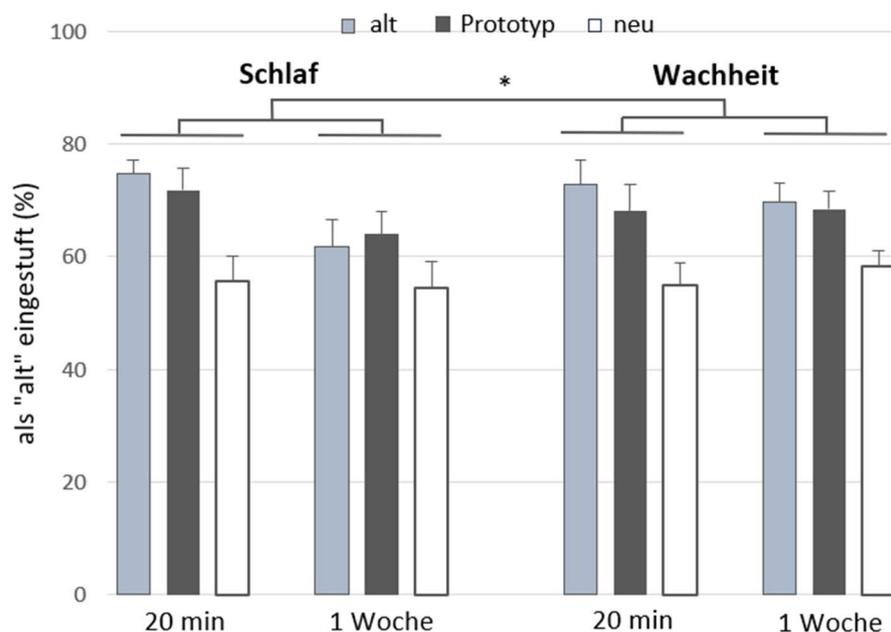


Abbildung 12: Wiedererkennungsraten 20-Min- und 1-Woche-Test, Vgl. Schlaf/Wachheit

**Wiedererkennungsraten 20-Min- und 1-Woche-Test, Vgl. Schlaf/Wachheit:  $*p < 0,05$ .  $N = 16$ .**

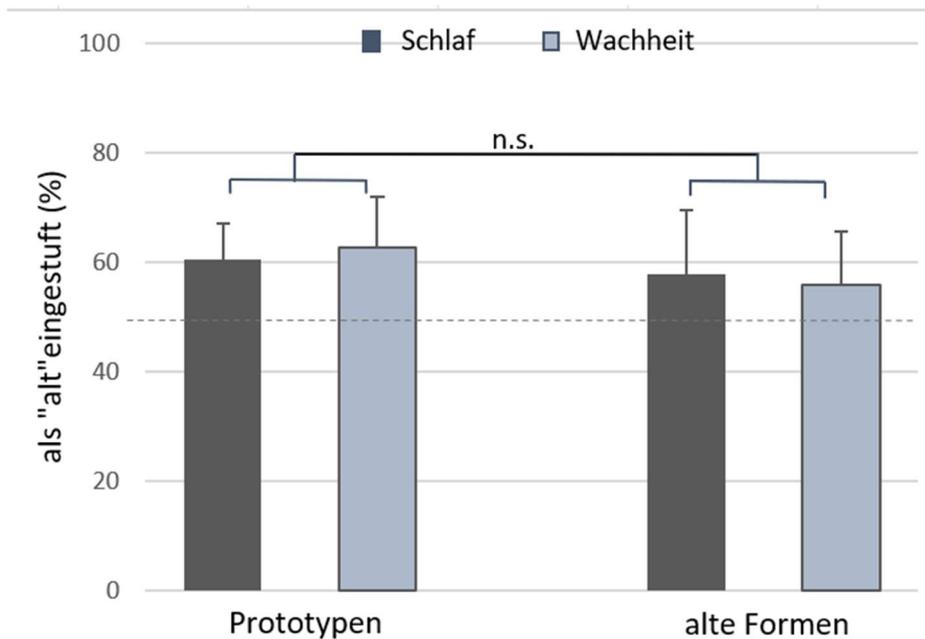


Abbildung 13: Wiedererkennungsraten 1-Jahr-Test, Vgl. Schlaf/Wachheit

**Wiedererkennungsraten 1-Jahr-Test, Vgl. Schlaf/Wachheit:** *n.s.*, nicht signifikant.  $N = 16$ .

Im Gegensatz zur Studie von Lutz et al. (2017) konnte in der vorliegenden Studie kein verstärkender Effekt von Schlaf auf die Gedächtnisabstraktion festgestellt werden. Dies hängt möglicherweise mit der Manipulation der Figurensets bzgl. ähnlicher und unähnlicher Formen zusammen, was weiter unten diskutiert wird. Zur weiteren Analyse wurde hierzu eine Varianzanalyse mit einem vierten Faktor (ähnlich/unähnlich) durchgeführt. Diese Analyse beschränkte sich auf alte Formen und Prototypen, da neuen Formen keine ähnlichen oder unähnlichen Merkmale zugeordnet werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass die Enkodierung von ähnlichen oder unähnlichen Figuren in keiner Bedingung signifikante Veränderungen in der Wiedererkennungsleistung hervorbrachte (keine Haupt- oder Interaktionseffekte,  $p \geq ,148$ ).

Die Analysen nach einem Jahr (1-Jahr-Test) zeigten diesbezüglich, dass der Vorteil für Prototypen bei unähnlichen Figurensets marginal stärker ausgeprägt war (ähnlich/unähnlich x Stimulustyp-Interaktion,  $F(1,11) = 3,76$ ;  $\eta_p^2 = 0,255$ ;  $p =$

,079; Post-hoc-Tests: unähnlich,  $t(11) = 2,54$ ;  $p = ,027$ ; ähnlich,  $t(11) = 0,49$ ;  $p = ,636$ ; Abbildung 14. Dieser Effekt war jedoch unabhängig davon, ob die Teilnehmer nach der Enkodierung geschlafen haben oder wach geblieben sind (ähnlich/unähnlich  $\times$  Schlaf/Wachheit  $\times$  Stimulustyp,  $F(1,11) = 0,01$ ;  $p = ,927$ ).

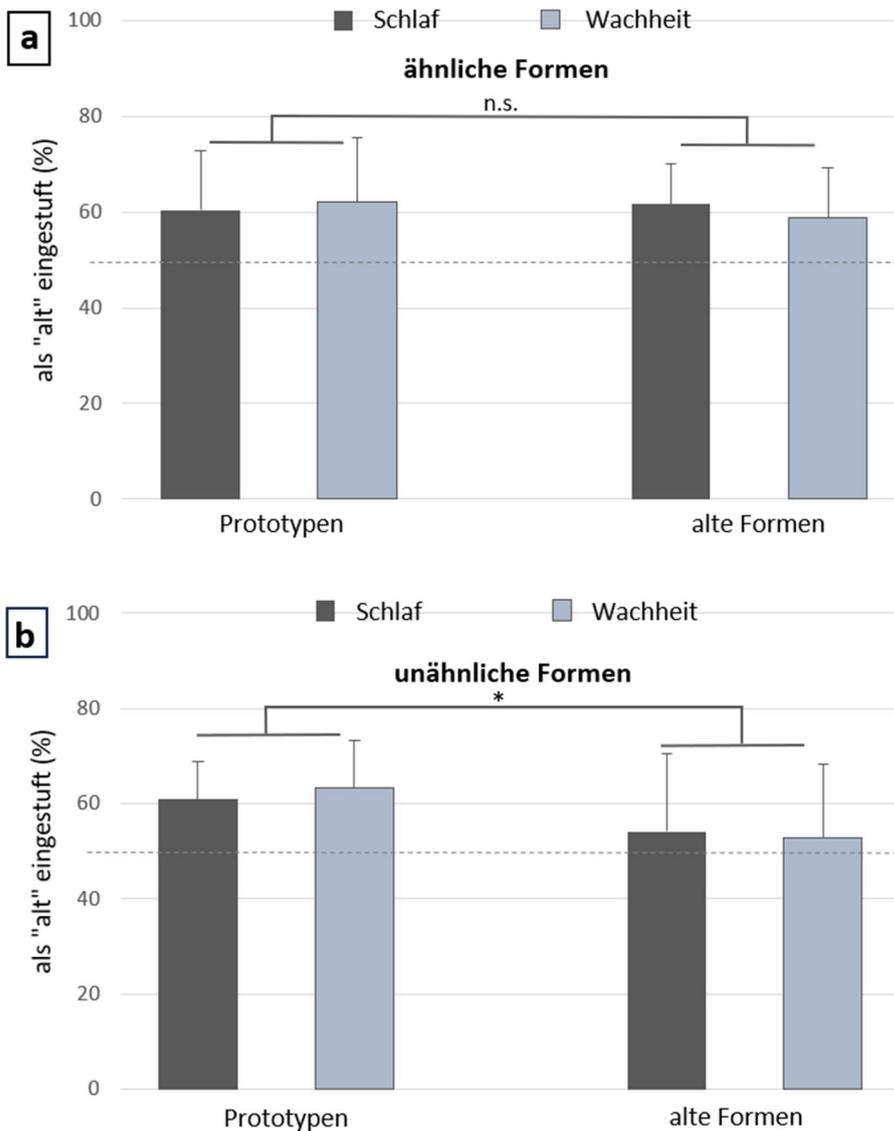


Abbildung 14: 1-Jahr-Test, ähnliche und unähnliche Formen

**1-Jahr-Test, ähnliche und unähnliche Formen:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ). Vgl. Schlaf/Wachheit für ähnliche (a) und unähnliche (b) Formen. Post-hoc-Tests deuten darauf hin, dass eine bevorzugte Konsolidierung von Prototypen selektiv für unähnliche Formen erfolgt (ähnlich/unähnlich  $\times$  Stimulustyp,  $p = 0,79$ ). \* $p < 0,05$ ; nicht signifikant.  $N = 12$ .

### 3.4 Kontrolltests

Um zu untersuchen, ob die Prototypen in den Versuchen tatsächlich prototypisch für die gesamten Formen eines Sets waren – wie zuvor angenommen (Diekelmann et al., 2011; Lutz et al., 2017) – wurden in vorliegender Studie mehrere Kontrolltests durchgeführt. Zunächst wurden die Wiedererkennungsraten für Prototypen direkt mit denen für verwandte Formen verglichen. Beide Stimulustypen wurden während der vorherigen Enkodierung nicht gesehen. Prototypen wurden signifikant häufiger als "alt" eingestuft als verwandte Formen ( $t(15) = 4,77$ ;  $p < ,001$ ; Abbildung 15), was darauf hindeutet, dass Prototypen qualitativ von anderen Formen derselben Gruppe abweichen, die ebenfalls zuvor nicht gesehen wurden.

