

Aus dem
Institut für Medizinische Psychologie und
Verhaltensneurobiologie Tübingen

**Die Bedeutung des REM-Schlafs für die Konsolidierung
emotionaler Gedächtnisinhalte**

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

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

**vorgelegt von
Schag, Katharina Anna-Sophie**

**Promotionsjahr
2026**

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. M. Hallschmid

2. Berichterstatter: Professor Dr. A. J. Fallgatter

Tag der Disputation: 03.02.2026

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	
1. EINLEITUNG	1
1.1 WARUM VERBRINGEN WIR EIN DRITTEL UNSERES LEBENS IM SCHLAF?.....	2
1.2 SCHLAFENTZUG UND SEINE FOLGEN	3
1.3 SCHLAF IST NICHT GLEICH SCHLAF: UNTERSCHIEDE ZWISCHEN REM- UND NREM-SCHLAF.....	4
1.3.1 Schlafstadien	5
1.4 SCHLAFREGULATION	7
1.5 GEDÄCHTNISYSTEME	8
1.6 SCHLAF UND GEDÄCHTNIS	10
1.6.1 Wie wird das Gedächtnis gebildet?.....	10
1.6.2 Wie unterstützt Schlaf die Gedächtnisbildung?	14
1.7 SCHLAFDEPRIVATION ALS FORSCHUNGSMETHODE.....	16
1.8 ZIELSETZUNG DER STUDIE	17
2. MATERIAL UND METHODEN	20
2.1 VERSUCHSPERSONEN	20
2.2 VERSUCHSDESIGN	23
2.3 VERSUCHSABLAUF.....	23
2.3.1 Adaptionsnacht.....	24
2.3.2 Testnächte.....	24
2.4 POLYSOMNOGRAPHISCHE SCHLAFREGISTRIERUNG	28
2.4.1 Deprivation von REM-Schlaf bzw. SWS.....	30
2.5 EMOTIONALES UND DEKLARATIVES GEDÄCHTNIS	32
2.5.1 Food Location Memory Task (FLM).....	32
2.5.2 Emotionale und neutrale Texte.....	35
2.6 KONTROLLMAßE.....	36
2.6.1 Fragebögen.....	36
2.6.1.1 Eingangsfragebogen.....	36
2.6.1.2 Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF).....	36
2.6.2 Visuelle Analogskalen (VAS).....	36
2.6.3 Stanford-Schläfrigkeitsskala (SSS).....	37
2.6.4 Psychomotorischer Vigilanztest (PVT).....	37
2.6.5 Digit Span Task	38
2.6.6 Wortflüssigkeitstest	38
2.7 STATISTISCHE ANALYSE	39
3. ERGEBNISSE	41
3.1 SCHLAFDEPRIVATION	41
3.1.1 Gesamtschlafdauer (TST)	41
3.1.2 Wachzeit nach Schlafbeginn (WASO)	42
3.1.3 Schlafstadium 1 (S1).....	43
3.1.4 Prozentualer Anteil von REM-Schlaf und SWS	44

3.1.4.1	REM-Schlaf	44
3.1.4.2	Tiefschlaf.....	45
3.2	DIE ABRUFLEISTUNG	46
3.2.1	REM-Schlafdeprivation vs. SWS-Deprivation.....	46
3.3	ERKENNUNGSLEISTUNG	48
3.3.1	REM-Schlafdeprivation vs. SWS-Deprivation.....	49
3.4	WIEDERERKENNUNGSRATE BEI DIREKTEM UND VERSPÄTETEM ABRUF.....	50
3.4.1	Direkter Abruf.....	51
3.4.2	Verspäteter Abruf	52
3.4.3	Veränderung der Wiedererkennungseistung von direktem zu verspätetem Abruf	53
3.5	EMOTIONALE UND NEUTRALE TEXTE	54
3.5.1	Bewertungsskalen	54
3.5.2	Synonyme	57
3.5.2.1	Direkter Abruf.....	57
3.5.2.2	Verspäteter Abruf	58
3.5.2.3	Differenzwerte für den Synonymabruf	59
3.5.3	Wortreihenfolge	61
3.5.3.1	Direkter Abruf.....	61
3.5.3.2	Verspäteter Abruf	62
3.5.4	Differenzscore.....	63
3.6	WORTFLÜSSIGKEITSTEST	64
3.7	PSYCHOMOTORISCHER VIGILANZTEST	65
3.8	DIGIT SPAN TASK	66
4.	DISKUSSION	68
4.1	SCHLAFDEPRIVATION	68
4.2	ABRUF- UND ERKENNUNGSLEISTUNG	70
4.3	EINFLUSS DER SELEKTIVEN SCHLAFDEPRIVATION AUF DIE KONSOLIDIERUNG EMOTIONALER GEDÄCHTNISINHALTE	72
4.4	AUSWIRKUNGEN DER SELEKTIVEN SCHLAFDEPRIVATION AUF DIE WORTPRODUKTION	74
4.5	ERFASSUNG DER WACHSAMKEIT UND AUFMERKSAMKEIT	75
4.6	EINFLUSS DER SELEKTIVEN SCHLAFDEPRIVATION AUF DIE KOGNITIVE LEISTUNGSFÄHIGKEIT	76
4.7	LIMITATIONEN UND AUSBLICK.....	76
5.	ZUSAMMENFASSUNG	78
6.	LITERATURVERZEICHNIS	80
7.	ERKLÄRUNG ZUM EIGENANTEIL	87
8.	DANKSAGUNG.....	88
9.	ANHANG	89

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

ABBILDUNG 1: AUFTRETEN DER SCHLAFSTADIEN IM VERLAUF EINER NACHT (MODIFIZIERT NACH RASCH UND BORN 2013).....	5
ABBILDUNG 2: TAXONOMIE DES MENSCHLICHEN GEDÄCHTNISSES (MODIFIZIERT NACH PIEFKE & FINK, 2013)	9
ABBILDUNG 3: KOMPONENTEN DES ARBEITSGEDÄCHTNISSES (NACH BADDELEY 2003)	10
ABBILDUNG 4: PHASEN DER GEDÄCHTNISBILDUNG (MODIFIZIERT NACH WALKER UND STICKGOLD 2006).....	11
ABBILDUNG 5: ELEKTRODENPOSITIONIERUNG EEG.....	30
ABBILDUNG 6: ABLAUF DER LERNPHASE DES FOOD LOCATION MEMORY TASK.....	33
ABBILDUNG 7: ABLAUF DER DIREKTEN UND VERSPÄTETEN ABRUFPHASE DES FOOD LOCATION MEMORY TASK.....	34
ABBILDUNG 8: VERGLEICH DER GESAMTSCHLAFDAUER (TST) UNTER VERSCHIEDENEN SCHLAFBEDINGUNGEN.....	41
ABBILDUNG 9: SCHLAFDAUER NACH SCHLAFBEGINN (WASO) UNTER VERSCHIEDENEN SCHLAFBEDINGUNGEN.....	42
ABBILDUNG 10: DAUER DES SCHLAFSTADIUMS 1 (S1) UNTER VERSCHIEDENEN SCHLAFBEDINGUNGEN.....	43
ABBILDUNG 11: REM-SCHLAF (%) UNTER VERSCHIEDENEN SCHLAFBEDINGUNGEN.....	45
ABBILDUNG 12: TIEFSCHLAF (%) UNTER VERSCHIEDENEN SCHLAFBEDINGUNGEN.....	46
ABBILDUNG 13: ABRUFLEISTUNG VOR UND NACH DER REM-SCHLAFDEPRIVATION UND SWS-DEPRIVATION.....	48
ABBILDUNG 14: ERKENNUNGSLEISTUNG VOR UND NACH DER REM-SCHLAFDEPRIVATION UND SWS-DEPRIVATION	50
ABBILDUNG 15: WIEDERERKENNUNGSRATE BEI DIREKTEM ABRUF.....	51
ABBILDUNG 16: WIEDERERKENNUNGSRATE BEI VERSPÄTETEM ABRUF	52
ABBILDUNG 17: VERÄNDERUNG DER WIEDERERKENNUNGSLEISTUNG VON DIREKTEM ZU VERSPÄTETEM ABRUF.....	54
ABBILDUNG 18: EINFLUSS DER DEPRIVATION UND EMOTION AUF DIE BEWERTUNG VERSCHIEDENER BEDINGUNGEN.....	57
ABBILDUNG 19: RICHTIGE SYNONYME UNTER VERSCHIEDENEN DEPRIVATIONS- UND EMOTIONSBEDINGUNGEN BEI DIREKTEM ABRUF	58
ABBILDUNG 20: VERSPÄTETER ABRUF VON SYNONYMEN.....	59
ABBILDUNG 21: EINFLUSS DER DEPRIVATION UND EMOTION AUF DIE ANZAHL DER RICHTIGEN SYNONYME.....	60
ABBILDUNG 22: KORREKTE WORTPOSITIONEN BEI DIREKTEM ABRUF	62
ABBILDUNG 23: KORREKTE WORTPOSITIONEN BEIM VERSPÄTETEN ABRUF	63
ABBILDUNG 24: RICHTIGE WORTPOSITION ABHÄNGIG VON DER DEPRIVATION UND EMOTION.....	64
ABBILDUNG 25: DEPRIVATION UND WORTANZAHL.....	65
ABBILDUNG 26: DURCHSCHNITTLICHE ANTWORTZEITEN ABHÄNGIG VON DEPRIVATION UND SITZUNG	66
ABBILDUNG 27: DIGIT SPAN ABHÄNGIG VON DEPRIVATION UND SITZUNG	67

TABELLE 1: EIN- UND AUSSCHLUSSKRITERIEN	22
TABELLE 2: SCHEMATISCHER ABLAUF	27
TABELLE 3: DURCHSCHNITTLICHE SCHLAFPARAMETER BEI VERSCHIEDENEN DEPRIVATIONSBEDINGUNGEN	44
TABELLE 4: ABRUFLEISTUNG BEI REM-DEPRIVATION.....	89
TABELLE 5: ABRUFLEISTUNG NACH SWS-DEPRIVATION	90
TABELLE 6: ERKENNUNGSLEISTUNG NACH REM-DEPRIVATION	91
TABELLE 7: ERKENNUNGSLEISTUNG NACH SWS-DEPRIVATION	92
TABELLE 8: BEWERTUNGEN VERSCHIEDENER SEMANTISCHER DIMENSIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEPRIVATIONSARTEN UND EMOTIONEN.....	93
TABELLE 9: ERGEBNISSE DER ANOVA-ANALYSE FÜR BEWERTUNGSDIMENSIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DEPRIVATION UND EMOTION	96

Abkürzungsverzeichnis

ADA	Adaptionsnacht
AIC	Akaike Information Criterion
ANOVA	Varianzanalyse (engl. analysis of variance)
ARAS	Aufsteigendes retikuläres Aktivierungssystem
BIA	Bioelektrische Impedanzanalyse
BIC	Bayesian Information Criterion
BMI	Body-Mass-Index (kg/m ²)
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
FLM	Food Location Memory (Task)
FNE	First Night Effect
fMRT	Funktionelle MRT
GABA	Gamma-Aminobuttersäure (engl. gamma-aminobutyric acid)
IL-6	Interleukin-6
LTD	Langzeitdepression
LTP	Langzeitpotenzierung
MDBF	Multidimensionaler Befindlichkeitsfragebogen
MRT	Magnetresonanztomographie
NREM	Non-Rapid-Eye-Movement
OGTT	Oraler Glukose-Toleranztest
PTBS	Posttraumatische Belastungsstörung
PVT	Psychomotorischer Vigilanztest
REM	Rapid-Eye-Movement
RKI	Robert Koch-Institut
SCN	Nucleus suprachiasmaticus
SF-A/R	Fragebogen zur Schlafqualität
S1-4	Schlafstadium 1-4
SSS	Stanford-Schläfrigkeits-Skala
SWS	Slow-Wave-Sleep
TNF-α	Tumornekrosefaktor-alpha
TST	Gesamtschlafdauer (engl. Total sleep time)
VAS	Visuelle Analogskala
VLPO	Nucleus praepopticus lateralis (seitlicher präoptischer Kern)
W	Wachzustand
WASO	Wachdauer nach Schlafbeginn (engl. Wake after sleep onset)
WHR	Waist-to-Hip Ratio
ZNS	Zentrales Nervensystem

1. Einleitung

Ein Drittel seiner Lebenszeit verbringt der Mensch im Schlaf. Dabei stellt der Schlaf einen wichtigen physiologischen Prozess mit vielfältigen Funktionen dar, die noch nicht abschließend aufgeklärt sind. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass Schlaf weit mehr als nur eine Phase der Ruhe darstellt. Er unterstützt unter anderem die Regulation des Stoffwechsels, das Immunsystem, die Reparatur des Zellgewebes sowie die kognitive und emotionale Gesundheit. Ein wichtiger Fokus der aktuellen Forschung liegt auf der Rolle des Schlafes in der Gedächtnisbildung und -konsolidierung.

Schlafentzug ist ein Phänomen, das in der modernen Gesellschaft weit verbreitet ist. Laut dem Robert Koch-Institut (RKI) geben 25 % der deutschen Bevölkerung an, unter Schlafstörungen zu leiden, während 11 % von nicht erholsamen Schlaf berichten (Penzel et al., 2005). Die Folgen von Schlafdeprivation sind vielseitig. Schlafentzug wirkt sich nicht nur auf die physische Gesundheit aus, wie z.B. durch ein erhöhtes Risiko, eine Hypertonie oder einen Diabetes mellitus Typ II zu entwickeln, sondern hat auch Auswirkungen auf unser Gedächtnis.

In der vorliegenden Studie wurde die Wirkung selektiver Deprivation von REM-Schlaf (rapid eye movement sleep) und SWS (slow wave sleep) auf die schlaf-assoziierte Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte bei jungen, gesunden Männern untersucht.

Im Folgenden werden die physiologischen Grundlagen des Schlafs sowie die Einteilungen in verschiedene Schlafstadien erläutert. Die wichtigsten Gedächtnissysteme und ihre neuroanatomischen Grundlagen werden dargestellt und die Rolle des Schlafes in der Gedächtniskonsolidierung, mit Fokus auf emotionale Gedächtnisinhalte, wird beleuchtet.