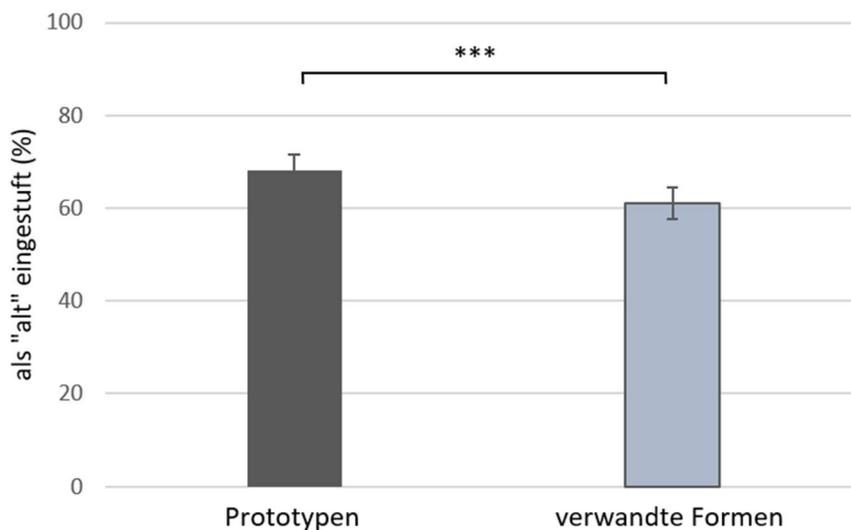


Abbildung 15: Vergleich Prototypen/verwandte Formen

**Vergleich Prototypen/verwandte Formen:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ). „Wiedererkennung“ von Prototypen und verwandten Formen, gemittelt über Schlaf- und Wachbedingung sowie 20-Min-Test und 1-Woche-Test. \*\*\* $p < 0,001$ .  $N = 16$ .

Im Rahmen eines abschließenden Set Ratings wurden den Proband:innen alle 80 Figurensätze inklusive der jeweils zugehörigen Prototypen gezeigt. In absteigender Reihenfolge sollten sie pro Set zwei Figuren wählen, die ihrer Meinung nach das jeweilige Set am besten repräsentieren, d.h. am prototypischsten sind. Bei Betrachtung der ersten Wahl wurden alte Formen (Mittelwert  $\pm$  SEM:  $44,4 \pm 1,50$  %) häufiger als „prototypisch“ ausgewählt als verwandte Formen ( $39,0 \pm 1,61$  %;  $t(14) = 2,13$ ;  $p = ,051$ ) oder Prototypen ( $16,6 \pm 1,79$ %;  $t(14) = 9,63$ ;  $p < ,001$ ). Verwandte Formen wurden häufiger gewählt als Prototypen ( $t(14) = 7,35$ ;  $p < ,001$ ; Haupteffekt von Stimulus-Typ,  $F(2,28) = 54,14$ ;  $p < ,001$ ; Abbildung 16).

Verglichen mit dem Zufallsniveau (d. h. 1 von 11 = 9,10 % für Prototypen und 5 von 11 = 45,45 % für alte bzw. verwandte Formen) lag die Auswahl der Teilnehmer:innen für die tatsächlichen Prototypen jedoch signifikant darüber ( $t(14) = 4,18$ ;  $p < ,001$ ), während alte Formen und verwandte Formen auf ( $t(14) = 0,69$ ;  $p = ,503$ ) bzw. unterhalb des Zufallsniveaus ( $t(14) = 4,02$ ;  $p = ,001$ ) ausgewählt wurden. Hierbei gab es keinen Unterschied zwischen der Schlaf- und Wachbedingung (kein Haupteffekt von Schlaf/Wach,  $F(2,14) = 3,24^{-14}$ ;  $p = 1,000$ ; keine Interaktion Schlaf/Wach x Stimulus-Typ,  $F(2,28) = 0,51$ ;  $p = ,607$ ).

Ebenso lag bei der Analyse beider ausgewählten Formen (1.+ 2. Wahl) die tatsächliche Wahl der Prototypen signifikant oberhalb des Zufallsniveaus ( $t(14) = 4,11$ ;  $p = ,001$ ; Zufallsniveau:  $(1/11 \cdot 10/10) + (10/11 \cdot 1/10) = 18,19\%$ ), während sowohl alte als auch verwandte Formen signifikant unter dem Zufallsniveau ausgewählt wurden ( $t(14) = 18,83$ ;  $p < ,001$  bzw.  $t(14) = 11,40$ ;  $p < ,001$ ; Zufallsniveau:  $(5/11 \cdot 4/10) + (5/11 \cdot 6/10) + (6/11 \cdot 5/10) = 72,72\%$ ). Auch hier gab es keinen Unterschied zwischen Schlaf und Wachheit (kein Haupteffekt von Schlaf/Wach,  $F(2,14) = 0,50$ ;  $p = ,490$ ; keine Interaktion Schlaf/Wach x Stimulus-Typ,  $F(2,28) = 0,37$ ;  $p = ,692$ ).

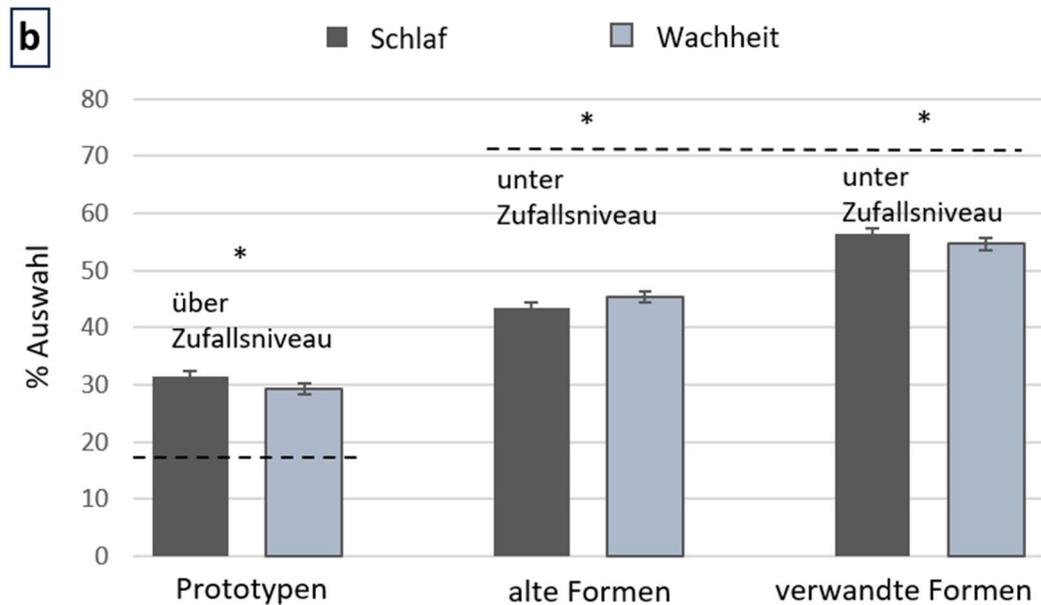
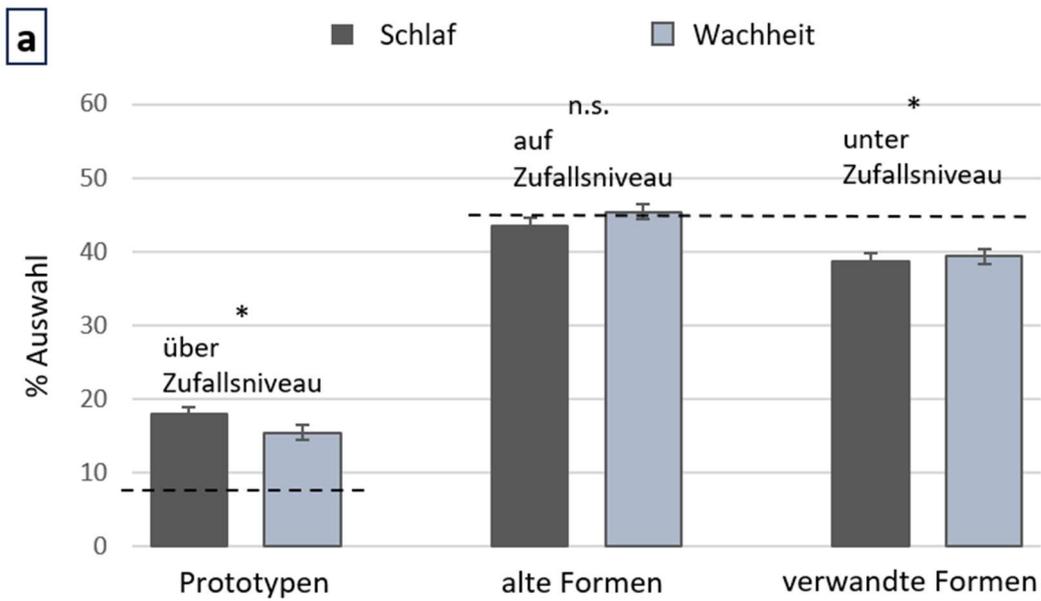


Abbildung 16: Wiedererkennungsraten Set Rating

**Wiedererkennungsraten Set Rating:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ). Vergleich Schlaf/Wachheit für die 1. Wahl (a) sowie 1.+2. Wahl (b) der Proband:innen. Vgl. bzgl. Zufallsniveau (50%). \* $p < 0.05$ .  $N = 15$ .

### 3.5 Korrelationen mit Schlafparametern

Um herauszufinden, welche schlafassoziierten neurophysiologischen Prozesse einen Einfluss auf Gedächtnisabstraktion und/oder das korrekte Erinnern von enkodierten Informationen haben, haben wir uns auf die Amplituden schneller Schlafspindel- (gemittelt über posteriore Elektroden: P3, P4, O1 und O2) und langsamer Oszillationseignisse (gemittelt über frontale Elektroden: F3, F4), während des NREM-Schlafs fokussiert. Es zeigte sich, dass beide positiv mit der korrekten Erkennung alter Formen, insbesondere für unähnliche Formen, korrelierten (schnelle Schlafspindeln/ähnlich:  $r = 0,482$ ,  $p = 0,096$ ; schnelle Schlafspindeln/unähnlich:  $r = 0,647$ ,  $p = 0,017$ ; langsame Oszillationen/ähnlich:  $r = 0,657$ ,  $p = 0,015$ ; langsame Oszillationen/unähnlich:  $r = 0,784$ ,  $p = 0,002$ ), sowie Prototypen (schnelle Schlafspindeln/ähnlich:  $r = 0,004$ ,  $p = 0,989$ ; schnelle Schlafspindeln/unähnlich:  $r = 0,656$ ,  $p = 0,015$ ; langsame Oszillationen/ähnlich:  $r = 0,516$ ,  $p = 0,071$ ; langsame Oszillationen/unähnlich:  $r = 0,658$ ,  $p = 0,014$ ) während der Erinnerung nach einer Woche (Abbildung 17). Für die Leistung bei Prototypen unterschieden sich die Korrelationen von schnellen Schlafspindeln signifikant zwischen ähnlichen und unähnlichen Formen ( $z = 2,001$ ,  $p = 0,023$ ). Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten, dass Schlafspindeln und langsame Oszillationen das korrekte Erinnern enkodierter Informationen nach einer Woche sowie die Gedächtnisabstraktion nach einem Jahr voraussagen.

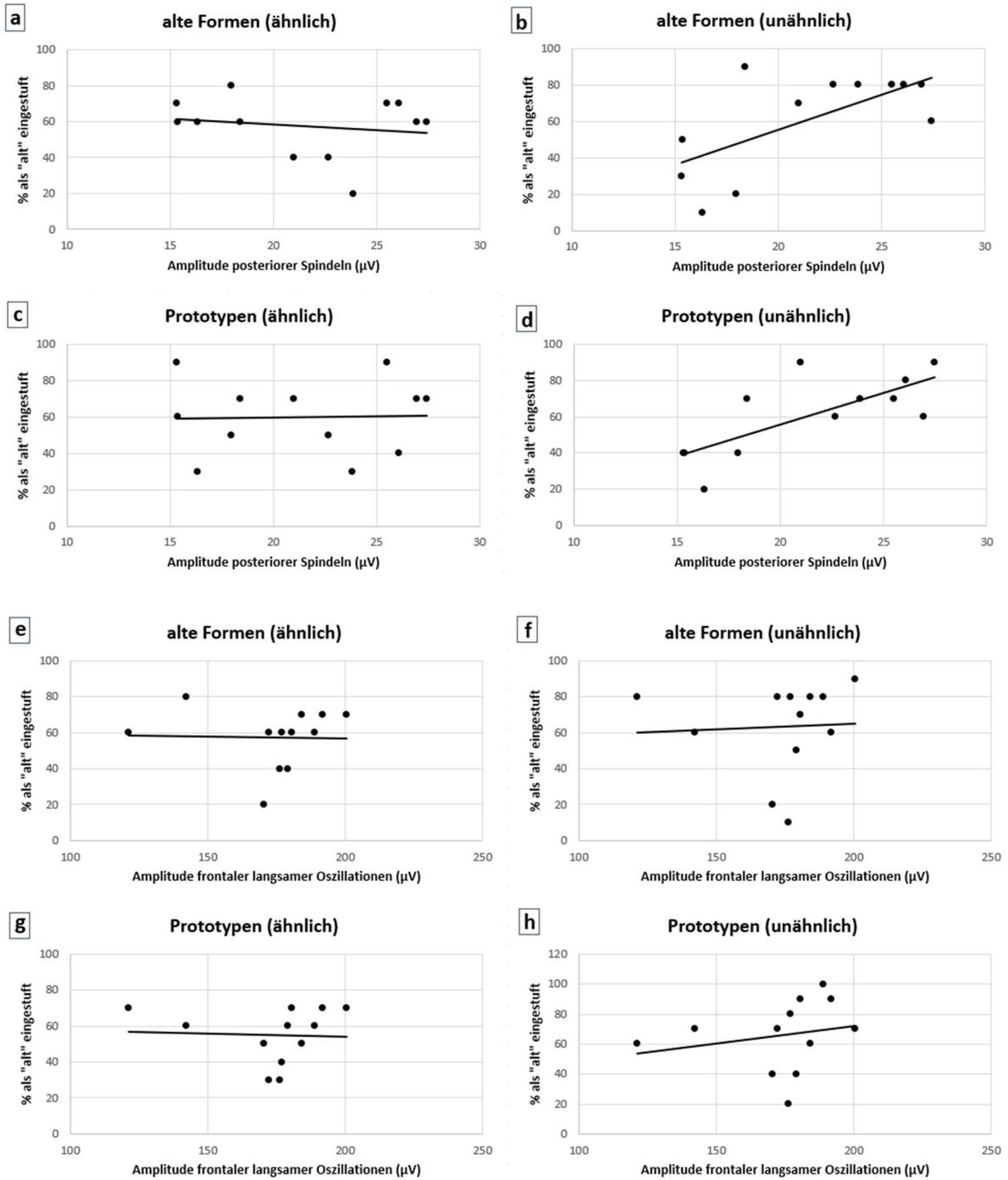


Abbildung 17: Korrelationen mit posterioren Spindeln und frontalen langsamen Oszillationen

**Korrelationen mit posterioren Spindeln und frontalen langsamen Oszillationen:** Streudiagramme für Korrelationen der Amplitude von Spindeln (a-d) und langsamer Oszillationen (e-h) mit der Erkennungsleistung für alte Formen und Prototypen beim 1-Woche-Test, getrennt für ähnliche (links) und unähnliche (rechte Tafeln) Formen.  $N = 15$ .

Wir untersuchten auch, ob die Kopplung zwischen Schlafspindeln und SOs — einem wichtigen Marker für die Konsolidierung von Gedächtnissystemen im Schlaf (Klinzing et al., 2019) — die Verhaltensleistung vorhersagen würde (z. B. Kurz et al., 2021). Wie in Abbildung 18 gezeigt, sagte das gemeinsame Auftreten von schnellen Spindeln mit SOs selektiv den Unterschied zwischen der Wiedererkennung von Prototypen und alten Formen für unähnliche Formen ( $r = 0,644$ ;  $p = ,017$ ), aber nicht für ähnliche Formen ( $r = 0,319$ ;  $p = ,289$ ) voraus.

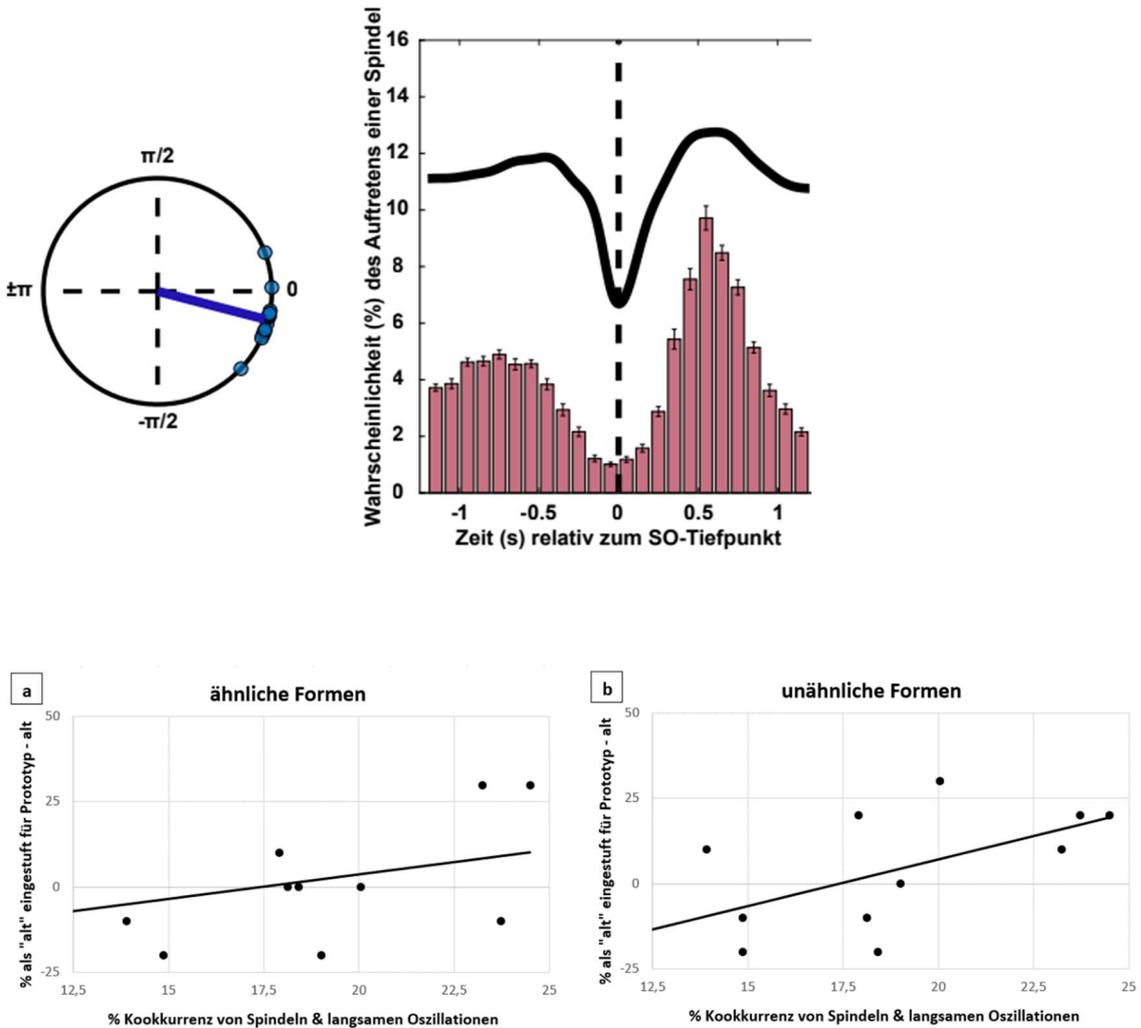


Abbildung 18: Korrelationen zwischen Verhaltensleistung und SO-Spindel-Verbindung

### Korrelationen zwischen Verhaltensleistung und SO-Spindel-Verbindung

**Oben links:** durchschnittliche bevorzugte Phase (blaue Punkte) und Kopplungsstärke (blaue Linie) für die Kopplung der Spindeln mit dem SO-Zyklus ( $0^\circ$ , SO-Hochphasengipfel;  $\pm 180^\circ$ ; SO-Tiefphasengipfel), gemittelt über frontale, zentrale, parietale und okzipitale Elektroden. Oben rechts: Peri-Ereignis-Zeit-Histogramme, die die Rate des Auftretens der Spindeln in 100-ms-Schritten  $\pm 1,2$  s um den SO-Tiefphasengipfel (0 s, vertikale gestrichelte Linie) an durchschnittlichen frontalen, zentralen, parietalen und okzipitalen Elektroden darstellen.