1.1 Warum verbringen wir ein Drittel unseres Lebens im Schlaf?

James Krueger und Kollegen beschrieben den Schlaf als ein wissenschaftliches Rätsel (Krueger et al., 2016). Schlaf wird als ein natürlicher Zustand mit stark reduzierter Reaktionsfähigkeit beschrieben und zeichnet sich durch seine hohe Reversibilität aus (Rasch & Born, 2013; Siegel, 2005). Viele Körpervorgänge werden mit Beginn des Schlafes auf „Sparflamme“ gesetzt. So sinkt die Körpertemperatur um einige Zehntel-Grad, Atmung und Puls verlangsamen sich. Des Weiteren ist eine Senkung des Blutdrucks zu verzeichnen. Das Stresshormon Kortisol erreicht im Schlaf niedrigere Werte als im Wachzustand (Borbély, 1984). Die eingeschränkte Reaktionsfähigkeit während des Schlafes stellt aus evolutionärer Sicht eine potenzielle Gefahr für das Überleben dar. Da trotzdem alle Menschen und Tiere schlafen, ist davon auszugehen, dass der Schlaf eine wichtige Funktion erfüllt, die dieses Risiko rechtfertigt (Rattenborg et al., 2007). Eine Rolle des Schlafes zur Steigerung der Gesamtfitness eines Lebewesens wird diskutiert. Der Schlaf soll eine Energiesparfunktion (Berger & Phillips, 1995) haben, auch der Reparatur von Zellgewebe (Oswald, 1980) und der Stoffwechselregulation (Knutson et al., 2007) sowie der Immunfunktion (Lange et al., 2010; Zielinski et al., 2016) dienen. Die genannten Funktionen können jedoch auch im Wachzustand erfüllt werden. Vor allem für das kognitive, körperliche und emotionale Wohlbefinden soll der Schlaf unverzichtbar sein (Bacaro et al., 2024; Hirshkowitz et al., 2015). Es wird angenommen, dass der Schlaf für die Funktionalität des menschlichen Gehirns von großer Bedeutung ist (Rasch & Born, 2013).

Da das Gehirn dieselben begrenzten neuronalen Netzwerkkapazitäten sowohl für die akute bewusste Verarbeitung von Informationen als auch deren Langzeitspeicherung nutzt, lässt sich annehmen, dass die Gedächtniskonsolidierung möglicherweise eine der wichtigsten Funktionen ist, die den im Schlaf erlebten Bewusstseinsverlust erklären kann (Diekelmann et al., 2009). Somit lässt sich festhalten, dass der Schlaf eine essenzielle Rolle für die Gedächtnisbildung bei Tieren und Menschen einnimmt.

Der Schlafbedarf des Menschen unterliegt im Laufe des Lebens erheblichen Veränderungen. Neugeborene weisen eine Gesamtschlafdauer von 12-15 Stunden pro Tag auf, während Erwachsene im Durchschnitt 6-8 Stunden pro Nacht schlafen (Siegel, 2022). Ab einem Alter von drei Monaten zeigt sich das zyklische NREM- (non-rapid eye

movement)/ REM-Muster (rapid eye movement) eines Erwachsenen. Während Neugeborene einen REM-Schlafanteil von etwa 50 % aufweisen, nimmt der REM-Anteil im Alter von sechs Jahren auf 25 % ab, wie es im Normalfall bei Erwachsenen vorliegt (Chokroverty, 2010).

1.2 Schlafentzug und seine Folgen

Schlafentzug ist ein Phänomen, das in der modernen Gesellschaft weit verbreitet ist. Schlafentzug hat nicht nur Folgen in der subjektiven Wahrnehmung der Betroffenen. Der Entzug von Schlaf, die Schlafdeprivation, führt auch zu vielseitigen, nachweisbaren Auswirkungen auf die physische Gesundheit. Einige Hormone unterliegen dem zirkadianen Rhythmus und werden durch eine schlechte Schlafqualität oder Schlafstörungen verändert. Als Folge von Schlafentzug werden Adipositas und Diabetes mellitus Typ II diskutiert (Schipper et al., 2021). Schlafmangel beeinflusst die Ausschüttung der Hormone Leptin und Ghrelin, die eine wesentliche Rolle bei der Steuerung von Appetit und Energieverbrauch einnehmen. Schläft der Mensch zu wenig, führt der reduzierte Leptin- und erhöhte Ghrelinspiegel zu einem subjektiven Hungergefühl (Van Cauter et al., 2008). Auch Wachstumshormone unterliegen einem zirkadianen Rhythmus und werden während des Tiefschlafes ausgeschüttet. Schlafstörungen können sich negativ auf das Wachstum und die Muskelreparatur auswirken (Baranwal et al., 2023).

Ein ausreichender und erholsamer Schlaf ist für das Herz-Kreislauf-System unerlässlich. Während des Schlafes sinkt der Blutdruck und die Herzfrequenz verlangsamt sich. Auch das autonome Gleichgewicht verlagert sich in Richtung des parasympathischen Tonus. Eine durch Schlafmangel bedingte gesteigerte autonome Aktivität belastet das Herz-Kreislauf-System und erhöht das Risiko für kardiovaskuläre Probleme (Baranwal et al., 2023). Ein Zusammenhang zwischen kurzer Schlafdauer bzw. Schlaflosigkeit und dem erhöhten Risiko für das Auftreten von Bluthochdruck (sog. Hypertonie) konnte in einigen Studien nachgewiesen werden (Kawada, 2021; Meng et al., 2013). Eine Schlafdauer unter sechs

Stunden pro Nacht, ist mit einem erhöhten Risiko für eine Hypertonie¹ verknüpft (Gottlieb et al., 2006).

Die Bedeutung von ausreichendem und qualitativ hochwertigem Schlaf für die Stärkung des menschlichen Immunsystems ist in zahlreichen Studien belegt. Der Schlaf wirkt sich auf verschiedene Entzündungsmediatoren aus, wie z.B. die Zytokine und fördert dadurch die entzündliche Homöostase (Besedovsky et al., 2019). Bei Schlafentzug wurde eine erhöhte Produktion der proinflammatorischen Zytokine IL-6 und TNF- α festgestellt. Diese führen zu einer erhöhten Schläfrigkeit (Chokroverty, 2010). Langanhaltender Schlafmangel verringert die Aktivität der Killerzellen sowie die Antikörperproduktion und erhöht damit das Risiko von Infektionen und möglicherweise sogar das Risiko an Krebs zu erkranken (Baranwal et al., 2023).

Ein Zusammenhang zwischen Alzheimer und anderen Demenzerkrankungen und Schlafmangel wird ebenfalls diskutiert. Das zentrale Nervensystem (ZNS) stellt innerhalb der Organsysteme eine Ausnahme dar, da es über kein lymphatisches System verfügt. Hier wurde das glymphatische System entdeckt. Dieses System unterstützt den Abtransport von Stoffwechselabfallprodukten über perivaskuläre Kanäle hauptsächlich während des Schlafes (Plog & Nedergaard, 2018).

Auch die psychische Gesundheit kann durch Schlafmangel leiden. Schlaflosigkeit steht in einer bidirektionalen Beziehung zu Ängsten und Depressionen (Alvaro et al., 2013; Riemann et al., 2001). Auf akuter Ebene kann ein kurzzeitiger Schlafmangel zu Reizbarkeit, Müdigkeit und einer Verschlechterung der Stimmung führen.

1.3 Schlaf ist nicht gleich Schlaf: Unterschiede zwischen REM- und NREM-Schlaf

Die Einteilung des Schlafes in verschiedene Stadien erfolgt auf Grundlage der Elektroenzephalographie (EEG), Elektrokulographie (EOG) und Elektromyographie (EMG) in die Phasen REM- und NREM-Schlaf (Abbildung 1). Diese beiden Zustände wechseln sich zyklisch ab, wobei im Erwachsenenalter vier bis sechs Zyklen während des Schlafes auftreten können. Die Dauer eines jeden Zyklus beläuft sich auf durchschnittlich

¹ Hypertonie ist definiert als Bluthochdruck. Nach ESC/ESH-Leitlinie (ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension, 2018) liegt eine Hypertonie bei ≥ 140 mmHG systolisch und/oder ≥ 90 mmHg diastolisch vor.

90-110 Minuten. Der NREM-Schlaf manifestiert sich vornehmlich im ersten Drittel der Nacht, während der REM-Schlaf im letzten Drittel der Nacht dominiert (Chokroverty, 2010; Peirano & Algarín, 2007).

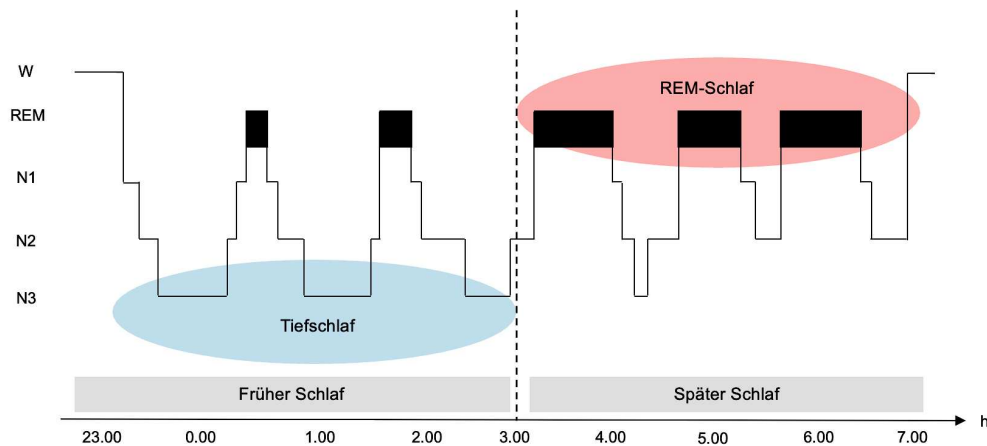


Abbildung 1: Auftreten der Schlafstadien im Verlauf einer Nacht (modifiziert nach Rasch und Born 2013)

Der Schlaf wurde nach Rechtschaffen und Kales in fünf verschiedene Stadien eingeteilt: Die NREM-Stadien 1, 2, 3 und 4 und das REM-Schlafstadium. Diese Einteilung wurde bis 2007 verwendet. Die American Academy of Sleep Medicine teilt seitdem den Schlaf in vier Stadien ein. Dazu gehören Stadium N1 (früher S1), N2 (früher S2), N3 (früher S3 und S4) und das REM-Stadium (Malhotra & Avidan, 2023).

1.3.1 Schlafstadien

Im entspannten Wachzustand liegt mehr als 50 % Alpha-Aktivität (8-13 Hz) vor und schnelle Augenbewegung sind im EOG erkennbar (Rodenbeck, 2013). Nach dem Einschlafen wird zunächst das Schlafstadium 1 (N1) mit einer Alpha-Aktivität von weniger als 50 % beobachtet. Der EEG-Rhythmus wird langsamer (2-7 Hz), niedrige Amplituden von ca. 10-30 μV mit Theta-Wellen sind sichtbar und außerdem ist das Stadium durch langsame, rollende Augenbewegungen sowie einem geringeren Muskeltonus im Vergleich zum Wachzustand (W) gekennzeichnet.

Die Präsenz von Schlafspindel und K-Komplexen indiziert das Vorliegen des zweiten Schlafstadiums (N2). Spindeln sind Wellen mit einer Frequenz von ca. 11-16 Hz, die innerhalb von 0,5 Sekunden auftreten. K-Komplexe sind Wellen mit höherer Amplitude von

mindestens 75 μ V und einer niedrigen Frequenz (< 1 Hz). Ihre Dauer beträgt mindestens 0,5 Sekunden.

Der sogenannten „Slow-Wave-Sleep“ (SWS) oder Tiefschlaf umfasst nach Rechtschaffen und Kales die Stadien 3 (S3) und 4 (S4), die nach der American Academy of Sleep Medicine als Schlafstadium N3 zusammengefasst werden. In diesem Stadium lassen sich Delta-Wellen mit einer Amplitude von mindestens 75 μ V und einer Frequenz von 0,5-2 Hz nachweisen. Im S3 lassen sich 20-50 % langsame Wellen mit hoher Amplitude erkennen. Liegt der Anteil langsamer Wellen mit hoher Amplitude bei über 50 %, ist von S4 auszugehen. Des Weiteren können Spindel und K-Komplexe auch in diesen beiden Stadien auftreten. Mit zunehmendem Alter verbringt der Mensch weniger Zeit im Stadium N3 und mehr Zeit im Stadium N2 (Patel et al., 2022).

Der 1953 entdeckte REM-Schlaf (Aserinsky & Kleitman, 1953) ist gekennzeichnet durch schnelle Augenbewegungen und einer niedrigen EEG-Aktivität mit einer Frequenz von 2-7 Hz, dem sogenannten Delta-Band. Das Elektromyogramm zeigt in dieser Schlafphase den niedrigsten Muskeltonus. Die Alpha-Aktivität ist häufig mit 1-2 Hz niedriger im Vergleich zum Wachzustand (Rodenbeck, 2013). Es wurde davon ausgegangen, dass 80 % der Träume im REM-Schlaf auftauchen (Chokroverty, 2010). Seit der Erkenntnis, dass der REM-Schlaf mit dem Prozess des Träumens einhergeht, stieg das Forschungsinteresse an diesem Schlafstadium. Allerdings können Träume auch im NREM-Schlaf auftreten. Durch eine intermittierende Aktivierung von Arousal-Systemen während dieser Schlafphase soll die Erinnerung an Träume erleichtert werden (Siclari et al., 2018).

Am Übergang zum nächsten Schlafstadium oder in den Wachzustand sowie als Reaktion auf die akustische Unterdrückung von REM- bzw. NREM-Schlaf treten häufig Abschnitte erhöhter muskulärer Aktivität (engl. movement arousal) auf, die bei einer Dauer von mehr als 15 Sekunden als „movement-time“ bezeichnet werden.