**Unten:** Streudiagramme für Korrelationen zwischen der Differenz (%) der als "alt" eingestuft Formen zwischen Prototypen und alten Formen und dem zeitgleichen Vorkommen (%) von Spindeln und SO für ähnliche (a) und unähnliche (b) Formen im 1-Woche-Test.  $N=14$ .

Polysomnographie- und Aktigraphiedaten zeigten normale Schlafmuster und keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Die Prozentsätze von S1, S2, SWS, REM-Schlaf und WASO wurden als Prozentsatz der Gesamtschlafzeit berechnet. Die Schlafeffizienz wurde berechnet als Gesamtschlafzeit geteilt durch die Schlafdauer (d. h. Zeit vom Einschlafen bis zum Aufwachen) (siehe *Tabelle 1*) Zusätzlich zu objektiven Werten füllten die Teilnehmer:innen einen Fragebogen zur subjektiven Schlafqualität aus (Schlafragebogen A/Revidierte Fassung; Görtelmeyer (2011)). Auf einer Skala von 1 (sehr wenig) bis 5 (sehr hoch) lagen die Gesamtschlafqualität (SQ,  $3,47 \pm 0,21$ ), das Gefühl der Erholung nach dem Schlaf (GES,  $3,25 \pm 0,18$ ), das mentale Gleichgewicht vor dem Schlaf (PSYA,  $3,75 \pm 0,15$ ), die mentale Erschöpfung vor dem Schlaf (PSYE,  $2,88 \pm 0,21$ ) und psychosomatische Symptome während des Schlafes (PSS,  $1,27 \pm 0,09$ ) alle im normalen Bereich. Darüber hinaus wurden die allgemeine Schlafqualität der Teilnehmer:innen (gemessen über PSQI; Buysse et al., 1989) und der Chronotyp (gemessen über MEQ; Horne & Ostberg, 1976) bewertet. Alle Teilnehmer:innen hatten einen PSQI-Wert  $\leq 6$  (jeweils  $3,63 \pm 0,29$  und  $4,13 \pm 0,29$  in der Schlaf- und Wachbedingung;  $t(15) = 1,58$ ,  $p = ,135$ ). Die Proband:innen waren größtenteils mittlere Chronotypen ( $2,94 \pm 0,11$  auf einer Skala zwischen 1 (definitiv Abendtyp) und 5 (definitiv Morgentyp)).

Schlafparameter	min	%
Gesamtschlafzeit	454,47 ± 2,98	-
Einschlafzeit	23,67 ± 3,23	-
S1	51,53 ± 7,79	11,44 ± 1,57
S2	226,60 ± 9,55	49,89 ± 2,08
SWS	64,57 ± 4,55	14,20 ± 0,97
REM Schlaf	74,10 ± 5,48	16,29 ± 1,17
WASO	19,10 ± 7,55	4,21 ± 1,67
Schlafeffizienz	-	91,05 ± 1,67

*Tabelle 1: Schlafparameter*

**Schlafparameter:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ).  $N = 15$ .

Um festzustellen, ob die Teilnehmer:innen während der sieben Nächte zwischen der Enkodierung und dem Abruf nach einer Woche normale Schlaf-Wach-Zyklen hatten, wurden Aktigraphiedaten gesammelt (Standardalgorithmus; *Motionware* 1.2.5). Die Epochenlänge betrug dabei 15 s und Wachphasen wurden mit einer hohen Empfindlichkeitsschwelle registriert. Außerdem wurden die Teilnehmer:innen gebeten, Schlaftagebücher zu führen. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen Schlaf- und Wachbedingung für die folgenden Parameter: *Zwischentägliche Stabilität* (d.h. die Stabilität von Ruhe-Aktivitäts-Rhythmen zwischen verschiedenen Tagen), *Innertägliche Variabilität* (d.h. die Fragmentierung eines Ruhe-Aktivitäts-Musters), *Relative Amplitude* (zwischen den 10 Stunden maximaler Aktivität und den fünf Stunden geringster Aktivität ( $p \geq 0,239$ )). Diese Werte basieren auf einer nichtparametrischen zirkadianen Rhythmusanalyse (NPCRA; Blume et al. (2016); siehe *Tabelle 2*). Darüber hinaus wurde kein Unterschied zwischen Schlaf- und Wachbedingung für Schlafparameter während der Nacht vor dem Abruf nach einer Woche gefunden ( $p \geq 0,186$ ; siehe *Tabelle 2*).

	Schlafbedingung	Wachbedingung
<b>Sieben Tage Intervall zw. Enkodierung u. 1-Woche-Test</b>		
Zwischentägliche Stabilität	0,47 ± 0,04	0,47 ± 0,03
Innertägliche Variabilität	0,94 ± 0,06	1,00 ± 0,09
Relative Amplitude	0,93 ± 0,01	0,93 ± 0,01
<b>Nacht vor 1-Woche-Test</b>		
Zeit im Bett (min)	497 ± 16,5	520 ± 11,2
Gesamtschlafzeit (min)	392 ± 13,5	397 ± 13,9
WASO (%)	17,8 ± 1,22	17,7 ± 0,94
Schlafeffizienz (%)	79,0 ± 1,27	76,2 ± 1,81

*Tabelle 2: Aktigraphie*

**Aktigraphie:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung ( $\pm$ ).  $N = 16$ .

Kontrolltests zeigten eine normale Leistung und keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Während der Eingewöhnungsnacht wurde die Wortflüssigkeit der Teilnehmer:innen getestet (Aschenbrenner et al., 2000). Hierzu sollten die Proband:innen innerhalb von zwei Minuten so viele Wörter wie möglich mit dem Anfangsbuchstaben „P“ notieren. Zusätzlich wurde während der Enkodierungssitzung, des 1-Woche-Tests sowie des Set Ratings die Vigilanz (Diekelmann et al., 2013) getestet, wobei die Teilnehmer:innen so schnell und so korrekt wie möglich mit entsprechendem Tastendruck auf einen entweder links oder rechts erscheinenden Punkt auf dem Bildschirm reagieren sollten. Auf einer 7-Punkte-Skala gaben die Proband:innen jeweils ihre subjektive Schläfrigkeit an. (Stanford Sleepiness Scale, SSS; Hoddes et al., 1972). Zudem wurde der Digit Span Test während der Enkodierungs- und der Abruf-Sitzungen durchgeführt, welcher mit drei Ziffern und mit einer Präsentationsdauer von einer Sekunde startete. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Schlaf- und Wachbedingung in Bezug auf all diese Messungen (alle  $p \geq 0,216$ ; siehe *Tabelle 3*).

	Schlafbedingung	Wachbedingung
<b>Eingewöhnungsnacht</b>		
Wortflüssigkeit (#Wörter)	16,70 ± 1,36	
<b>Enkodierung</b>		
Vigilanz (ms)	414 ± 8,42	419 ± 10,50
Schläfrigkeit	3,63 ± 0,13	3,44 ± 0,16
Digit Span Test	6,94 ± 0,27	6,94 ± 0,30
<b>1-Woche-Test</b>		
Vigilanz (ms)	410 ± 9,96	411 ± 12,10
Schläfrigkeit	2,50 ± 0,24	2,25 ± 0,19
Digit Span Test	7,19 ± 0,28	6,94 ± 0,36
<b>Set Rating</b>		
Vigilanz (ms)	406 ± 9,58	
Schläfrigkeit	2,27 ± 0,24	

Tabelle 3: Wortflüssigkeit, Vigilanz, Schläfrigkeit und Digit Span Test bei den einzelnen Versuchstagen

**Wortflüssigkeit, Vigilanz, Schläfrigkeit und Digit Span Test bei den einzelnen Versuchstagen:** Dargestellt sind Mittelwerte und die Standardabweichung (±). N=16.

## 4 Diskussion

Nachfolgend werden die grundlegenden Studienergebnisse abschließend dargelegt und im Kontext bisheriger Forschung diskutiert. Zudem ist die kritische Bewertung der Ergebnisse sowie ein Ausblick Inhalt dieses Kapitels.

### 4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Diese Studie untersuchte, wie sich Schlaf über die Zeit hinweg auf die Gedächtnisabstraktion auswirkt. Zu diesem Zweck wurden zunächst 20 Minuten nach der Enkodierung, nach einer Woche und erneut nach einem Jahr Testungen vorgenommen. In Anlehnung an das verbale Deese-Roediger-McDermott (DRM) Paradigma (Roediger & McDermott, 1995; Deese, 1959), wurde hierfür ein visuelles Paradigma (Diekelmann et al., 2011; Lutz et al., 2017; Schacter & Slotnick, 2004) verwendet, bei dem Figurensatzes enkodiert wurden.

Nach dem Retentionsintervall von einer Woche wurde keine verstärkende Auswirkung des Schlafes auf die Gedächtnisabstraktion gefunden. In Bezug auf alte, d.h. enkodierte Formen, zeigte sich nach einer Woche sogar eine erhöhte Wiedererkennungsrates, wenn die Proband:innen nach der Enkodierung wach geblieben waren. Beim direkten Vergleich der Erkennungsrates von Prototypen, die die Gedächtnisabstraktion repräsentieren, und enkodierten alten Formen, war – unabhängig von Schlaf oder Wachheit – 20 Minuten und eine Woche nach der Enkodierung praktisch kein Unterschied feststellbar. Hingegen wurden nach einem Jahr Prototypen im Vergleich zu gelernten Formen häufiger „wiedererkannt“. Prototypen wurden also bereits früh nach der Enkodierung sowie auch zu späteren Zeitpunkten für alte, d.h. enkodierte Formen, gehalten. Dies lässt vermuten, dass die Gedächtnisabstraktion bereits früh nach resp. während der Enkodierung beginnt und über die Zeit hinweg länger im Gedächtnis verbleibt als detailreiche Informationen.

Die beschriebenen Ergebnisse deuten nicht auf einen spezifischen positiven Effekt des Schlafes bei der Gedächtnisabstraktion hin, sondern zeigen, dass

sowohl Abstraktion als auch Konsolidierung unabhängig von Schlaf ablaufen können. Über lange Zeit hinweg werden die Spuren der Gedächtnisabstraktion denen der ursprünglich enkodierten Informationen vorgezogen.

Obwohl kein schlafabhängiger Vorteil nachgewiesen werden konnte, zeigten polysomnographische Daten, dass die neuronale Aktivität während des Schlafes mit nachfolgender Verhaltensleistung verbunden ist. Sowohl schnelle Spindelaktivität, langsame Oszillationen, als auch deren Kopplung an posteriore Elektroden sagten die Leistung über eine Woche hinweg vorher, und zwar insbesondere für Stimulussets mit geringer Merkmalsüberschneidung.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass der Kern eines Erlebnisses schnell extrahiert wird (vgl. hohe Wiedererkennungsraten der Prototypen bereits im 20-min-Abruf) und sich im Laufe der Zeit langsamer abbaut als tatsächlich gelernte Inhalte (vgl. Prototypen/alte Formen im 1-Jahr-Test).

#### **4.2 Einordnung in bisherige Forschung**

Erst ein Jahr nach Enkodierung wurde ein Unterschied in der Erkennungsrate von Prototypen und enkodierten alten Formen gefunden. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Studie von Lutz et al. (2017) überein. In aktuellen Theorien wird postuliert, dass es sich bei der Gedächtnisabstraktion um einen Prozess handelt, der langsam über die Zeit entsteht (Dudai et al., 2015; Squire et al., 2015; Winocur & Moscovitch, 2011). Ein positiver Effekt von Schlaf auf die Gedächtnisabstraktion konnten wir im Gegensatz zu Lutz et al. (2017) hingegen in keinem der getesteten Retentionsintervalle feststellen.

Während nach einer Woche ein positiver Effekt von Wachsein in Bezug auf das Behalten der ursprünglich enkodierten Informationen gefunden wurde, zeigten sich zugleich signifikante positive Zusammenhänge zwischen dem Tiefschlaf und der Wiedererkennungsleistung von alten Formen und Prototypen nach einer Woche. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass unterschiedliche Mechanismen während des Schlafes sowie des Wachzustandes für die Konsolidierung von Erinnerungen verantwortlich sind. Tatsächlich deuten neuere Studien darauf hin, dass ähnliche Mechanismen während des Wachzustandes existieren, die einen vergleichbaren positiven Einfluss auf die

Gedächtniskonsolidierung wie der Schlaf haben können (Tucker et al., 2020; Wamsley et al., 2019).

Nachdem Lutz et al. (2017) bereits kurz nach der Enkodierung eine hohe Erkennungsrate von Prototypen feststellten, wurde in vorliegender Studie das Stimulusmaterial dahingehend verändert, dass den Proband:innen Formen gezeigt wurden, die dem Prototypen entweder ähnlich oder unähnlich waren. Die Hypothese dabei war, dass die unähnlichen Formen zunächst zu einer verminderten Wiedererkennung der Prototypen, im zeitlichen Verlauf aber zu einem Anstieg derselben führen würden. Ähnliche Formen hingegen sollten, der Hypothese nach, zu höheren anfänglichen Erkennungsraten für Prototypen führen, die über die Zeit hinweg weitgehend auf einem Niveau bleiben sollten. Weder nach dem Retentionsintervall von 20 Minuten noch nach einer Woche konnte jedoch ein Unterschied in Bezug auf diese Manipulation festgestellt werden. Es bleibt also unklar, ob die Abstraktion von Gedächtnisspuren in beiden Fällen (ähnlich/unähnlich) gleich stark ausgeprägt war. Polysomnographische Daten lassen jedoch erneut darauf schließen, dass der Schlaf, wenn er kurz nach der Enkodierung eintritt, funktionell mit der Leistung verknüpft ist. In Übereinstimmung mit der ursprünglichen Hypothese, dass Schlaf über einen längeren Zeitraum betrachtet die Gedächtnisabstraktion fördert, sagten sowohl die Schlafspindeln als auch die langsamen Oszillationen als Hauptmerkmale des NREM-Schlafes sowohl die Erkennungsraten von alten Formen als auch von Prototypen nach dem Zeitintervall von einer Woche voraus.

In einer Vertrautheitsbewertung wurde ein signifikanter Unterschied zwischen ähnlichen und unähnlichen Formen-Sets gefunden. Die Teilnehmer:innen sollten dabei drei Stimuli eines Sets (ein Prototyp, eine alte Form und eine verwandte Form aus demselben Set) absteigend nach ihrer Vertrautheit bewerten. Eine Woche nach Enkodierung konnte eine Tendenz beobachtet werden, die alte, also tatsächlich enkodierte Formen in Richtung nicht enkodierter, verwandter Formen verschob. Während eine stärkere Verschiebung hin zu Prototypen nach einer Woche vermutet wurde, entsprechen diese Ergebnisse weitgehend solchen Studienergebnissen, die eine Verschiebung vom genauen zum unscharfen Detailgedächtnis zeigen (Zwissler et al., 2014).

Im Hinblick auf die Hypothese, dass prototypische Formen den Kern einzelner enkodierter Formen oder eine überlappende Repräsentation derselben darstellen, wurde ein Set Rating durchgeführt. Die Proband:innen sahen dabei ganze Figurensätze inklusive der zugehörigen Prototypen und sollten die beiden Formen eines Sets auswählen, die dieses am besten repräsentierten, also prototypisch waren. Obwohl die Teilnehmer:innen häufiger alte und verwandte Formen als Prototypen wählten, zeigte sich, dass nur die Prototypen signifikant über dem Zufallsniveau ausgewählt wurden. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich Prototypen tatsächlich von anderen Formen eines Sets unterscheiden und höchstwahrscheinlich den Kern der enkodierten Information darstellen.

#### **4.3 Einschränkungen der Studie**

Bestimmte Limitationen könnten die Ergebnisse beeinflusst haben. So ist es möglich, dass der fehlende Schlafeffekt im Kurzzeitabruf darauf zurückzuführen ist, dass das Testverfahren nicht sensitiv genug war, um einen solchen Effekt festzustellen. Wiedererkennungstests etwa scheinen weniger empfindlich für Schlafeffekte zu sein als der freie Abruf (Diekelmann et al., 2008; Wagner et al., 2007).

Im Allgemeinen waren die Wiedererkennungsraten der enkodierten Formen in diesem Experiment hoch. Frühere Studien zeigten, dass bei Proband:innen mit generell geringer Gedächtnisleistung die Rate der falsch erkannten Wörter erhöht ist. Eine Studie von Diekelmann et al. (2008) belegte dies beispielsweise, wie oben beschrieben, durch vergleichende Untersuchungen zwischen nächtlichem Schlaf, Schlafentzug und wachem Zustand tagsüber. Die Menge an falschen Erinnerungen scheint von der Leistung des allgemeinen Gedächtnisses abzuhängen, da leistungsstarke und leistungsschwache Personen von Natur aus unterschiedliche mnemotechnische Strategien anwenden, um neue Informationen zu enkodieren (Diekelmann et al., 2010). Auch McKeon et al. (2012) fanden erhöhte Raten an Gedächtnisabstraktion nach Schlaf nur bei „*low performers*“. Auch andere Autor:innen unterstützen die Idee, dass schwache Spuren diejenigen sind, auf die der Schlaf abzielt, d.h. nur Teilnehmer:innen, die das Material schwach enkodieren, profitieren vom Schlaf (Drosopoulos et al.,

2007; Kuriyama et al., 2004; Pardilla-Delgado & Payne, 2017). Da die Proband:innen der vorliegenden Studie alle junge Studierende waren und man damit von einer generell hohen Gedächtnisleistung ausgehen kann, könnten die Spuren besonders stark sein und somit weniger anfällig für die Einflüsse des Schlafes. Hohe Raten an korrekt wiedererkannten alten Formen im 20-Min-Test, d.h. direkt nach Enkodierung, bestärken diese Hypothese (Schlafbedingung 74,68%; Wachbedingung 72,81%). Eine Studie von Petzka et al. (2021) zeigt hingegen, dass sowohl stärkere als auch schwächere Erinnerungen von Schlaf, der auf die Enkodierung folgt, profitieren. Zugleich zeigten die Autor:innen jedoch, dass stärkere Erinnerungen im Vergleich zu schwachen Erinnerungen höhere Abrufanforderungen benötigen, um vom Schlaf zu profitieren. Zudem räumen die Forscher:innen ein, dass stärkere Erinnerungen bereits vor dem Schlaf ausreichend konsolidiert sein könnten, sodass schlicht der Bedarf an nächtlicher Konsolidierung geringer sei.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Lutz et al. (2017) konnte kein positiver Effekt von Schlaf auf die Gedächtnisabstraktion über einen Zeitraum von einem Jahr festgestellt werden. Es ist wahrscheinlich, dass diese Ergebnisse auf die Anpassungen des verwendeten visuellen DRM-Paradigmas zurückzuführen sind. Denn die Teilnehmer:innen sahen in vorliegender Studie aufgrund der Manipulation in Bezug auf die Stimulusähnlichkeit (ähnliche/unähnliche Formen) kleinere Figurensets als beispielsweise bei Lutz et al. (2017)). Dort wurden zehn anstatt fünf Formen verwendet. Die Gesamtanzahl der Stimuli war dennoch in beiden Studien gleich und auch die Leistung war nach 20 Minuten numerisch ähnlich, sodass man nicht von einer unterschiedlich ausgeprägten Schwierigkeit der Aufgaben ausgehen kann. Durch die wiederholte Präsentation der gleichen Formen während der Enkodierung könnte jedoch eine stärkere semantische Verarbeitung des Stimulusmaterials erfolgt sein als bei Lutz et al. (2017). Zudem könnte die wiederholte Darbietung einer geringeren Anzahl von Stimuli dazu beigetragen haben, Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen einzelnen Stimuli innerhalb eines Sets hervorzuheben und dadurch die Entstehung robusterer Repräsentationen zu unterstützen. Es ist möglich, dass der Schlaf bei der Konsolidierung somit eine untergeordnete Rolle spielte, und die

Gedächtnisabstraktion bereits im Wachzustand verstärkt gefördert wurde (Lutz et al., 2017; Wagner et al., 2006).

#### **4.4 Fazit und Ausblick**

Die vorliegende Studie liefert einen wertvollen Beitrag zur aktuellen Forschung, indem sie neue Einblicke und Impulse auf einem Gebiet, das weiteren Erkenntnissen bedarf, bereitstellt.

Zusammenfassend legen die Ergebnisse nahe, dass die Abstraktion visueller Stimuli unmittelbar nach oder bereits während der Enkodierung erfolgt. Ursprünglich nicht enkodierte Prototypen werden langfristig, d.h. mindestens über den Zeitraum von einem Jahr, erinnert. Obwohl dieser Vorgang unabhängig von Schlaf zu sein scheint, weisen Korrelationen zwischen neurophysiologischen und verhaltensbezogenen Daten darauf hin, dass Schlaf, der kurz nach der Enkodierung einsetzt, die Konsolidierungsprozesse zumindest unterstützt.