1.4 Schlafregulation

Für den Menschen ist der Schlaf von großer Bedeutung. Der Schlaf wird daher nicht durch einen spezifischen neuroanatomischen Ort reguliert und ist auch nicht von einem einzigen physiologischen Mechanismus abhängig (Dresler et al., 2014). Die Schlaf-Wach-Regulation speist sich nicht nur aus direkten Faktoren der Schlafhomöostase, sondern auch aus der zirkadianen Rhythmik, der die meisten Organsysteme unterworfen sind. Bei der Schlaf-Wach-Regulation gehören vor allem der Hirnstamm und Hypothalamus zu den wichtigen Bereichen (Dresler et al., 2014). Die im Hirnstamm liegende *Formatio reticularis* gilt als Ursprung des sogenannten aufsteigenden retikulären Aktivierungssystems (ARAS). Dieses sorgt für die Aufrechterhaltung der neuronalen Grundaktivität des Thalamus und des Kortex, welche für den Wachzustand nötig sind. Am ARAS sind zwei Transmittersysteme beteiligt: Das cholinerge System mit Acetylcholin als Transmitter und das aminerge System mit den Transmittern Serotonin und Noradrenalin (Erlacher & Erlacher, 2019). Während dem NREM-Schlaf wird das ARAS durch einen Schalter im Hypothalamus, dem Nucleus praeopticus ventrolateralis (VLPO), abgeschaltet. Im Schlaf hemmen die Neuronen des VLPO die monoaminerg-vermittelten Regionen des ARAS durch GABAerge und galatinerge Systeme (Rodenbeck, 2011). Im Wachzustand dagegen ist das ARAS aktiv und hemmt die Neuronen des VLPO. Durch die gegenseitige Hemmung kommt es zu einem scharfen Übergang zwischen Schlaf- und Wachzustand (Saper et al., 2005). Der VLPO enthält mehrheitlich GABAerge Neuronen zur Regulation. Gamma-Aminobuttersäure (GABA) ist ein wichtiger hemmender Neurotransmitter im Wachzustand und spielt eine essentielle Rolle bei der Einleitung des Schlafes (Gottesmann, 2002). Für die Wachheit sind insbesondere Neuronen aus dem Nucleus posterior hypothalami von Bedeutung. Diese setzen das Neuropeptid Orexin frei. Die Neuronen stimulieren das aminerge System und halten die Wachheit aufrecht. Eine Störung des Systems kann zur Narkolepsie führen (Chieffi et al., 2017).

Es wird angenommen, dass das Nukleosid Adenosin als endogener, homöostatischer Regulator des Schlafes fungiert und ein Bindeglied zwischen den humoralen und neuronalen Mechanismen der Schlafregulation darstellt. Die Annahme basiert auf der Erkenntnis, dass die extrazelluläre Adenosin-Konzentration im Kortex und im basalen Vorderhirn bei

langem Wachsein ansteigt und während dem Schlaf absinkt (Basheer et al., 2004; Huang et al., 2011).

Ein wichtiges Modell der Beschreibung der Schlafregulation ist das Zwei-Prozess-Modell von Borbély, welches zwei unterschiedliche Prozesse der Schlafregulierung beschreibt. Prozess S ist homöostatisch reguliert und erzeugt durch die Wachphase und die Abfallprodukte des Gehirns, wie Adenosin und Amyloid, einen inneren Schlafdruck (Albrecht & Ripperger, 2018; Borbély & Achermann, 1992). Hohe Adenosinspiegel fördern das Einschlafen, indem sie wachaktive Zellen hemmen (Porkka-Heiskanen, 1999). Prozess C beschreibt den zirkadianen Rhythmus, welcher autonom erzeugt wird (Borbély & Achermann, 1992). Der zirkadiane Rhythmus wird durch den Nucleus suprachiasmaticus (SCN) des Hypothalamus gesteuert (Saper et al., 2005). Der SCN fungiert als innere Uhr und synchronisiert den 24-Stunden-Rhythmus primär über den Licht-Dunkel-Zyklus (Kumar, 2008; Roenneberg et al., 2007). Zur Synchronisation empfängt der SCN Lichtinformationen über die Retina (Albrecht & Ripperger, 2018). Über das Hormon Melatonin wird ein Rücksignal zum SCN gesendet (Cajochen, 2022).

1.5 Gedächtnissysteme

Das Gedächtnis ist kein einheitliches System, sondern kann in ein sensorisches Gedächtnis, ein Kurz- und ein Langzeitgedächtnis unterteilt werden.

Das Langzeitgedächtnis kann in ein deklaratives und prozedurales Gedächtnis eingeteilt werden. Das deklarative Gedächtnis beruht auf der Funktion des Hippocampus und den angrenzenden Temporallappenstrukturen. Hier werden Fakten, das sogenannte semantische Gedächtnis, sowie Ereignisse, auch als episodisches Gedächtnis bezeichnet, gespeichert. In der Literatur wird es auch als „explizites“ Gedächtnis bezeichnet, da der Zugriff auf die gespeicherten Informationen in der Regel bewusst und willentlich erfolgt. Nach der Kodierung sind deklarative Erinnerungen empfindlicher gegenüber Störungen und unterliegen einer raschen Vergänglichkeit (Born et al., 2006). Das prozedurale bzw. non-deklarative Gedächtnis ermöglicht das Erlernen von sensorischen und motorischen Fähigkeiten, beispielsweise das Laufen. Die Wiedergabe erfolgt ohne Anstrengung und nicht willentlich, daher wird es auch als „implizites“ Gedächtnis bezeichnet. Genutzt

werden hierfür sensorische und motorische Regionen des Neocortex, die Basalganglien und das Cerebellum (Hallschmid & Born, 2006).

Die neuroanatomischen Strukturen, welche den Gedächtnissystemen zugrunde liegen, konnten anhand von anamnestischen Patienten beschrieben werden. In Studien konnte nachgewiesen werden, dass Patienten mit Amnesie Tests zum Erlernen von non-deklarativen Gedächtnisinhalten im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ohne Amnesie mit gleichem Erfolg absolvierten. Bei deklarativen Gedächtnistests, welche das Erlernen und Erinnern von Fakten erfordern, wiesen anamnestische Patienten jedoch deutliche Defizite im Vergleich zur Kontrollgruppe auf (Squire & Zola, 1996). Eine vollständige Beeinträchtigung des medialen Temporallappens führte nicht zu einer Beeinträchtigung des Erinnerungsvermögens. Diese Erkenntnis lässt darauf schließen, dass die Langzeitspeicherung der deklarativen Gedächtnisinhalte nicht alleine auf den medialen Temporallappen beschränkt, sondern auch mit anderen Hirnstrukturen assoziiert ist (Squire & Zola, 1996). Die Funktionen des Arbeitsgedächtnisses können keiner bestimmten Hirnregion zu geordnet werden, sondern resultierten aus der Interaktion zwischen dem präfrontalen Kortex mit anderen präfrontalen, parietalen und prämotorischen Hirnregionen (D'Esposito, 2007). Einen Überblick über die an den Gedächtnissystemen beteiligten Gehirnregionen bietet Abbildung 2.

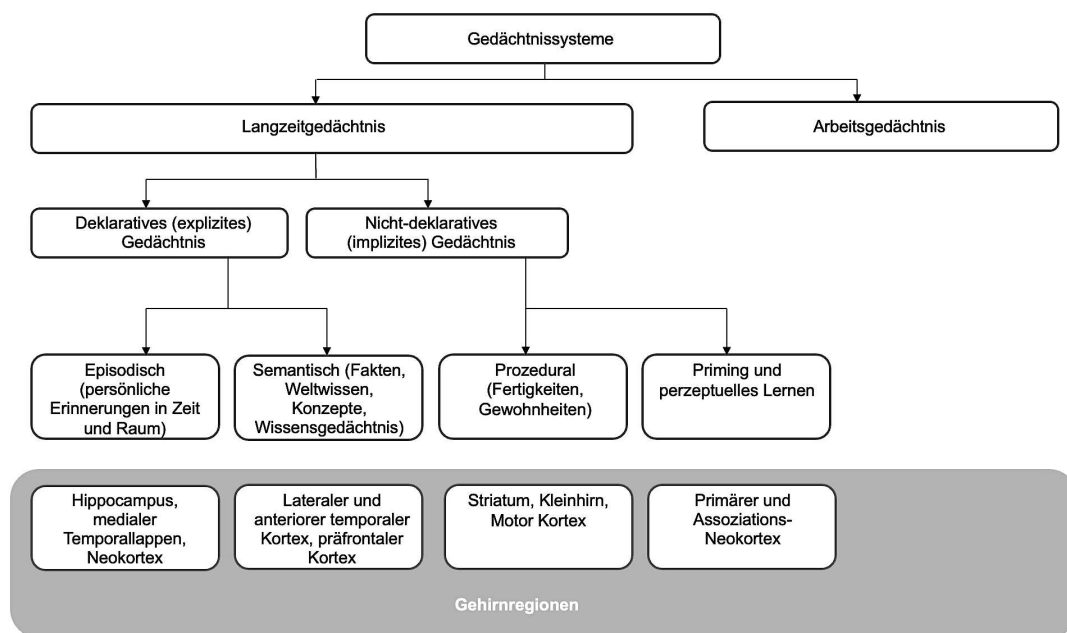


Abbildung 2: Taxonomie des menschlichen Gedächtnisses (modifiziert nach Piefke & Fink, 2013)

Das sensorische Gedächtnis dient der Speicherung von Sinneseindrücken für einen kurzen Zeitraum, wobei deren Inhalt anschließend einer Analyse und Bewertung unterzogen wird. Das Kurzzeitgedächtnis ist laut „Baddeleys Arbeitsmodell“ in der Lage simultane Gedächtnisleistungen zu erbringen. Die Inhalte werden unabhängig voneinander mit einem Code gespeichert. Die Codes werden drei Kurzzeitspeicherkonzepten zugewiesen: die phonologische Schleife, der visuell-räumliche Notizblock und der episodische Puffer (Baddeley, 2017) (Abbildung 3). Die phonologische Schleife ist für die Verarbeitung verbaler und auditiver Informationen zuständig. Visuelle und räumliche Informationen hingegen werden vom visuell-räumlichen Notizblock verarbeitet. Der episodische Puffer ermöglicht die Integration von Informationen aus der phonologischen Schleife, dem visuell-räumlichen Notizblock und dem Langzeitgedächtnis. Diese Informationen können bewusst abgerufen werden. Im Kurzzeitgedächtnis wird nur eine begrenzte Anzahl an Informationen für Sekunden bis maximal Minuten gespeichert. Die dauerhafte Speicherung der Inhalte setzt deren Überführung in das Langzeitgedächtnis voraus.

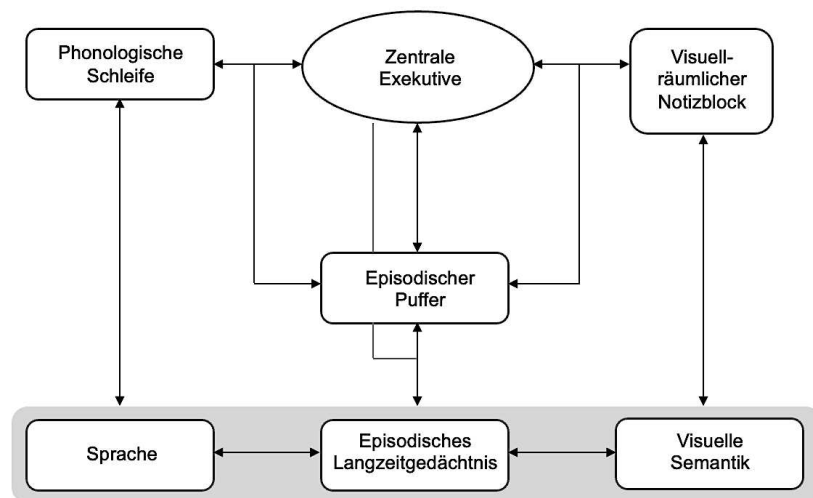


Abbildung 3: *Komponenten des Arbeitsgedächtnisses (nach Baddeley 2003)*

1.6 Schlaf und Gedächtnis

1.6.1 Wie wird das Gedächtnis gebildet?

Dem Schlaf werden viele Funktionen zugeschrieben. Die Gedächtnisfunktion ist womöglich die einzige Funktion, die den Bewusstseinsverlust während des Schlafes erklärt, der aus evolutionärer Sicht ein großes Risiko für das Überleben darstellt

(Kavanau, 1997). Bereits vor 100 Jahren lieferten Jenkins und Dallenbach den ersten experimentellen Beweis, dass der Schlaf die Festigung des Gedächtnisses fördert. Sie testeten das Lernen und Wiedergeben anhand einer Liste mit zufällig angeordneten Silben. Die beiden Versuchsteilnehmer (in diesem Fall die beiden Autoren selbst), die diese am Abend vor dem Schlafen auswendig lernten, konnten die Silben am folgenden Morgen besser wiedergeben, als wenn sie diese morgens lernten und am Abend wiedergeben sollten (Jenkins & Dallenbach, 1924). Seitdem beschäftigten sich viele Studien mit der Rolle des Schlafes für die Gedächtnisverarbeitung.

Der Speicherprozess des Gedächtnisses kann in drei Teilprozesse unterteilt werden: 1. Die Enkodierung - die Erfassung neuer Informationen. Es entstehen neue Gedächtnisspuren, die zunächst noch sehr labil sind (Rasch & Born, 2013). Dieser Prozess geschieht bereits in wenigen Millisekunden. 2. Die Konsolidierung – bei diesem Prozess werden neue Gedächtnisinhalte gefestigt, indem sie in eine stabilere und dauerhafte Form überführt und in bestehende Wissensnetzwerke eingebunden werden (Diekelmann et al., 2009). 3. Der Abruf – die Fähigkeit auf Informationen zugreifen zu können, sowohl bewusst als auch unbewusst. Abbildung 4 zeigt einen Überblick über die Phasen der Gedächtnisbildung.

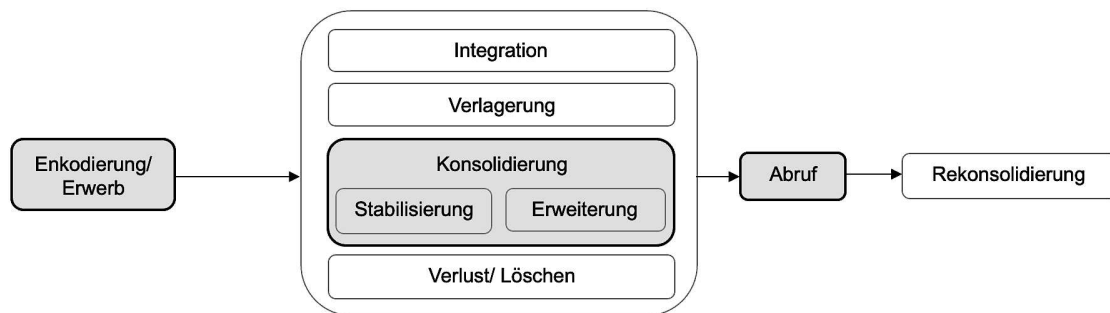


Abbildung 4: Phasen der Gedächtnisbildung (modifiziert nach Walker und Stickgold 2006)

Das Lernen und die Gedächtnisbildung beruhen auf längerfristigen Veränderungen der Stärke bei der synaptischen Übertragung auf neuronaler Ebene. Diesen Prozess nennt man synaptische Plastizität. Die Kodierung, als Hauptteil der synaptischen Plastizität, induziert eine synaptische Langzeitpotenzierung (LTP) oder eine Langzeitdepression (LTD). Nach der Kodierung sind die Gedächtnisspuren zunächst fragil und müssen verstärkt werden, um beständig zu werden (Gais et al., 2007). Die Konsolidierung kann

auf neuronaler Ebene in zwei Formen eingeteilt werden: Die synaptische Konsolidierung und die Systemkonsolidierung. Während den ersten Minuten bis Stunden nach dem Lernen erfolgt die synaptische Konsolidierung. Bei einer Erinnerung kommt es zu biochemischen Prozessen an den beteiligten Synapsen, die daraufhin zu einem Umbau der Neuronenfortsätze führen. Die Kommunikation zwischen den Neuronen wird dadurch effizienter. Die synaptische Konsolidierung tritt in allen Gedächtnissystemen auf. Darauf baut die Systemkonsolidierung auf, die viel länger dauert und hippocampusabhängige Erinnerungen reorganisiert, wodurch diese möglicherweise vom Hippocampus unabhängig werden (Dudai, 2004).

Auf Grundlage von Studien mit Tests zum Erlernen von Silbenlisten schlugen Müller und Pilzecker im Jahr 1900 erstmals die Konsolidierungstheorie vor. „Nach alledem bleibt nichts Anderes übrig als die Annahme, dass nach dem Lesen einer Silbenreihe gewisse physiologische Vorgänge, welche zur Verstärkung der beim Lesen der Reihe gestifteten Assoziationen dienen, mit allmählich abnehmender Stärke eine gewisse Zeit hindurch nachdauern.“ (Müller & Pilzecker, 1900). Nach dem aktiven Lernen sollen im Gehirn somit noch für einige Zeit physiologische Prozesse stattfinden, die der Konsolidierung dienen sollen (Lechner et al., 1999).

Mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) konnte gezeigt werden, dass der Schlaf nach dem Lernen die Aktivierung des Hippocampus während des Abrufens von Wortpaaren 48 Stunden nach dem Lernen verstärkt. Dies deutet auf eine intrahippocampale Gedächtniskonsolidierung hin. Gleichzeitig konnte eine funktionelle Konnektivität zwischen Hippocampus und medialem präfrontalen Kortex festgestellt werden. Ein halbes Jahr später aktivierten Erinnerungen den medialen präfrontalen Kortex stärker, was darauf hindeutet, dass Schlaf zu langanhaltenden Veränderungen in der Repräsentation von Gedächtnisinhalten führt (Gais et al., 2007).

Es gibt allerdings auch Hinweise, dass die Verarbeitung auch ohne hippocampale Vermittlung stattfinden kann. Patienten mit starker Amnesie und bilateraler Hippocampusschädigung zeigten trotzdem eine normale schlafabhängige Konsolidierung bei visuellen Texturunterscheidungsaufgaben. Eine Beteiligung des Hippocampus scheint bei dieser einen Aufgabe nicht notwendig zu sein (Maquet et al., 2003).

Studien zeigten, dass Schlaf eine Verbesserung der Leistung sowohl für deklarative (Stickgold, 2009) als auch prozedurale Gedächtnisinhalte (Fischer et al., 2002) bewirkt. Bei Abruftests für motorische Fähigkeiten, wie das Tippen einer Fingersequenz, konnte eine deutliche Leistungssteigerung erkannt werden, wenn auf das Training eine Schlafphase folgte. Es konnte eine 20 %ige Steigerung der motorischen Geschwindigkeit nachgewiesen werden, ohne dass es dabei zu Verlusten der Genauigkeit kam. Im Wachzustand konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden (Walker et al., 2002). Auch in Studien mit fMRT konnten Hinweise für eine stärkere automatisierte Leistung nach dem Schlafen gefunden werden. Das fMRT zeigte beim Abruf der Fingerfrequenz-Tapping-Aufgabe nach dem Schlaf eine stärkere Beteiligung der linken parietalen Kortextbereiche und der Basalganglien sowie eine deutlich geringere Beteiligung der präfrontalen, prämotorischen und primär motorischen Kortextbereiche (Fischer et al., 2005). Gais und Kollegen untersuchten die Fähigkeit von Gymnasiasten sich Vokabeln zu merken und zeigten, dass das deklarative Gedächtnis gestärkt wird, wenn wenige Stunden nach dem Lernen geschlafen wird (Gais et al., 2006).

Auch die Konsolidierung emotionaler Ereignisse und Informationen (Payne et al., 2008) wird durch den Schlaf unterstützt. Das Gedächtnis für emotionale Texte verbesserte sich durch den Schlaf nach dem Lernen im Vergleich zum Wachzustand und die Auswirkungen konnten sogar vier Jahre später noch erkannt werden (Wagner et al., 2006). Diekelmann sieht emotionale Erinnerungen als Untergruppe deklarativer Erinnerungen an (Diekelmann et al., 2009). Erinnerungen an emotionale Ereignisse bleiben nicht als exakte Replikation der ursprünglichen Erfahrung erhalten, sondern vielmehr werden zentrale, emotionale Informationen auf Kosten von Hintergrunddetails erinnert (Jacobs et al., 2004). So können Augenzeugen sich auch besser an die Waffe des Täters erinnern als an andere wichtige Aspekte des Verbrechens, die sich im Hintergrund abspielten (Stanny & Johnson, 2000).

Payne und Kollegen konnten nachweisen, dass negativ erregende Objekte im Vergleich zu neutralen Objekten besser erinnert werden konnten. An die Hintergründe negativer Objekte hingegen konnten sich die Probanden schlechter erinnern als die mit neutralen Objekten verbundenen Hintergründe (Payne et al., 2008). Schlaf scheint somit nur das Gedächtnis zentraler emotionaler Objekte zu fördern, nicht aber ihre Hintergründe. Es

besteht die Annahme, dass der Schlaf nur die auffälligsten und erinnerungswürdigsten Informationen bewahrt.

1.6.2 Wie unterstützt Schlaf die Gedächtnisbildung?

Zur Frage, wie Schlaf zur Bildung des Gedächtnisses beiträgt, gibt es zwei Hypothesen. Die Zwei-Prozess-Hypothese geht davon aus, dass während der Schlafphasen unterschiedliche Gedächtnisinhalte konsolidiert werden. Während des NREM-Schlafs sollen deklarative Inhalte und während des REM-Schlafs non-deklarative Inhalte konsolidiert werden (Gais & Born, 2004). Die sequentielle Hypothese dagegen besagt, dass die Konsolidierung von der mehrfach zyklischen Abfolge von NREM- und REM-Schlaf profitiert (Giuditta et al., 1995). Die sequentielle Abfolge aller Schlafphasen soll ein optimales Zusammenspiel für die Konsolidierung von Erinnerungsspuren darstellen (Stickgold et al., 2000).

Für die Konsolidierung deklarativer Erinnerungen scheint ein SWS-reicher Schlaf wichtig zu sein (MacDonald & Cote, 2021; Stickgold, 2009). Plihal und Born untersuchten an 20 gesunden Männern den Abruf des deklarativen Gedächtnisses anhand von Listen mit gepaarten Assoziationen und die Fähigkeit zum Spiegeln, somit das prozedurale Gedächtnis, nach SWS und REM-Schlaf. Es zeigte sich, dass der Schlaf das Erinnerungsvermögen und die Abrufmöglichkeit des Erlernten im Allgemeinen verbesserte (Plihal & Born, 1997). Andere Studien zeigten divergent dazu, dass SWS auch die prozeduralen Fähigkeiten verbessern kann (Aeschbach et al., 2008; Smith et al., 2004).

Die langsamen Oszillationen (im Bereich von 0,5-2 Hz) während des Tiefschlafes haben eine zentrale Rolle in der Gedächtniskonsolidierung und spiegeln womöglich das Schlafbedürfnis wider (Aeschbach et al., 2008). Diese langsamen Oszillationen entstehen in neokortikalen Netzwerken durch langsame Schwingungen (1 Hz) des Membranpotentials von Millionen kortikaler Neuronen zwischen der De- (Up-State) und Hyperpolarisation (Down-State) (Aeschbach et al., 2008) und hängen zum Teil von der Nutzung dieser Netzwerke zur Kodierung von Informationen bei Wachheit ab (Born et al., 2006). Die langsame Wellenaktivität ist ein wichtiger Faktor für die Verbesserung der Wahrnehmung durch den Schlaf und zeigt, dass der Prozess der Schlafhomöostase im

Zusammenhang mit dem Lernen steht (Aeschbach et al., 2008). Zwischen langsamen Oszillationen und Spindeln besteht ein Zusammenhang. Die Spindeldichte kann als Marker für die Dichte der langsamen Oszillationen angesehen werden (Genzel et al., 2014). Es gibt deutliche Hinweise für einen positive Zusammenhang zwischen Spindeln und den Prozessen der Gedächtniskonsolidierung (Rasch & Born, 2013). So konnte Gais in seiner Studie einen signifikanten Anstieg der Spindeldichte nach dem Erlernen deklarativer Inhalte nachweisen. Innerhalb der ersten 90 Minuten des Schlafes zeigte sich dieser Effekt am deutlichsten. Die Spindeldichte stand im Zusammenhang mit der Abrufleistung vor und nach dem Schlaf (Gais et al., 2002). Eine aktuelle Studie zeigte, dass die Kopplungsleistung der Spindeln und langsamen Oszillation mit einer gestörten funktionellen Konnektivität im schlafabhängigen hippocampalen Subnetz und besseren Gedächtnisleistung verbunden ist (Bastian et al., 2022).

Ein unzureichender Schlaf scheint auf molekularer Ebene die vom Hippocampus abhängige Modulation von Molekülen zu beeinträchtigen. Diese Moleküle sind an der Gedächtnisbildung beteiligt und eine Störung führt zu einer Beeinträchtigung der Gedächtniskonsolidierung. Eine Vielzahl von Genen scheint während des Schlafes nach dem Training im Gehirn hochreguliert zu werden. Mindestens ein frühes Gen (*zif-286*), das mit der synaptischen Plastizität in Zusammenhang steht, wird während des REM-Schlafes als Reaktion auf einen Umweltreiz oder auf eine direkte elektrische Stimulation des Hippocampus hochreguliert (Walker & Stickgold, 2004).

Es gibt übereinstimmende Beweise dafür, dass der Schlaf und vor allem der REM-Schlaf die Konsolidierung des emotionalen Gedächtnisses unterstützt. Emotionale Ereignisse können allgemein genauer und lebendiger erinnert werden im Vergleich zu Neutralen. Für das emotionale Gedächtnis stellt die Amygdala den wichtigsten Hirnbereich dar. Die Aktivität der Amygdala wird insbesondere im REM-Schlaf verstärkt (Maquet et al., 1996). Vermutet wird, dass Neuronen der Amygdala bei emotionalen Ereignissen eine Theta-Aktivität und verschiedene Arten von Oszillationen während des Schlafes aufweisen. Diese Synchronisation könnte die synaptische Plastizität fördern, indem die Interaktion zwischen den am deklarativen Gedächtnis beteiligten Bereichen des Temporallappens und den neokortikalen Speicherstellen erleichtert wird (Paré et al., 2002). Auch Fogel beobachtete, dass die Theta-Aktivität im REM-Schlaf an der Konsolidierung des deklarativen Gedächtnisses beteiligt ist (Fogel et al., 2007).

Wagner und Kollegen konnten Beweise für die verstärkte Wirkung des REM-Schlafes auf die Konsolidierung emotionaler Erinnerungen liefern. Probanden, die nachts schliefen zeigten bessere Werte beim Erkennen emotionaler Bilder im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Schlaf. Für neutrale Bilder konnte keine gedächtnissteigernde Wirkung festgestellt werden (Wagner et al., 2001).

Der REM-Schlaf fördert auch die Konsolidierung des nicht-deklarativen Gedächtnis (Fogel et al., 2007; Plihal & Born, 1999; Stickgold, 2009). Smith und Kollegen konnten eine Beeinträchtigung beim Abruf implizit gelernter Sequenzen durch REM-Schlafentzug feststellen. Eine Beeinträchtigung bei deklarativen Gedächtnisaufgaben konnte nicht ermittelt werden (Smith et al., 2004).

Neuere Studien gestehen dem REM-Schlaf eine Rolle bei der Verarbeitung emotionaler Gedächtnisinhalte zu, allerdings sollen Teile der Konsolidierung des emotionalen Gedächtnisses auch während des SWS stattfinden. (Ackermann & Rasch, 2014). SWS und REM-Schlaf könnten eine komplementäre Rolle bei der Konsolidierung emotionaler Inhalte spielen. REM-Schlaf soll laut einer aktuellen Studie womöglich am Vergessen emotionaler Erinnerungen beteiligt sein (Yuksel et al., 2025).