In Zukunft sind weitere Untersuchungen erforderlich, um festzustellen, ob die Spuren der Gedächtnisabstraktion nach größeren Zeitspannen (> 1 Jahr) zusätzlichen qualitativen Veränderungen unterliegen oder ob sie weitgehend stabil bleiben. Eine weitere Abstrahierung, d.h. ein wiederholtes Herausfiltern der Quintessenz der ursprünglichen Prototypen über den Zeitraum von mehreren Jahren, erscheint ebenso möglich. Durch entsprechende Anpassung der Figurenssets könnte dies Gegenstand der Datenauswertung werden. Ferner sollten weitere Untersuchungen den Zusammenhang zwischen allgemeiner Gedächtnisleistung mit Gedächtnisabstraktion und Abrufanforderungen untersuchen. Zuletzt sollten Figurenssets im Allgemeinen außerdem aus ausreichend Figuren bestehen, um sicherzustellen, dass eine häufige Wiederholung und nachfolgende Konsolidierung, die bereits vor dem Schlaf vonstattengeht, möglichst minimiert wird.

## 5 Zusammenfassung

Unser Gedächtnis muss in der Lage sein, Erinnerungen zu bewahren und zur gleichen Zeit genügend Platz für die Verarbeitung von neuen Informationen zu bieten. Eine Möglichkeit, dieses Gleichgewicht zu erreichen, besteht darin, Erlebnisse abstrakt zu repräsentieren, d.h. die Quintessenz eines Erlebnisses herauszufiltern. Konsolidierungsprozesse unterstützen diesen Vorgang, bei dem es unter Umständen auch zu Erinnerungsverfälschungen kommt, sodass wir uns an Dinge „erinnern“, die so nie stattgefunden haben. Die aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der Frage, ob Schlaf einen Einfluss auf diesen Prozess hat.

In dieser Studie untersuchten wir mittels eines nonverbalen Figurenparadigmas, wie sich die Gedächtnisabstraktion über mehrere Konsolidierungsnächte hinweg entwickelt. Unser Ziel war es, den Einfluss des Schlafes im Vergleich zum Wachzustand auf diesen Prozess zu untersuchen. Zu diesem Zweck testeten wir im Rahmen eines Innersubjekt Designs 16 Proband:innen 20 Minuten, eine Woche sowie ein Jahr nach Enkodierung abstrakter Figurenssets in Bezug auf ihre Wiedererkennungsraten. Die Figurenssets wurden entsprechend der jeweiligen Bedingung (Wach-/Schlaf-) am Morgen oder am Abend enkodiert. Zusätzlicher Gegenstand der Fragestellung war eine Manipulation der Figurenssets in Bezug auf deren Ähnlichkeit zum Prototyp, welcher repräsentativ für die Gedächtnisabstraktion steht.

Unsere Ergebnisse zeigen zu allen Messzeitpunkten hohe Wiedererkennungsraten der Prototypen. Ein Jahr nach Enkodierung wurden Prototypen von den Proband:innen sogar häufiger „wiedererkannt“ als alte, d.h. tatsächlich enkodierte Formen. Zudem konnte gezeigt werden, dass Prototypen im Vergleich zu anderen, nicht enkodierten Formen, häufiger als „alte Formen“ eingestuft wurden sowie signifikant über Zufallsniveau von den Proband:innen als „prototypisch“ für die Figurenssets ausgewählt wurden. Unterschiede zwischen der Schlaf- und der Wachbedingung wurden in vorliegender Studie nicht festgestellt. Trotzdem fanden wir Korrelationen zwischen polysomnographischen Aufzeichnungen – insbesondere während des NREM-Schlafes – und den

Verhaltensdaten. Die Manipulation der Figurensets in Bezug auf ihre Ähnlichkeit zum Prototyp und die damit reduzierte Figurenanzahl pro Set führte womöglich zu dem fehlenden Schlafeffekt, welcher in vorangegangenen Versuchen (Lutz et al., 2017) bereits gesehen wurde.

Gedächtnisabstraktion scheint sehr früh während oder nach der Enkodierung neuer Gedächtnisinhalte zu beginnen, unabhängig von nachfolgender Wachheit oder Schlaf. Entsprechende Gedächtnisspuren bleiben mindestens für den Zeitraum eines Jahres stabil. Ob es danach noch eine qualitative Änderung derselben geben wird, sollte Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

## 6 Literaturverzeichnis

- Addis, D. R., Wong, A. T., & Schacter, D. L. (2007). Remembering the past and imagining the future: common and distinct neural substrates during event construction and elaboration. *Neuropsychologia*, 45(7), 1363-1377.
- Berens, P. (2009). CircStat: a MATLAB toolbox for circular statistics. *Journal of statistical software*, 31, 1-21.
- Born, J., Rasch, B., & Gais, S. (2006). sleep to remember. *The Neuroscientist*, 12(5), 410–424.
- Brainerd, C. J., & Reyna, V. F. (2002). Fuzzy-trace theory and false memory. *Current Directions in Psychological Science*, 11(5), 164-169.
- Brainerd, C. J., & Reyna, V. F. (2005). *The science of false memory*. Oxford University Press.
- Buysse, D. J., Reynolds III, C. F., Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Research*, 28(2), 193–213.
- Buzsáki, G. (1996). The hippocampo-neocortical dialogue. *Cerebral Cortex*, 6(2), 81-92.
- Cann, D. R., McRae, K., & Katz, A. N. (2011). The roles of gist and associative strength. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(8), 1515-1542.
- Chase, M. H., & Morales, F. R. (1990). The atonia and myoclonia of active (REM) sleep. *Annual Review of Psychology*, 41(1), 557–584.
- Chatburn, A., Kohler, M. J., Payne, J. D., & Drummond, S. P. (2017). The effects of sleep restriction and sleep deprivation in producing false memories. *Neurobiology of Learning and Memory*, 137, 107-113.
- Collins, A. M., & L. E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82(6), 407.
- Craik, F. I., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 11(6), 671-684.
- Darsaud, A., Dehon, H., Lahl, O., Sterpenich, V., Boly, M., Dang-Vu, T., ... & Collette, F. (2011). Does sleep promote false memories? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(1), 26-40.
- Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of particular verbal intrusions in immediate recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 58(1), 17.

- Denis, D., Mylonas, D., Poskanzer, C., Bursal, V., Payne, J. D., & Stickgold, R. (2021). Sleep spindles preferentially consolidate weakly encoded memories. *Journal of Neuroscience*, *41*(18), 4088-4099.
- Diekelmann, S., Wilhelm, I., Wagner, U., & Born, J. (2013). Sleep to implement an intention. *Sleep*, *36*(1), 149-153.
- Diekelmann, S., Born, J., & Wagner, U. (2010). Sleep enhances false memories depending on general memory performance. *Behavioural Brain Research*, *208*(2), 425-429.
- Diekelmann, S., Landolt, H. P., Lahl, O., Born, J., & Wagner, U. (2008). Sleep loss produces false memories. *PLoS One*, *3*(10), e3512.
- Diekelmann, S., Wilhelm, I., Wagner, U., & Born, J. (2011). Elevated cortisol at retrieval suppresses false memories in parallel with correct memories. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(4), 772-781.
- Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, *15*(2), 161-167.
- Drosopoulos, S., S. C., F. S., & B. J. (2007). Sleep's function in the spontaneous recovery and consolidation of memories. *Journal of Experimental Psychology: General*, *136*(2), 169.
- Dudai, Y., Karni, A., & Born, J. (2015). The consolidation and transformation of memory. *Neuron*, *88*(1), 20-32.
- Ellenbogen, J. M., Payne, J. D., & Stickgold, R. (2006). The role of sleep in declarative memory consolidation: passive, permissive, active or none? *Current Opinion in Neurobiology*, *16*(6), 716-722.
- Fenn, K. M., Gallo, D. A., Margoliash, D., Roediger, H. L., & Nusbaum, H. C. (2009). Reduced false memory after sleep. *Learning & Memory*, *16*(9), 509-513.
- Frankland, P. W., & Bontempi, B. (2005). The organization of recent and remote memories. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*(2), 119-130.
- Gais, S., Albouy, G., Boly, M., Dang-Vu, T. T., Darsaud, A., Desseilles, M., ... & Peigneux, P. (2007). Sleep transforms the cerebral trace of declarative memories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(47), 18778-18783.
- Gonsalves, B., Reber, P. J., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., Mesulam, M. M., & Paller, K. A. (2004). Neural evidence that vivid imagining can lead to false remembering. *Psychological Science*, *15*(10), 655-660.
- Görtelmeyer, R. (2011). SF-A/R und SF-B/R: Schlaffragebogen A und B.
- Hoddes, E. Z Vincent, D William (1972). Development and Use of Stanford Sleepiness Scale. *Psychophysiology*, *9*(1), 150.

- Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International journal of chronobiology*, 4(2), 97-110.
- Howe, M. L., Garner, S. R., Charlesworth, M., & Knott, L. (2011). A brighter side to memory illusions: False memories prime children's and adults' insight-based problem solving. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(2), 383-393.
- Inostroza, M., & Born, J. (2013). Sleep for preserving and transforming episodic memory. *Annu Rev Neurosci*, 36(1), 79-102.
- Jurewicz, K., Cordi, M. J., Staudigl, T., & Rasch, B. (2016). No evidence for memory decontextualization across one night of sleep. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 7.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (2012). Principles of Neural Science. *McGraw-Hill Professional*, chapter 6.
- Klinzing, J. G., Mölle, M., Weber, F., Supp, G., Hipp, J. F., Engel, A. K., & Born, J. (2016). Spindle activity phase-locked to sleep slow oscillations. *Neuroimage*, 134, 607-616.
- Klinzing, J. G., Niethard, N., & Born, J. (2019). Mechanisms of systems memory consolidation during sleep. *Nature neuroscience*, 22(10), 1598-1610.
- Kuriyama, K., S. R., & W. M. P. (2004). Sleep-dependent learning and motor-skill complexity. *Learning & Memory*, 11(6), 705-713.
- Kurz, E. M., Conzelmann, A., Barth, G. M., Renner, T. J., Zinke, K., & Born, J. (2021). How do children with autism spectrum disorder form gist memory during sleep? A study of slow oscillation-spindle coupling. *Sleep*, 44(6), zsa290.
- Kurz, E. M., Zinke, K., & Born, J. (2023). Sleep electroencephalogram (EEG) oscillations and associated memory processing during childhood and early adolescence. *Developmental Psychology*, 59(2), 297.
- Llinas, R., & Ribary, U. (1993). Coherent 40-Hz oscillation characterizes dream state in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(5), 2078-2081.
- Lo, J. C., Sim, S. K., & Chee, M. W. (2014). Sleep reduces false memory in healthy older adults. *Sleep*, 37(4), 665-671.
- Lutz, N. D., Admard, M., Genzoni, E., Born, J., & Rauss, K. (2021). Occipital sleep spindles predict sequence learning in a visuo-motor task. *Sleep*, 44(8), zsab056.
- Lutz, N. D., Diekelmann, S., Hinse-Stern, P., Born, J., & Rauss, K. (2017). Sleep supports the slow abstraction of gist from visual perceptual memories. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.
- Malenka, R. C., & Nicoll, A. R. A. (1999). Long-term potentiation--a decade of progress? *Science*, 285(5435), 1870-1874.