1.7 Schlafdeprivation als Forschungsmethode

Die Deprivation bezeichnet den Entzug des gesamten Schlafes oder einzelner Schlafphasen. Bei der experimentellen Deprivation gibt es verschiedene Ansätze. Bei der „totalen Schlafdeprivation“ wird der Schlaf der Probanden die ganze Nacht unterdrückt. Die „selektive Schlafdeprivation“ beschreibt die Deprivation einer bestimmten Schlafphase, beispielsweise dem REM-Schlaf, während bei der „partiellen Schlafdeprivation“ nur vier Stunden geschlafen wird. Der Schlaf kann entweder in der ersten oder zweiten Nachthälfte stattfinden (Peigneux et al., 2001). Die „partielle Schlafdeprivation“ gilt als weniger stressauslösend.

Die Proband*innen werden polysomnographisch überwacht und können in einem bestimmten Schlafstadium geweckt werden. Im Anschluss beginnt der Schlafzyklus von neuem. Allerdings verkürzt sich die Zeit bis zum Erreichen der nächsten Phase des entsprechenden Schlafstadiums. Dieses Verfahren ist jedoch mit einem hohen Maß an

Stress für den Probanden verbunden. Die Unterdrückung des Schlafes eines Probanden kann durch verschiedene sensorische Reize herbeigeführt werden. Dabei können Reize wie akustische, mechanische, optische, thermische oder auch nozizeptive Stimuli verwendet werden. Die akustische Stimulation ist mit einer geringen Invasivität bei kurzer Latenzzeit zwischen der Stimulation und der Reaktion des Probanden verbunden. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Frequenzen und Intensitäten zu wählen. Mit dem akustischen Signal soll der Proband nicht geweckt werden, sondern nur eine Änderung der Schlafphase bewirkt werden. Der Übergang in eine andere Schlafphase wird durch sogenannte Mikroarousals gekennzeichnet (Raschke & Fischer, 1997). Die Reaktion der Probanden auf die abgespielten Töne ist individuell.

Schlafstörungen und Schlafmangel gehen mit einer Vielzahl von Beeinträchtigungen einher, die sich sowohl auf die kognitive Leistungsfähigkeit als auch auf die emotionale Befindlichkeit auswirken (Rasch and Born 2013). Die Durchführung von Studien mit Schlafdeprivation wurde kritisiert, da sie bei den Probanden Stress verursacht und deren spätere Erinnerungsleistung beeinträchtigt (Born & Gais, 2000). In erster Linie wird davon ausgegangen, dass ein Mangel an REM-Schlaf sowohl in der ersten als auch in der zweiten Nacht die spätere Fähigkeit zum Abruf des Gelernten beeinträchtigen soll (Smith, 1993).

1.8 Zielsetzung der Studie

In bisherigen Studien konnte nachgewiesen werden, dass der NREM-Schlaf direkt an der Gedächtniskonsolidierung beteiligt ist, jedoch ist die Rolle des REM-Schlafes aufgrund der Schwierigkeit, die neuronale Aktivität zu isolieren, umstritten (Boyce et al., 2017). Die vorliegende Studie zielt darauf ab, die Rolle des REM-Schlafes für die Bildung von emotionalen Gedächtnisinhalten aufzuklären. Dabei werden folgende übergeordnete Hypothesen untersucht:

- Die selektive Deprivation des REM-Schlafes im Vergleich zur Tiefschlafdeprivation bei jungen, gesunden Männern verschlechtert die schlafassoziierte Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte.
- Im Umkehrschluss führt die Tiefschlafdeprivation zu einer Verschlechterung des episodischen Gedächtnisses.

Zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen wurden eine polysomnographische Schlafableitung und verschiedene Gedächtnisaufgaben eingesetzt. Mit Hilfe des Food Location Memory Task wurde der Einfluss der selektiven Schlafdeprivation auf die Konsolidierung deklarativer Gedächtnisinhalte überprüft. Dabei wurden den Probanden emotionale und neutrale Objekte, nämlich Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittel-Items gezeigt und später die Abruf- und Erkennungsleistung ermittelt. Standardisierte emotionale und neutrale Texte wurden zur Untersuchung des Einflusses der Schlafdeprivation auf die Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte angewandt.

Folgende untergeordnete Hypothesen werden untersucht:

- REM-Schlafentzug führt dazu, dass Probanden emotionale (essensbezogene) Objekte im Vergleich zu neutralen Objekten weniger gut erkennen als nach SWS-Entzug. Nach dem SWS-Entzug sollten die Probanden die Position der Bilder auf dem Bildschirm weniger gut erinnern als nach der REM-Schlafdeprivation.
- Bei den Texten sollten die meisten Textbewertungen sich zwischen emotionalen und neutralen Texten unterscheiden. Einen Effekt der Deprivationsart oder ein Interaktionseffekt bei der Bewertung sollte es nicht geben.
- Das Erkennen relevanter Kontext-Wörter in emotionalen und neutralen Texten gelingt nach REM-Schlafentzug schlechter als nach SWS-Deprivation. Nach REM-Deprivation können Inhaltswörter der emotionalen Texte schlechter in die korrekte Reihenfolge gebracht werden als die Wörter der neutralen Texte.

Die Kontrollaufgaben Wortflüssigkeitstest, Psychomotorischer Vigilanztest und Digit Span Task sollten keinen Effekt zwischen den Bedingungen zeigen. Der Wortflüssigkeitstest dient der Erfassung der semantischen Wortflüssigkeit, während mit Hilfe des Psychomotorischen Vigilanztests die Reaktionsfähigkeit getestet wird. Zur Erfassung der Leistung des Kurzzeitgedächtnisses mussten beim Digit Span Task Zahlenreihenfolgen korrekt wiedergegeben werden. Diese werden angewandt, um einen Einfluss der Deprivation auf andere kognitive Prozesse außer dem Langzeitgedächtnis auszuschließen, um eine Verfälschung der Ergebnisse für die Gedächtnisaufgaben zu vermeiden.

Auf Basis der Aufklärung der Rolle des REM-Schlafes und seiner Bedeutung für die Gedächtniskonsolidierung könnten schlafhygienische Ansätze entwickelt werden, um die Gedächtnisfunktion des Schlafs gezielt zu fördern.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchspersonen

Die vorliegende Studie umfasste 33 gesunde, normal- bis leicht übergewichtige (Body-Mass-Index (BMI) 19-27,5 kg/m²) Männer im Alter von 18 bis 35 Jahren. Neun Versuchsteilnehmer schieden aus der Studie aus. Davon schieden sieben Probanden nach der Adaptionsnacht und zwei nach der ersten Deprivationsnacht aus. Sieben Teilnehmer wurden aus der Studie ausgeschlossen, da die Anforderungen einer Deprivation des REM-Schlafes bzw. SWS unter 10 % während der ersten oder zweiten Nacht nicht erfüllbar waren oder sie keinen REM-Schlaf zeigten. Die nachfolgenden Ergebnisse basieren somit auf den Daten von 18 Probanden (N=18). Um einen Einfluss zyklusabhängiger Schwankungen als Einflussgröße auf die sensiblen hormonellen Parameter der Datenerhebung zu vermeiden, wurden keine Frauen in die Stichprobe eingeschlossen. Dieses Kriterium war besonders ausschlaggebend für die Untersuchung von Stoffwechselprozessen, die als Teilaspekte der Studie in zwei anderen Doktorarbeiten (von Johannes Ballmann und Cédric Hillert) präsentiert werden.

Die Teilnahme an der Studie setzte voraus, dass die Probanden einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus aufwiesen, was eine Schlafdauer von 7-9 Stunden Schlaf pro Nacht implizierte. Des Weiteren waren keine Schlafstörungen und keine Schichtarbeit in den letzten vier Wochen vor der Teilnahme an der Studie zu verzeichnen. Als klinische Ausschlusskriterien galten psychiatrische und neurologische Erkrankungen sowie damit assoziierte Krampfleiden und kardiovaskuläre, pulmonale, endokrine und gastrointestinale Erkrankungen.

Die Erfüllung der Voraussetzungen für eine Studienteilnahme (Tabelle 1) wurde im Rahmen eines Telefonscreenings eruiert und anschließend durch eine Voruntersuchung validiert. Beim Screening wurden zunächst allgemeine Informationen wie Geburtsdatum, Ethnizität, Muttersprache, Händigkeit und Einschränkungen beim Farbsehen oder allergische Reaktionen auf EEG-Gel erfragt. Des Weiteren wurden Fragen zum Lifestyle des Probanden gestellt. Dabei spielten die körperliche Aktivität und ihre Häufigkeit sowie der Konsum von Nikotin und Drogen eine Rolle. Der Proband hatte ebenfalls Angaben

über sein Essverhalten zu machen. Er wurde nach Diäten (Vegetarier, Veganer, Pescetarier, Omnivore, sonstige) und Nahrungsmittelallergien/-abneigungen befragt. Thematisiert wurde auch das Schlafverhalten in Bezug auf den Einschlafzeitpunkt, die gewöhnliche Schlafdauer, die Wachdauer während der Nacht und regelmäßigen Schlaf tagsüber.

Es wurde eine Anamnese hinsichtlich aktueller Beschwerden, Vorerkrankungen, früherer Krankenhausaufenthalte und der aktuellen Medikamenteneinnahme durchgeführt. Zudem erfolgte eine körperliche Untersuchung, einschließlich der Messung von Blutdruck und Herzfrequenz sowie der Bestimmung von Körpergröße und -gewicht. Darüber hinaus wurden der BMI, der Kopf-, Taillen- und Hüftumfang sowie das Taille-Hüft-Verhältnis (Waist-to-Hip Ratio, WHR) ermittelt. Zur Bestimmung der Körperzusammensetzung wurde eine Bioimpedanzanalyse durchgeführt, während zur Bestimmung von Routinelaborparametern eine Blutentnahme erfolgte.

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte mittels Aushänge und Verteiler-E-Mails. Vor Studienbeginn wurden die Probanden sowohl mündlich als auch schriftlich über die Risiken der Teilnahme aufgeklärt. Nach Abschluss aller Testnächte erhielten die Probanden eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 320,- €. Die Studie erfolgt nach der Genehmigung durch die Ethikkommission des Universitätsklinikums Tübingen (Projektnummer: 615/2021BO1).

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien

Kriterium	Zugelassene Werte
Alter	18-35 Jahre
Geschlecht	Männlich
Hip-to-Waist Ratio	< 1
Body-Mass-Index	19-27,5 kg/m ²
Fettmasse	> 14,0 % und < 24,5 %
Ausbildung	Mindestens Fachhochschulreife
Sprachkenntnisse	Deutsch auf Konversationsniveau
Schlaf-Wach-Rhythmus	Mindestens in den 4 Wochen vor Teilnahme normal
Interkontinentalflüge (>4 Stunden Zeitunterschied)	Nicht innerhalb der letzten 4 Wochen
Nikotin	Regelmäßiger Konsum nicht zulässig
Schichtarbeit	Nicht innerhalb der letzten 4 Wochen
Teilnahme an anderen Studien mit ähnlichen Gedächtnisaufgaben	Nicht zulässig
Medikamenteneinnahme	Nicht innerhalb der letzten 4 Wochen
Teilnahme an anderen Studien mit Medikamenteneinnahme und/oder Blutentnahmen	Nicht innerhalb von 4 Wochen vor und 4 Wochen nach der Teilnahme am Experiment
Blutspende	Nicht innerhalb von 4 Wochen vor und 4 Wochen nach der Teilnahme am Experiment
Blutdruck	<139 mmHg systolisch und <89 mmHg diastolisch in Ruhe
Herzfrequenz	50-80 Schläge pro Minute in Ruhe
HbA1c	< 6% (42 mmol/mol)
Hämoglobin	> 140 g/l
Natrium	135-145 mmol/l
Kalium	3,6-4,8 mmol/l
Kalzium	2,2-2,7 mmol/l
Chlorid	95-105 mval/l
Glukose	70-110 mg/dl
Bilirubin	0,1-1,2 mg/dl

Glutamat-Pyruvat-Transaminase (GTP)	< 50 U/l
Alkalische Phosphatase (AP)	30-120 U/l
Gamma-Glutamyl-Transferase (GGT)	< 66 U/l
C-reaktives Protein (CRP)	< 1 mg/dl
Quick	70-120 %
Partielle Thromboplastinzeit (PTT)	< 38 sec

2.2 Versuchsdesign

Die Studie wurde in einem einfach-blinden randomisierten cross-over Design durchgeführt. Ein vollständig doppelblinded Experiment war nicht praktikabel, da die Versuchsdurchführenden die entsprechende Schlafstadien-Deprivation kennen mussten. Jeder Proband stellte seine eigene Kontrolle dar und durchlief zwei Versuchsbedingungen: zwei aufeinanderfolgende Testnächte mit SWS-Deprivation, in denen er bei Auftreten von Tiefschlaf geweckt wurde und zwei aufeinanderfolgende Testnächte mit REM-Schlafdeprivation, in denen er bei Auftreten von REM-Schlaf geweckt wurde. Dieses Design erlaubte es eine mögliche doppelte Dissoziation zwischen REM- und Tiefschlaf auf die Konsolidierung von emotionalem bzw. deklarativem Gedächtnis zu untersuchen.

2.3 Versuchsablauf

Die Probanden erhielten die Anweisung, am Tag vor einer Testnacht auf den Konsum alkoholischer Getränke sowie auf Kaffee und andere koffeinhaltige Getränke oder Speisen nach 14 Uhr zu verzichten. Am ersten Tag des Experimentes sollte der Proband um 7-8 Uhr morgens aufstehen. In den Wochen vor und auch während der Teilnahme sollten die Probanden auf einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus achten.

Die zwei Testphasen wurden in einem Abstand von zwei bis vier Wochen durchgeführt. Die beiden Testnächte einer Testphase begannen jeweils um 19 Uhr. Ihr Ende wurde auf den übernächsten Tag um 11 Uhr festgesetzt.

2.3.1 Adaptionnacht

Da der Schlaf unter Laborbedingungen durch die ungewohnte Umgebung und die Elektroden zur polysomnographischen Schlafableitung beeinträchtigt sein kann und eine Eingewöhnungsphase erfordert, kamen die Probanden vorab zu einer Eingewöhnungsnacht von 21:30 bis 12:20 Uhr ins Schlaflabor. Zu Beginn der Eingewöhnungsnacht bekam der Proband einen Akzelerometer in Form einer Motionwatch zur Überwachung der körperlichen Aktivität, des Schlafes sowie des zirkadianen Rhythmus angelegt. Im Anschluss wurden die Elektroden zur Ableitung der elektrischen Aktivität des menschlichen Körpers während des Schlafes sowie zur Registrierung der elektrischen Aktivität des Herzens (EKG) angebracht. Nach der Beantwortung zweier Fragebögen wurde das Licht ausgemacht und die Schlafableitung ohne Deprivation aufgezeichnet. Am nächsten Morgen wurde der Proband um 7 Uhr geweckt und es wurden im noch abgedunkelten Raum zwei Speichelproben im Abstand von 15 Minuten zur Bestimmung des Kortisolspiegels entnommen. Dafür nahm der Proband eine Watterolle für zwei Minuten in den Mund ohne dabei zu Kauen. Die Watterolle wurde nach Ablauf der Zeit in einer Salivette platziert, zentrifugiert und eingefroren. Während der Versuchsdurchführende das Zentrifugieren übernahm, beantwortete der Proband einen Fragebogen. Im Anschluss wurden die Elektroden entfernt und dem Probanden wurde die Möglichkeit gegeben, sich zu duschen und auszuruhen. Um 8:25 Uhr wurde eine Basalmessung mittels indirekter Kalorimetrie durchgeführt. Nach dem Anlegen einer Venenverweilkanüle startete der orale Glukose-Toleranztest (OGTT), bei welchem in bestimmten Abständen (Zeitpunkte in Minuten: 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180) Blut zur Bestimmung von Glukose, Insulin, C-Peptid, Glukagon und Kortisol entnommen wurde. Der OGTT stellt eine wesentliche Grundlage für die Beantwortung einer weiteren Forschungsfrage der Studie dar (vgl. Dissertation Ballmann, J) Der OGTT dauerte insgesamt drei Stunden. Im Anschluss wurde der Proband entlassen.

2.3.2 Testnächte

Die Testnächte begannen um 19 Uhr im Schlaflabor des Instituts für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie. Um eine Beeinflussung durch emotionale

Inhalte außerhalb der Studie zu vermeiden, wurde das Mobiltelefon des Probanden weggelegt und stand lediglich im Notfall zur Verfügung. Nach Beantwortung zweier Fragebögen erhielt der Proband ein leichtes standardisiertes Abendessen. Im Rahmen der Studie wurde der individuelle Kalorienbedarf zur Erforschung einer weiteren Forschungsfrage exakt berechnet (vgl. Dissertation Hillert, C). Bevor er sich bettfertig machte, wurde dem Probanden ein Akzelerometer angelegt. Im Versuchsprotokoll wurde die Modellnummer der entsprechenden Motionwatch festgehalten. Im Anschluss erfolgte die Vorbereitung des Probanden auf die Nacht und die Elektroden für die Polysomnographie sowie für das EKG wurden angelegt. Ab 20:45 Uhr starteten die deklarativen und emotionalen Lernaufgaben. Durchgeführt wurden der psychomotorische Vigilanztest (PVT), die Lernphase des Food Location Memory Task mit einer 10-minütigen Pause vor der direkten Abrufphase des Memory Task, in welcher Tetris gespielt wurde. Des Weiteren wurden der Digit-Span Task sowie das Lesen und Wiedergeben eines neutralen und eines emotionalen Textes durchgeführt. Zwischen dem Lesen und der Wiedergabe wurde ebenfalls für zehn Minuten das Spiel Tetris eingebaut. Es folgte ein kurzer Fragebogen und um 23 Uhr legte sich der Proband schlafen und die Deprivation von REM-Schlaf bzw. SWS begann. Um 7 Uhr wurde der Proband geweckt und es wurden Kortisol-Proben im noch dunklen Raum entnommen, äquivalent zum Vorgehen in der Eingewöhnungsnacht. Im Anschluss an die Beantwortung eines Fragebogens wurden die Elektroden entfernt, sodass der Proband eine Dusche nehmen konnte. Die Basalmessung des Energieverbrauchs mittels indirekter Kalorimetrie fand vor, während und nach dem OGTT statt. Es wurde eine Venenverweilkanüle in eine Unterarmvene zur Entnahme von Blutproben während des OGTTs angelegt. Nach der ersten Blutentnahme wurde eine mono- und oligosaccharidhaltige Lösung eingenommen. Der Arm wurde auf ein Wärmekissen gelagert und in definierten Abständen wurden Proben entnommen. Entnommen wurden bei jedem OGTT ca. 140 ml Blut zur Bestimmung von Insulin, Glukose, C-Peptid, Glukagon und Kortisol. Die Venenverweilkanüle wurde nach drei Stunden Liegezeit entfernt und der Proband erhielt ein standardisiertes Mittagessen, angepasst an seinen individuellen kalorischen Tagesbedarf. Den Versuchsteilnehmern wurde die Möglichkeit geboten, den Tag mit vorab ausgewählten Filmen oder Büchern zu verbringen. Somit konnten etwaige emotionale oder anregende Einflüsse eliminiert werden. Der Proband erhielt zu zwei

Zeitpunkten einen Snack in Form eines Riegels (Raw bite Riegel) und am Nachmittag erfolgte erneut eine Befragung anhand eines standardisierten Fragebogens. Um 17 Uhr fand ein Spaziergang nach standardisierter Route über das Klinikgelände mit geringer Steigung statt. Im Anschluss erhielt der Proband ein standardisiertes Abendessen entsprechend seinem individuellen kalorischen Tagesbedarf. Nach Beantwortung eines weiteren Fragebogens am Computer wurden erneut die Elektroden geklebt und die indirekte Kalorimetrie zur Messung des postprandialen Energieverbrauchs durchgeführt. Es folgte die Abfrage der deklarativen und emotionalen Lerntests vom Vortag. Zusätzlich wurde ein Wortflüssigkeitstest durchgeführt, um die Abruffähigkeit des Probanden zu testen. Nach Beantwortung eines kurzen Fragebogens begann um 23 Uhr die Schlafenszeit und erneut erfolgte die entsprechende Schlafdeprivation von REM-Schlaf bzw. SWS. Am letzten Morgen der Testnacht wurden erneut zwei Speichelproben mittels Kortisol-Salivetten im Abstand von 15 Minuten gesammelt und ein Fragebogen beantwortet. Nach dem Entfernen der Elektroden und der Durchführung der indirekten Kalorimetrie wurden der Stopp-Signal Task und der Effort Allocation Task durchgeführt, um die kognitive Kontrolle über das Essverhalten sowie die Motivation für Belohnung zu arbeiten, zu messen. Mit einem umfangreichen Frühstücksbuffet wurde das spontane Essverhalten getestet. Der zeitliche Ablauf ist in Tabelle 2 gezeigt.

Die zweite Testphase, in welcher die entgegengesetzte Schlafdeprivation erfolgte, verlief nach dem gleichen Schema 2-4 Wochen nach der ersten Testphase.

Tabelle 2: *Schematischer Ablauf*

Soll-Zeit	Ereignis
19:00	Proband trifft im Labor ein und Handy wird weggelegt
19:05	Fragebögen, MDBF, VAS, SSS
19:20	Abendessen
19:35	Anlegen eines Akzelerometers
19:40	Proband macht sich bettfertig
19:50	Elektroden für Polysomnographie und EKG werden geklebt
20:45	Psychomotorischer Vigilanztest (PVT)
20:55	Food Location Memory Task (Lernphase)
21:25	Tetris (Pause)
21:35	Food Location Memory Task (direkte Abrufphase)
22:00	Digit-Span Task
22:05	Emotionale Texte (Lernphase)
22:15	Tetris (Pause)
22:25	Emotionale Texte (direkte Abrufphase)
22:55	Fragebogen, MDBF, VAS, SSS
23:00	EEG wird getestet; Licht aus; Akustische Unterdrückung von REM-Schlaf bzw. SWS
07:00	Proband wird geweckt und Speichelprobe wird im dunklen Raum gesammelt
07:20	Fragebogen
07:45	Elektroden werden entfernt
07:55	Proband geht duschen und hat Ruhezeit
08:25	Indirekte Kalorimetrie (Basalmessung)
09:00	Venenverweilkanüle wird gelegt
09:20	Beginn OGTT
10:30	Indirekte Kalorimetrie
12:10	Fragebogen
12:20	Ende OGTT; Mittagessen
13:40	Indirekte Kalorimetrie (postprandial)
14:30	Snack
16:10	Fragebogen
16:30	Snack
17:00	Standardisierter Spaziergang

18:50	Abendessen
19:15	Fragebogen
19:20	Proband macht sich bettfertig
19:30	Elektroden für Polysomnographie und EKG werden geklebt
20:20	Indirekte Kalorimetrie (postprandial)
20:45	PVT
20:55	Food Location Memory Task (verspätete Abrufphase)
21:25	Digit-Span Task
21:45	Emotionale Texte (verspätete Abrufphase)
22:25	Wortflüssigkeitstest
22:55	Fragebogen
23:00	EEG wird getestet; Licht aus; Akustische Unterdrückung von REM-Schlaf bzw. SWS
07:00	Proband wird geweckt und Speichelprobe wird im dunklen Raum gesammelt
07:20	Fragebogen
07:30	Elektroden werden entfernt
07:50	Proband geht duschen und hat Ruhezeit
08:25	Indirekte Kalorimetrie (Basalmessung)
09:00	Stopp-Signal Task
09:30	Effort Allocation Task
10:15	Frühstücksbuffet
10:45	Fragebogen
10:50	Abschließende Aufklärung des Probanden und Entlassung

2.4 Polysomnographische Schlafregistrierung

Zur Ableitung des Elektroenzephalogramms (EEG), Elektromyogramms (EMG), Elektrokulogramms (EOG) und Elektrokardiogramms (EKG) kamen ein Brain Amp-Verstärker (Firma Brain Products, Deutschland) sowie ein D360-Verstärker (Digitimer Ltd., Großbritannien) zum Einsatz. Mit dem BrainVision Recorder (Brain Products GmbH) wurde die polysomnographische Schlafregistrierung aufgenommen und gespeichert. Kombiniert mit einem Deprivationsprotokoll im PsychoPy Coder (Version 2.2.3, Opem Science Tools Ltd.) erfolgte die Deprivation von REM-Schlaf bzw. SWS durch die Versuchsdurchführenden.

Die Platzierung der Elektroden am Kopf erfolgte gemäß dem internationalen 10-20-System an den Positionen F3, FZ, F4, C3, CZ, C4, P3, PZ, P4, M1 und M2 (Abbildung 5). Zusätzlich wurden fünf Elektroden im Gesicht angebracht. Eine Elektrode wurde als Erdungselektrode (Ground) mittig zwischen den Augenbrauen positioniert. Die beiden Elektroden zur Ableitung der vertikalen und horizontalen Augenbewegungen als EOG wurden rechtsseitig oberhalb und linksseitig unterhalb des Orbitarandes angebracht. Zur Ableitung des Muskeltonus des Musculus mentalis wurden am Kinn beidseits je eine Elektrode befestigt. Die zwei EKG-Elektroden wurden linksseitig unterhalb dem 12. Rippenbogen auf der Medioklavikularlinie und rechtsseitig unterhalb der Klavikula positioniert.

Der Mittelpunkt des Kopfes wurde durch Abmessen der Distanz zwischen Nasion und Inion sowie durch Messung des Abstandes zwischen dem linken und dem rechten Ohr ermittelt. Mithilfe einer EEG-Kappe, die dem Kopfumfang des Probanden entsprach, konnten die Positionen auf dem Kopf markiert werden.

Die entsprechenden Hautareale wurden vor dem Anbringen der Silberchlorid-Napfelektroden mit einem alkoholhaltigen Desinfektionsmittel (Softasept®N farblos, B. Braun SE, Melsungen, Deutschland) gereinigt und mithilfe einer Abrasivpaste (Spes medica, Italien) wurden Hautpartikel und Schuppen entfernt. Vor dem Ankleben der Elektroden wurde eine Elektrodencreme (lic2® Elektrodencreme, SOMNOmedics GmbH, Randersacker, Deutschland) zur Verbesserung der Elektrodenimpedanz aufgetragen. Die im Gesicht angebrachten Elektroden wurden mit einem Klebering versehen. Eine zusätzliche Fixierung mit Pflasterstreifen verhinderte ein Lösen der Elektroden während der Nacht.

Abschließend wurde die Impedanz im BrainVision Recorder (Brain Products GmbH) überprüft. Die neun EEG-Elektroden und die beiden Referenzelektroden sollten bei unter 5Ω , die Gesichtselektroden bei unter 20Ω liegen. Für die EKG-Elektroden war kein bestimmter Wert vorgegeben.

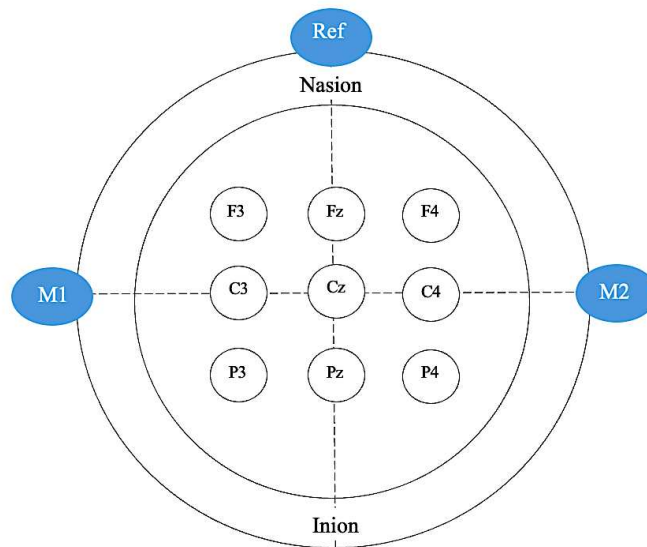


Abbildung 5: Elektrodenpositionierung EEG

2.4.1 Deprivation von REM-Schlaf bzw. SWS

Während der Proband schlief, wurden das EEG, EOG und EMG über das Programm BrainVision Recorder analysiert. Sollte in der Testsitzung der Tiefschlaf depriviert werden, so wurde der Schlaf nach Erkennen von drei Delta-Wellen in einem Zeitfenster von 15 Sekunden mittels eines akustischen Reizes unterbrochen. Bei Testsitzungen, in denen der REM-Schlaf depriviert werden sollte, wurde bei Erkennen eines niedrigen EMGs ein Ton abgespielt.