- Marshall, L., & Born, J. (2007). The contribution of sleep to hippocampus-dependent memory consolidation. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(10), 442–450.
- McClelland, J. L., McNaughton, B. L., & O'Reilly, R. C. (1995). Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex: insights from the successes and failures of connectionist models of learning and memory. *Psychological Review*, 102(3), 419.
- McKeon, S., Pace-Schott, E. F., & Spencer, R. M. (2012). Interaction of sleep and emotional content on the production of false memories. *PloS one*, 7(11), e49353.
- Moscovitch, M., Nadel, L., Winocur, G., Gilboa, A., & Rosenbaum, R. S. (2006). The cognitive neuroscience of remote episodic, semantic and spatial memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 16(2), 179-190.
- Nadel, L., & Moscovitch, M. (1997). Memory consolidation, retrograde amnesia and the hippocampal complex. *Current opinion in neurobiology*, 7(2), 217-227.
- Pardilla-Delgado, E., & Payne, J. D. (2017). The impact of sleep on true and false memory across long delays. *Neurobiology of Learning and Memory*, 137(3), 123–133.
- Payne, J. D., Schacter, D. L., Propper, R. E., Huang, L. W., Wamsley, E. J., Tucker, M. A., ... & Stickgold, R. (2009). The role of sleep in false memory formation. *Neurobiology of learning and memory*. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(3), 327-334.
- Peigneux, P., Laureys, S., Delbeuck, X., & Maquet, P. (2001). Sleeping brain, learning brain. The role of sleep for memory systems. *Neuroreport*, 12(18), A111-A124.
- Petzka, M., Charest, I., Balanos, G. M., & Staresina, B. P. (2021). Does sleep-dependent consolidation favour weak memories? *Cortex*, 134, 65-75.
- Plihal, W., & Born, J. (1997). Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(4), 534–547.
- Rasch, B., & Born, J. (2007). Maintaining memories by reactivation. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(6), 698-703.
- Rechtschaffen, A. und Kales, A. (1968). *A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects*.
- Reyna, V. F., & Brainerd, C. J. (1998). Fuzzy-trace theory and false memory: New frontiers. *Journal of experimental child psychology*, 71(2), 194-209.
- Roediger, H. L., & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories: Remembering words not presented in lists. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(4), 803.

- Roediger III, H. L., Balota, D. A., & Watson, J. M. (2001). Spreading activation and arousal of false memories.
- Roediger III, H. L., J. J. D., & M. K. B. (1996). Misinformation effects in recall: Creating false memories through repeated retrieval. *Journal of Memory and Language*, 35(2), 300–318.
- Sawangjit, A., Oyanedel, C. N., Niethard, N., Salazar, C., Born, J., & Inostroza, M. (2018). The hippocampus is crucial for forming non-hippocampal long-term memory during sleep. *Nature*, 564(7734), 109-113.
- Schacter, D. L. (1996). Illusory memories: a cognitive neuroscience analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(24), 13527-13533.
- Schacter, D. L., & Slotnick, S. D. (2004). The cognitive neuroscience of memory distortion. *Neuron*, 44(1), 149-160.
- Schacter, D. L., Guerin, S. A., & Jacques, P. L. S. (2011). Memory distortion: An adaptive perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(10), 467-474.
- Schacter, D. L., Norman, K. A., & Koutstaal, W. (1998). The cognitive neuroscience of constructive memory. *Annual Review of Psychology*, 49(1), 289-318.
- Schapiro, A. C., Reid, A. G., Morgan, A., Manoach, D. S., Verfaellie, M., & Stickgold, R. (2019). The hippocampus is necessary for the consolidation of a task that does not require the hippocampus for initial learning. *Hippocampus*, 29(11), 1091-1100.
- Seamon, J. G., Luo, C. R., Kopecky, J. J., Price, C. A., Rothschild, L., Fung, N. S., & Schwartz, M. A. (2002). Are false memories more difficult to forget than accurate memories? The effect of retention interval on recall and recognition. *Memory & Cognition*, 30(7), 1054-1064.
- Shaw, J., & Porter, S. (2015). Constructing rich false memories of committing crime. *Psychological Science*, 26(3), 291-301.
- Siegel, J. M. (2005). Clues to the functions of mammalian sleep. *Nature*, 437(7063), 1264-1271.
- Slotnick, S. D., & Schacter, D. L. (2004). A sensory signature that distinguishes true from false memories. *Nature Neuroscience*, 7(6), 664–672.
- Smith, C. (1995). Sleep states and memory processes. *Behavioural Brain Research*, 69(1–2), 137-145.
- Squire, L. R. (1992). Memory and the hippocampus: a synthesis from findings with rats, monkeys, and humans. *Psychological Review*, 99(2), 195.
- Squire, L. R., & Dede, A. J. (2015). Conscious and unconscious memory systems. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 7(3), a021667.

- Squire, L. R., & Zola, S. M. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(24), 13515–13522.
- Squire, L. R., & Zola-Morgan, S. (1991). The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253(5026), 1380–1386.
- Squire, L. R., Genzel, L., Wixted, J. T., & Morris, R. G. (2015). Memory consolidation. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 7(8), a021766.
- Steriade, M., & Amzica, F. (1998). Coalescence of sleep rhythms and their chronology in corticothalamic networks. *Sleep Research Online*, 1(1), 1-10.
- Steriade, M., & McCarley, R. W. (2005). Synchronized brain oscillations leading to neuronal plasticity during waking and sleep states. *Brain Control of Wakefulness and Sleep*, 255-344.
- Straube, B. (2012). An overview of the neuro-cognitive processes involved in the encoding, consolidation, and retrieval of true and false memories. *Behavioral and Brain Functions*, 8(1), 1-10.
- Sutherland, G. R., & McNaughton, B. (2000). Memory trace reactivation in hippocampal and neocortical neuronal ensembles. *Current Opinion in Neurobiology*, 10(2), 180-186.
- Tucker, M. A., Humiston, G. B., Summer, T., & Wamsley, E. (2020). Comparing the effects of sleep and rest on memory consolidation. *Nature and Science of Sleep*, 79-91.
- Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*.
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: from mind to brain. *Annual Review of Psychology*, 53(1).
- Wagner, U., Hallschmid, M., Rasch, B., & Born, J. (2006). Brief sleep after learning keeps emotional memories alive for years. *Biological psychiatry*, 60(7), 788-790.
- Wagner, U., Kashyap, N., Diekelmann, S., & Born, J. (2007). The impact of post-learning sleep vs. wakefulness on recognition memory for faces with different facial expressions. *Neurobiology of learning and memory*, 87(4), 679-687.
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annu. Rev. Psychol.*, 57, 139-166.
- Wamsley, E. J. (2019). Memory consolidation during waking rest. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(3), 171-173.
- Wang, H., Hu, Y., & Tsien, J. Z. (2006). Molecular and systems mechanisms of memory consolidation and storage. *Progress in Neurobiology*, 79(3), 123-135.

Wilhelm, I., Diekelmann, S., Molzow, I., Ayoub, A., Mölle, M., & Born, J. (2011). Sleep selectively enhances memory expected to be of future relevance. *Journal of Neuroscience*, *31*(5), 1563-1569.

Wilson, M. A., & McNaughton, B. L. (1994). Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, *265*(5172), 676-679.

Wiltgen, B. J., & Silva, A. J. (2007). Memory for context becomes less specific with time. *Learning & memory*, *14*(4), 313-317.

Wiltgen, B. J., Zhou, M., Cai, Y., Balaji, J., Karlsson, M. G., Parivash, S. N., ... & Silva, A. J. (2010). The hippocampus plays a selective role in the retrieval of detailed contextual memories. *Current biology*, *20*(15), 1336-1344.

Winocur, G., & Moscovitch, M. (2011). Memory transformation and systems consolidation. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *17*(5), 766-780.

Winocur, G., Moscovitch, M., & Bontempi, B. (2010). Memory formation and long-term retention in humans and animals: Convergence towards a transformation account of hippocampal–neocortical interactions. *Neuropsychologia*, *48*(8), 2339-2356.

Yassa, M. A., & Reagh, Z. M. (2013). Competitive trace theory: a role for the hippocampus in contextual interference during retrieval. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *7*, 107.

Zwissler, B., Sperber, C., Aigeldinger, S., Schindler, S., Kissler, J., & Plewnia, C. (2014). Shaping memory accuracy by left prefrontal transcranial direct current stimulation. *Journal of Neuroscience*, *34*(11), 4022–4026.

## 7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie, Otfried-Müller-Str. 25, Tübingen, unter Betreuung von PD Dr. Susanne Diekelmann durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Dr. Nicolas Lutz, PD Dr. Karsten Rauss und Prof. Dr. Jan Born.

Sämtliche Versuche wurden von mir nach Anleitung durch Dr. Nicolas Lutz durchgeführt.

Die Auswertung der Verhaltensdaten erfolgte durch Dr. Nicolas Lutz; die Auswertung der Schlafparameter wurde von Xuefeng Yang, Eva-Maria Kurz und Dr. Nicolas Lutz durchgeführt.

Die statistische Analyse erfolgte durch Dr. Nicolas Lutz und PD Dr. Karsten Rauss, die mich zum selbstständigen Nachvollziehen der Ergebnisse angeleitet haben.

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

Tübingen, den

---

Johanna Himbert

## 8 Veröffentlichung

Teile dieser Dissertationsschrift werden von Lutz et al. (*under review*) in den nächsten Monaten veröffentlicht.

## 9 Danksagung

An erster Stelle spreche ich PD Dr. Susanne Diekelmann meinen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen sowie die freundliche Bereitstellung dieses interessanten Promotionsthemas aus.

Besonders hervorheben möchte ich zudem die sehr gute Betreuung während der Durchführung der Studie durch Dr. Nicolas Lutz und PD Dr. Karsten Rauss. Ich schätzte die enge Kommunikation sowie die detaillierte Besprechung aller Abläufe und die daraus resultierenden reibungslosen Arbeitsabläufe. Es bestand zu jeder Zeit ein respektvoller Umgang sowie eine angenehme Atmosphäre.

Meine Anerkennung gilt in besonderem Maße PD Dr. Susanne Diekelmann und Prof. Dr. Jan Born, deren großer Erfahrungsschatz maßgeblich zum Gelingen der Studie beigetragen hat.