Verschiedene Töne wurden über ein laborinternes PsychoPy Programm (Version 2.2.3, Open Science Tools Ltd.) ausgewählt und für maximal 20 Sekunden dem Probanden über die Kopfhörer abgespielt. Die Lautstärke konnte dabei kontinuierlich variiert werden. Die Töne wurden in der Nacht in wechselnder Reihenfolge abgespielt, sodass eine Gewöhnung des Probanden an die akustischen Reize vermieden und eine Reaktion gewährleistet werden konnte. Ein vollständiges Erwachen durch die Deprivation sollte vorerst möglichst vermieden werden und der Probanden sollte in eine leichtere Schlafphase befördert werden.

Reagierte der Proband auf die akustische Deprivation nicht, wurde weiter nach Protokoll verfahren. Es bestand die Möglichkeit, in den Raum hineinzugehen und dem Probanden eine kurze Frage, eine leichte Rechenaufgabe oder ein leichtes Wortspiel zu stellen und

anschließend den Raum wieder zu verlassen. Erzielte der/die Versuchsleiter*in auch damit keine sichtbare Veränderung in der EEG-Aufzeichnung, war ein Betreten des Raumes, eine Dimmung des Lichtes sowie eine Aufforderung zum Aufsetzen möglich. In einigen Fällen konnte eine leichte körperliche Übung, wie beispielsweise das Kreisen der Schultern oder das Bewegen der Arme, eine hilfreiche Maßnahme bei der Deprivation darstellen.

Retrospektiv wurden die Nächte ausgewertet, um das Ergebnis der nächtlichen Deprivation von REM- bzw. Tiefschlaf zu beurteilen. Dabei wurden die Testnächte von zwei geschulten Personen unabhängig voneinander ausgewertet, wobei der/die erste Bewerter*in in der Nacht anwesend war und der/die zweite Bewerter*in nicht anwesend war.

Die Auswertung erfolgt gemäß einem detaillierten Protokoll, das an die Bewertungsrichtlinien von Rechtschaffenheit & Kales angelehnt ist. Sofern die Arousal-Rate in weniger als 50 % der Epoche (30 Sekunden) und somit in weniger als 15 Sekunden in der zweiten Hälfte der Epoche lag, wird die Schlafphase bis zum Trigger gewertet. Trigger zeigen den Zeitpunkt der akustischen Stimulation an. Da Delta-Wellen häufig von der Stimulation ausgelöst werden, erfolgt keine Wertung dieser Wellen nach dem Trigger. Liegt Arousal in weniger als 50 % in der ersten Hälfte der Epoche vor, dann wird die Schlafphase nach der Erregung gewertet. Beträgt die durch die Stimulation in der Nacht ausgelöste Erregung über 50 % der Epoche, wird die Epoche mit Movement Time gewertet. Ist in den Epochen nach dem Movement Time weiterer Arousal erkennbar, werden diese Epochen dem Wachzustand zugeordnet.

Zielkriterium für eine erfolgreiche selektive Schlafdeprivation war ein REM- bzw. Tiefschlafanteil unter 10 %.

2.5 Emotionales und deklaratives Gedächtnis

2.5.1 Food Location Memory Task (FLM)

Der FLM ist eine computergestützte Aufgabe zur Überprüfung des Einflusses der Tief- bzw. REM-Schlafdeprivation auf die Konsolidierung deklarativer Gedächtnisinhalte. Dabei wird zum einen das (essensbezogene) emotionale Gedächtnis getestet, wofür besonders Konsolidierungsprozesse während des REM-Schlafs wichtig sind, und zum anderen episodische „Objekt-Platz“ Assoziationen, deren Festigung eher vom Tiefschlaf abhängt. Als Stimuli wurden Bilder genutzt, die Alltagsgegenstände und Speisen darstellen. Dabei handelt es sich um bereits als positiv bzw. neutral emotional bewertete Stimuli vom International Affective Picture System (IAPS). Die Bilder wurden auf zwei Skalen von je 1-5 bewertet. Zum einen wurde die Valenz (negativ – positiv) und zum anderen die Erregung (nicht erregend – erregend) bewertet. Bilder, die auf der Erregungsskala unter 2.5 lagen und deren Valenz zwischen 3.32-5 lagen wurden als positiv gewertet. Bilder, die auf der Erregungsskala über 2.5 mit einer Valenz von 1.66-3.31 lagen, wurden als negativ gewertet.

Die Aufgabe gliedert sich in drei Phasen: Eine Lernphase (Abbildung 6), eine direkte und eine verspätete Abrufphase. In der Lernphase werden dem Probanden vier Blöcke mit jeweils 22 Bildern präsentiert. Nach jedem Block besteht die Möglichkeit einer kurzen Pause. Die Bilder werden auf einer Karte der Stadt Aachen an vier verschiedenen Orten für jeweils zwei Sekunden präsentiert. Der Proband hat die Aufgabe, sich die jeweilige Abbildung mit dem korrekten Ausstellungsort einzuprägen, um den Zusammenhang zu einem späteren Zeitpunkt rekonstruieren zu können. Auf der Karte werden dem Probanden verschiedene Lokalitäten zur Orientierung dargeboten. Nach jedem Bild soll auf zwei Skalen angegeben werden wie angenehm - nicht angenehm (Valenz-Skala) bzw. erregend - ruhig (Erregungs-Skala) er das Bild fand. Die beiden Bewertungen spiegeln die subjektiv empfundene Emotionalität des Bildes wider und erfolgen ohne Zeitlimit. Der Proband wird dazu aufgefordert, bei der Bewertung die gesamte Skalenbreite zu nutzen.

Vor der Lernphase wird eine kurze Übung durchgeführt, um den Probanden die Möglichkeit zu geben, sich mit dem Ablauf vertraut zu machen und etwaige Fragen zu stellen.

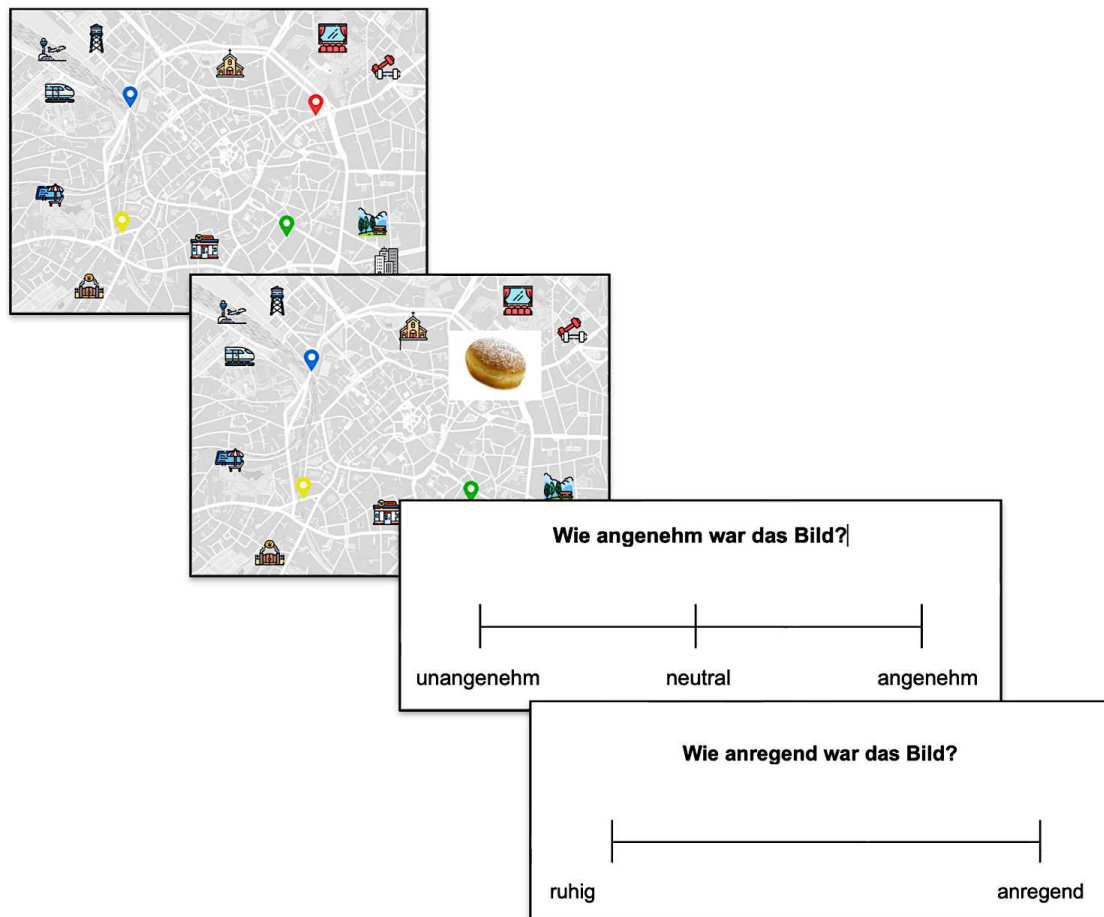


Abbildung 6: *Ablauf der Lernphase des Food Location Memory Task*

Nach einer kurzen Fixation von 0,5 Sekunden (hier nicht sichtbar) wurde die Stadtkarte von Aachen mit den Lokalisationspunkten für 2 Sekunden dargestellt. Zur besseren Orientierung wurden verschiedene Symbole Lokalisationspunkte eingeblendet. Der Lokalisationspunkt, an dem das Bild kurz darauf erschien, wurde durch Blinken für eine Sekunde hervorgehoben. Anschließend wurde das Bild für 4 Sekunden gezeigt. Die darauffolgende Bewertung verlief ohne Zeitlimit auf einer Valenz- und einer Erregungsskala.

Nach der Lernphase folgt der Abruf des Gelernten. Der Ablauf der direkten und verspäteten Abrufphase ist identisch (Abbildung 7). Dem Probanden werden 88 Bilder gezeigt, die er zur Hälfte bereits in der Lernphase gesehen hat und andere, die für ihn neu sind. Der Proband wird bei jedem Bild gefragt, ob er das Bild bereits kennt. Die Auswahl erfolgt mittels der Buttons „Ja“ und „Nein“. Wurde das Bild bereits in der Lernphase präsentiert und wurde die Frage mit „Ja“ beantwortet, erfolgt im Anschluss die

Zuordnung der korrekten Lokalisation auf der Karte. Nach jeder Entscheidung soll der Proband auf einer Skala angeben, wie sicher er sich seiner Entscheidung ist. Analog zur Lernphase soll auf Skalen angegeben werden, wie ansprechend bzw. erregend das Objekt wahrgenommen wird. Alle Instruktionen werden dem Probanden vorgelesen und in schriftlicher Form auf dem Bildschirm präsentiert.

Während der Aufgabe wird die Hirnaktivität mittels EEG aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Augenbewegungen erfolgt mithilfe eines Eyetrackers (THE EYE Tribe ApS, Kopenhagen, Dänemark) und zugehöriger Software. Um Bewegungen des Kopfes und damit Störungen in der Aufzeichnung der Augenbewegungen zu reduzieren, legt der Proband den Kopf auf einer höhenverstellbaren Kinnstütze ruhig ab.

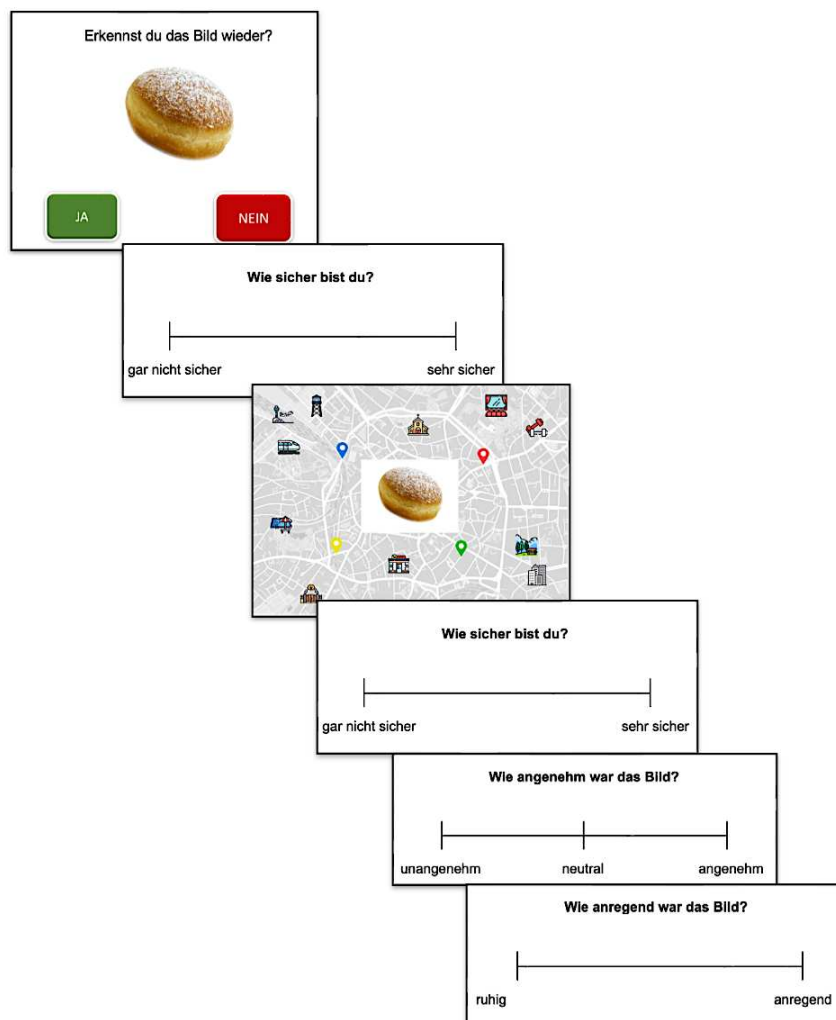


Abbildung 7: Ablauf der direkten und verspäteten Abrufphase des Food Location Memory Task. Die Fixation betrug 0,5 Sekunden. Die Bilder, die Karte und die Bewertungen auf den Skalen waren jeweils ohne Zeitlimit.