Abschließend möchte ich meiner Familie und meinen Freunden von Herzen danken, die mich während der Promotionszeit unterstützt haben und mit viel Empathie und wertvollen Denkanstößen an meiner Seite standen.

## 10 Anhang

### Probenacht

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
21:30	Ankunft	-	
21:30	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
21:35	Probandeninformation (vorab schicken)	2 min	
21:37	Einverständniserklärung	2 min	
21:39	Probandentgelt	2 min	
21:41	Probandendaten	5 min	
21:46	FrACT	10 min	
21:56	Color Vision Test	5 min	
22:01	Wortflüssigkeit (RWT): Buchtsabe P	2 min	
22:03	Händigkeit (EHI)	3 min	
22:06	Fertig machen zum Schlafen (Pyjama, Zähne putzen, etc.)	10 min	
22:16	Elektroden kleben	30 min	
22:46	Klo?	3 min	
22:49	Elektroden einstöpseln	5 min	
22:54	Impedanz-Check am Computer	1 min	
22:55	Aufnahme starten	-	
22:55	EEG/EOG/EMG-Tests (Blinzeln, etc.)	2 min	
23:00	Licht Aus, Tür zu (MARKER SETZEN!)		
07:00	Aufwecken (Licht An MARKER!)	-	
07:00	SF-A/R	5 min	
07:05	Abkabeln / Duschen / Elektroden putzen		

### 1-2 NÄCHTE ZU HAUSE

### Schlafbedingung Day 1

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
20:15	Ankunft	-	
20:15	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
20:20	Probandendaten	2 min	
20:22	Vigilanz-Test	7 min	
20:29	SSS	1 min	
20:30	Enkodierung	45 min	
21:15	SSS	1 min	
21:16	20-min Pause / Musik / EEG kleben!	20 min	
21:36	Recognition-Test	22 min	
21:58	Familiarity-Test	5 min	
22:03	Debriefing_Bedingung1_DAY1	3 min	
22:06	Digit Span Test	5 min	
22:11	Fertig machen zum Schlafen (Pyjama, Zähne putzen, etc.)	10 min	
22:21	Elektroden fertig kleben	10 min	
22:31	Klo?	3 min	
22:34	Elektroden einstöpseln	5 min	

22:39	Impedanz-Check am Computer	1 min	
22:40	Aufnahme starten	-	
22:50	EEG/EOG/EMG-Tests (Blinzeln, etc.)	2 min	
23:00	Licht Aus, Tür zu (MARKER SETZEN!)		
07:00	Aufwecken (Licht An MARKER!)	-	
07:00	SF-A/R	5 min	
07:05	Abkabeln / Duschen / Elektroden putzen	15 min???	
07:20	MotionWatch, Schlafstagebuch für 6 Nächte mitgeben		

### Schlafbedingung Day 7

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
15:00	Ankunft	-	
15:00	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
15:05	Probandendaten	5 min	
15:12	Vigilanz-Test	7 min	
15:19	SSS	1 min	
15:20	Recognition-Test	22 min	
15:42	Familiarity-Test	5 min	
15:47	Debriefing_Bedingung1_DAY7	3 min	
15:50	Digit Span Test	5 min	
15:55	PSQI	5 min	
16:00	MEQ	5 min	
16:05	Fertig		

**MINDESTENS 2 WOCHEN PAUSE**

### Wachbedingung Day 1

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
08:12	Ankunft	-	
08:12	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
08:17	Probandendaten	5 min	
08:22	Vigilanz-Test	7 min	
08:29	SSS	1 min	
08:30	Enkodierung	45 min	
09:45	SSS	1 min	
09:46	20-min Pause / Musik	20 min	
10:06	Recognition-Test	22 min	
10:28	Familiarity-Test	5 min	
10:33	Debriefing_Bedingung2_DAY1	3 min	
	Digit Span Test	5 min	
10:36	MotionWatch, Schlafstagebuch für 7 Nächte mitgeben		

### Wachbedingung Day 7

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
15:00	Ankunft	-	
15:00	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
15:05	Probandendaten	5 min	
15:12	Vigilanz-Test	7 min	
15:19	SSS	1 min	
15:20	Recognition-Test	22 min	
15:42	Familiarity-Test	5 min	
15:47	Debriefing_Bedingung2_DAY7	3 min	
15:50	Digit Span Test	5 min	
15:55	PSQI	5 min	
16:00	MEQ	5 min	
16:05	Fertig		

### Set Rating

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
15:00	Ankunft	-	
15:00	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
15:05	Probandendaten	5 min	
15:10	Vigilanz-Test	7 min	
15:17	SSS	1 min	
15:18	Set Rating	90 min	
16:48	Fertig		

### Probenacht

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
21:30	Ankunft	-	
21:30	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
21:35	Probandeninformation (vorab schicken)	2 min	
21:37	Einverständniserklärung	2 min	
21:39	Probandentgelt	2 min	
21:41	Probandendaten	5 min	
21:46	FrACT	10 min	
21:56	Color Vision Test	5 min	
22:01	Wortflüssigkeit (RWT): Buchtsabe P	2 min	
22:03	Händigkeit (EHI)	3 min	
22:06	Fertig machen zum Schlafen (Pyjama, Zähne putzen, etc.)	10 min	
22:16	Elektroden kleben	30 min	
22:46	Klo?	3 min	
22:49	Elektroden einstöpseln	5 min	
22:54	Impedanz-Check am Computer	1 min	
22:55	Aufnahme starten	-	
22:55	EEG/EOG/EMG-Tests (Blinzeln, etc.)	2 min	
23:00	Licht Aus, Tür zu (MARKER SETZEN!)		
07:00	Aufwecken (Licht An MARKER!)	-	
07:00	SF-A/R	5 min	
07:05	Abkabeln / Duschen / Elektroden putzen		

### 1-2 NÄCHTE ZU HAUSE

### Schlafbedingung Day 1

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
20:15	Ankunft	-	
20:15	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
20:20	Probandendaten	2 min	
20:22	Vigilanz-Test	7 min	
20:29	SSS	1 min	
20:30	Enkodierung	45 min	
21:15	SSS	1 min	
21:16	20-min Pause / Musik / EEG kleben!	20 min	
21:36	Recognition-Test	22 min	
21:58	Familiarity-Test	5 min	
22:03	Debriefing_Bedingung1_DAY1	3 min	
22:06	Digit Span Test	5 min	
22:11	Fertig machen zum Schlafen (Pyjama, Zähne putzen, etc.)	10 min	
22:21	Elektroden fertig kleben	10 min	
22:31	Klo?	3 min	
22:34	Elektroden einstöpseln	5 min	

22:39	Impedanz-Check am Computer	1 min	
22:40	Aufnahme starten	-	
22:50	EEG/EOG/EMG-Tests (Blinzeln, etc.)	2 min	
23:00	Licht Aus, Tür zu (MARKER SETZEN!)		
07:00	Aufwecken (Licht An MARKER!)	-	
07:00	SF-A/R	5 min	
07:05	Abkabeln / Duschen / Elektroden putzen	15 min???	
07:20	MotionWatch, Schlafstagebuch für 6 Nächte mitgeben		

### Schlafbedingung Day 7

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
15:00	Ankunft	-	
15:00	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
15:05	Probandendaten	5 min	
15:12	Vigilanz-Test	7 min	
15:19	SSS	1 min	
15:20	Recognition-Test	22 min	
15:42	Familiarity-Test	5 min	
15:47	Debriefing_Bedingung1_DAY7	3 min	
15:50	Digit Span Test	5 min	
15:55	PSQI	5 min	
16:00	MEQ	5 min	
16:05	Fertig		

**MINDESTENS 2 WOCHEN PAUSE**

### Wachbedingung Day 1

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
08:12	Ankunft	-	
08:12	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
08:17	Probandendaten	5 min	
08:22	Vigilanz-Test	7 min	
08:29	SSS	1 min	
08:30	Enkodierung	45 min	
09:45	SSS	1 min	
09:46	20-min Pause / Musik	20 min	
10:06	Recognition-Test	22 min	
10:28	Familiarity-Test	5 min	
10:33	Debriefing_Bedingung2_DAY1	3 min	
	Digit Span Test	5 min	
10:36	MotionWatch, Schlafstagebuch für 7 Nächte mitgeben		

### Wachbedingung Day 7

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
15:00	Ankunft	-	
15:00	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
15:05	Probandendaten	5 min	
15:12	Vigilanz-Test	7 min	
15:19	SSS	1 min	
15:20	Recognition-Test	22 min	
15:42	Familiarity-Test	5 min	
15:47	Debriefing_Bedingung2_DAY7	3 min	
15:50	Digit Span Test	5 min	
15:55	PSQI	5 min	
16:00	MEQ	5 min	
16:05	Fertig		

### Set Rating

Uhrzeit	Was	Dauer	Kommentar
15:00	Ankunft	-	
15:00	Corona-Clearing (inkl. Temperatur-Check)	5 min	
15:05	Probandendaten	5 min	
15:10	Vigilanz-Test	7 min	
15:17	SSS	1 min	
15:18	Set Rating	90 min	
16:48	Fertig		

Liebe Versuchsperson,

damit wir wissen, wie Sie die sieben Nächte vor dem Experiment zu Hause erlebt haben, bitten wir Sie, uns diesen kurzen

Fragebogen **direkt nach dem Aufwachen** auszufüllen.

	Datum:	Datum:	Datum:	Datum:	Datum:	Datum:
Wann ins Bett (Uhrzeit)?						
Wann Licht gelöscht (Uhrzeit)?						
Einschlafprobleme (ja/nein)?						
Durchgeschlafen (ja/nein)?						
Wie oft aufgewacht?						
Wann aufgewacht am Morgen (Uhrzeit)?						
Geträumt, wenn ja, was?						
Würden Sie sich nach dieser Nacht als erholt bezeichnen (ja/nein)?						
Zusätzliche Angaben oder Bemerkungen:						
Haben Sie innerhalb dieser beiden Tage etwas Außerordentliches erlebt (Bsp: Tod eines Angehörigen, Marathon gelaufen, Erkrankung, Prüfung nicht bestanden, u.ä.)?						

# Debriefing

Probanden-Code:

## **Frage 1**

Wie anstrengend fandest du das Experiment?

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

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

## **Frage 2**

Fandest du es schwierig die Figuren zu lernen?

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

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

## **Frage 3**

Hast du eine besondere Technik angewendet, um dir die Figuren zu merken?

## **Frage 4**

Fandest du es schwierig, die gelernten Figuren wiederzuerkennen?

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

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

## Debriefing

Probanden-Code:

### **Frage 1**

Wie anstrengend fandest du das Experiment?

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

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

### **Frage 2**

Fandest du es schwierig, die gelernten Figuren wiederzuerkennen?

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

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