2.5.2 Emotionale und neutrale Texte

Um zu untersuchen, welchen Einfluss die Tief- bzw. REM-Schlafdeprivation auf die Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte im Vergleich zu neutralen Inhalten hat, werden den Probanden standardisierte Texte (übernommen von Schürer-Necker 1994) vorgelegt. Der emotionale Text „Kindermord“ beschreibt detailliert das Vorgehen eines Kindermörders, während der emotionale Text „Querschnittslähmung“ von einem querschnittsgelähmten Mann und seinen medizinischen wie auch sexuellen Problemen berichtet. Die neutralen Texte „Bronzeguss“ und „Mode“ beinhalten eine sachliche Beschreibung des Bronzegusses eines Objektes bzw. berichten über die Präsentation von Kleidung auf einer Modenschau. Die Texte weisen eine einheitliche Länge auf und umfassen zwischen 202 und 255 Wörtern. Die Anzahl der für die Auswertung relevanten Inhaltswörter, zu denen Nomen, Adjektive und Verben gehören, betrug für die neutralen Texte im Durchschnitt 95,0 (Bronzeguss: 78, Mode: 112) und für die emotionalen Texte 94,5 (Kindermord: 94, Querschnittslähmung: 95) (Wagner et al., 2001).

Der Proband wird instruiert, den vorgelegten Text in Papierform innerhalb eines Zeitraums von vier Minuten gründlich zu lesen und sich möglichst viele Details für einen späteren Abruf einzuprägen. Nach dem Lesen des Textes wird der Proband aufgefordert auf einer Sieben-Punkte-Skala den Text nach folgenden zwölf entgegengesetzten Eigenschaften zu bewerten: amüsan – ernst, anschaulich – abstrakt, bekannt – unbekannt, harmlos – erschreckend, interessant – uninteressant, langweilig – erregend, neutral – emotional, positiv – negativ, schwierig – leicht, verständlich – unverständlich, vertraut – unvertraut und wichtig – unwichtig. Im Anschluss erfolgt die direkte Abrufphase in Form einer Wiedererkennung. Hierzu werden der Versuchsperson Wortpaare auf einem Blatt präsentiert, die synonym verwendet werden können. Er soll nun entscheiden, welches der beiden Wörter in dem zuvor gelesenen Text vorkam und dieses unterstreichen. Anschließend erfolgt die Sortierung der ausgewählten Wörter in eine Reihenfolge, die den Handlungsablauf widerspiegelt. Beim darauffolgenden freien Abruf soll der Proband den zuvor gelesenen Text so genau wie möglich, im besten Fall wortwörtlich, aufschreiben. Es besteht keine Zeitangabe für die Wiedergabe. In jeder Testnacht werden der Versuchsperson ein neutraler und ein emotionaler Text präsentiert, welche vor der ersten Deprivationsnacht zum ersten Mal dargeboten und abgerufen werden. Der

verspätete Abruf der gelesenen Texte erfolgt am Abend nach der ersten Deprivationsnacht. Die Reihenfolge der Texte wurde über die Probanden hinweg ausbalanciert.

2.6 Kontrollmaße

2.6.1 Fragebögen

Die Probanden beantworteten verschiedene Fragebögen während den Testsitzungen. Die Präsentation der Fragebögen erfolgte online über die Website formr.org am Computer. Für die Beantwortung bestand kein Zeitlimit. Insgesamt wurden den Versuchsteilnehmern fünf verschiedenen Fragebögen vorgelegt, die teilweise zu mehreren Zeitpunkten beantwortet wurden.

2.6.1.1 Eingangsfragebogen

Der Eingangsfragebogen wurde vom Probanden kurz nach seiner Ankunft im Schlaflabor ausgefüllt. Der Fragebogen beinhaltet eine kurze Abfrage zur aktuellen Gesundheit, Nahrungsaufnahme, zum Thema Stress und Schlaf, mit dem Ziel, den Ausgangszustand der Probanden festzustellen.

2.6.1.2 Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Nach dem Eingangsfragebogen beantwortete der Proband den MDBF. Dieser misst die aktuelle psychische Befindlichkeit der Testperson in Bezug auf drei Stimmungsdimensionen (Steyer et al., 1994): gute bzw. schlechte Stimmung, Wachheit bzw. Müdigkeit und Ruhe bzw. Unruhe. Die Fragen werden auf einer fünfstufigen Likert-Skala mit den Punkten 1 (überhaupt nicht) bis 5 (sehr) beurteilt.

2.6.2 Visuelle Analogskalen (VAS)

Zur Messung des subjektiven Wohlbefindens und der Einschätzung des Hunger- und Sättigungsgefühls des Probanden wird die VAS als psychometrische Antwortskala

angewandt (Aitken, 1969). Die Ausprägungen eines Zustandes werden an den Enden einer Linie dargestellt. Im vorliegenden Fall wurden die Ausprägungen „überhaupt nicht“ und „extrem“ gewählt. Durch das Setzen einer Markierung auf der Linie erfolgt die Zuordnung der subjektiven Einschätzung des geforderten Zustandes durch den Probanden. Der angegebene Wert wird anschließend auf einer definierten Skala von 0 bis 10 übertragen.

2.6.3 Stanford-Schläfrigkeitsskala (SSS)

Die Stanford-Schläfrigkeitsskala (Hoddes et al., 1973) stellt ein Instrument zur Messung der Schlafneigung des Probanden auf einer siebenstufigen Skala dar. Der Proband wählt dafür auf einer Skala von 1 („Aktiv, lebhaft, aufmerksam oder sehr wach“) bis 7 („kurz vor dem Einschlafen und fast schon träumend“) sein Befinden zur Zustandsbeschreibung aus. Zur qualitativen und quantitativen Bewertung des Schlafverhaltens und -erlebens in der vergangenen Nacht wird dem Probanden der Schlaffragebogen A (SF-A/R) (Görtelmeyer, 2011) vorgelegt.

2.6.4 Psychomotorischer Vigilanztest (PVT)

Der PVT stellt eine computergestützte Reaktionsaufgabe mit hoher Reizdichte dar, bei der eine schnelle Reaktion auf die präsentierten visuellen Stimuli in Form eines Tastendrucks erforderlich ist. Der ursprünglich zehnmündige Test wird häufig in Studien verwendet, um die Auswirkungen von Schlafverlust und längeren Wachphasen auf die Leistungsfähigkeit zu untersuchen (Roach, Dawson et al. 2006, Basner and Dinges 2011). In unserer Studie wurde die fünfminütige Variante des Tests verwendet. In unregelmäßigen Abständen wird dem Probanden auf einem schwarzen Bildschirm eine Zahl in roter Schrift präsentiert, die plötzlich anfängt hochzuzählen. Sobald die Zählung beginnt, soll der Proband schnellstmöglich die Leertaste drücken. Der PVT erfasst die Daueraufmerksamkeit und Vigilanzeinbrüche vor und nach der ersten Tief- bzw. REM-Schlafdeprivation. Eine kontinuierliche selektive Aufmerksamkeit wird bei dieser Aufgabe gefordert.

2.6.5 Digit Span Task

Der Test wurde dem Hamburg-Wechsler Intelligenz-Test (Molz et al., 2010) entnommen und dient der Erfassung der Leistung des Kurzzeitgedächtnisses durch Zahlennachsprechen. Die Präsentation der Zahlenabfolge erfolgt in der vorliegenden Studie computergestützt mithilfe des Programms MATLAB (The MathWorks, Inc.). In der etwa fünfminütigen Aufgabe wird dem Probanden jede Zahl einzeln für eine Sekunde in der Mitte des schwarzen Bildschirms gezeigt. Die erste Abfolge umfasst eine Länge von drei Ziffern. In der Folge werden die Abfolgen jeweils um eine weitere Ziffer verlängert. Für jede Abfolgenlänge gibt es zwei Durchläufe mit unterschiedlichen Zahlen. Die Antwort wird nach jeder Zahlenabfolge mit der Tastatur eingegeben. Der Test findet vor und nach der ersten Deprivationsnacht statt.

2.6.6 Wortflüssigkeitstest

Der Wortflüssigkeitstest dient der Erfassung des divergenten Denkens, wobei die Generierung möglichst vieler Lösungsansätze im Fokus steht. Das Ziel des Tests besteht in der Erfassung der semantischen Wortflüssigkeit (Aschenbrenner et al., 2000). In der vorliegenden Studie werden den Probanden in zwei Runden jeweils ein Buchstabe genannt, mit dem sie innerhalb eines Zeitrahmens von 60 Sekunden möglichst viele Wörter nennen sollen. In der ersten Runde sollen Wörter, die mit dem Buchstaben „F“ bzw. „M“ beginnen, und in der zweiten Runde Wörter, die mit dem Anfangsbuchstaben „A“ bzw. „H“, genannt werden. Es ist zu beachten, dass die Wörter nicht mit dem gleichen Wortstamm beginnen dürfen. Des Weiteren werden Eigennamen in der späteren Auswertung nicht berücksichtigt. Wörter dürfen nicht mehrfach genannt werden und der Proband wird instruiert nur Wörter zu nennen, die in einem deutschen Buch oder in einer deutschen Zeitung verwendet werden könnten. Die Aufzeichnung der genannten Wörter erfolgt mithilfe der App „Voice Memos“ (Apple Inc.) auf dem iPad. Die Einverständniserklärung zur Stimmaufzeichnung wird von den Probanden zu Beginn der ersten Testnacht unterzeichnet.

2.7 Statistische Analyse

An der Studie nahmen 33 gesunde, normal- bis leicht übergewichtige (BMI 19-27,5 kg/m²) Männer im Alter von 18 bis 35 Jahren teil. 9 Versuchsteilnehmer schieden aus der Studie aus. Davon schieden sieben Probanden nach der Adaptionsnacht und zwei nach der ersten Deprivationsnacht aus. Sieben Teilnehmer wurden aus der Studie ausgeschlossen, da die Anforderungen einer Deprivation der REM-Schlafphase bzw. SWS-Phase unter 10 % während der ersten oder zweiten Nacht nicht möglich war oder überhaupt kein REM-Schlaf vorhanden war. Die folgenden Ergebnisse basieren auf den Daten von 18 Probanden (N=18). Davon sind 12 Datensätze vollständig; bei der SWS-Deprivation und REM-Schlafdeprivation sind jeweils drei Teil-Datensätze enthalten.

Die polysomnographischen Daten wurden anhand der Kriterien von Rechtschaffen und Kales (1973) ausgewertet. Der Schlaf wurde in die Zustände „Wach“, „Schlafphase 1-4“ und „REM-Schlaf“ unterteilt. Die Schlafstadien 3 und 4 wurden als SWS zusammengefasst. Erfasst wurde zusätzlich die Gesamtschlafdauer (TST), die Wachzeit nach Schlafbeginn (WASO) sowie die Dauer im Schlafstadium 1 (S1).

Alle statistischen Analysen wurden mit dem Programm RStudio (Version 2023.12.1+402, Posit Software) erstellt. Die Schlafdaten wurden mithilfe einer einseitigen ANOVA mit wiederholten Messungen mit „Bedingungen“ als unabhängige Variable und „Schlafdauer“ als abhängige Variable analysiert. Dasselbe Modell wurde mit „WASO“, „S1“ und „S2“ als abhängige Variable durchgeführt. Da sich die S2-Dauer zwischen den Bedingungen nicht unterschied, wurden nur TST, WASO und S1 als Kovariaten in alle weiteren Analysen einbezogen. Zusätzlich wurde auch „%-REM“ und „%-SWS“ als unabhängige Variablen mit einer einseitigen ANOVA mit wiederholten Messungen analysiert. Im Anschluss wurden gepaarte t-Tests zwischen SWS- und ADA (Adaptionsnacht)-Bedingungen sowie REM- und ADA-Bedingungen durchgeführt.

Für den FLM wurde ein lineares Mixed-Effects-Modell mit den festen Effekten Deprivation (REM vs. SWS), Item-Kategorie (Lebensmittel vs. Nicht-Lebensmittel), Emotion (positiv vs. negativ) und deren Interaktionen (zwei- und dreifach) berechnet. Die Kovariaten TST, S1- und S2-Dauer wurden als Kontrollmaße verwendet, da sie sich in der ersten Analyse signifikant zwischen SWS- und REM-Bedingungen unterscheiden.

Untersucht wurde die Korrelation zwischen den Valenz- bzw. Arousal-Bewertungen des Teilnehmers und den vordefinierten Valenz- bzw. Arousal-Bewertungen für die Bilder. Für jeden Probanden wurde ein zufälliger Intercept und eine zufällige Steigung zwischen REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation festgelegt. Je positiver der Wert, desto schlechter war die Erinnerung.

Nach Einschluss aller Faktoren wurde das am besten passende Modell durch ein Rückwärtseliminierungsverfahren auf Basis des Akaike Information Criterion (AIC), dem Bayesian Information Criterion (BIC) und der Log-Likelihood bestimmt. Im Folgenden wird lediglich dieses Modell benannt.

Die Ergebnisse der Bewertungsskalen der emotionalen und neutralen Texte wurden mithilfe einer ANOVA analysiert. Die p-Werte wurden mit der Bonferroni-Korrektur ($\alpha = 0.05$) für Mehrfachvergleiche korrigiert. Untersucht wurden hierbei die Faktoren Deprivation (SWS vs. REM), Emotion (neutral vs. negativ) und die Interaktion zwischen Deprivation und Emotion.

Für die Analyse der Veränderung der Synonymerkennung von direktem zu verspätetem Abruf der Texte wurde ein lineares Mixed-Effects-Modell berechnet mit den festen Effekten Deprivation (REM vs. SWS), Emotion (negativ vs. neutral) und deren Interaktion. Die Kovariaten TST, S1- und S2-Dauer wurden als Kontrollmaße verwendet, da sie sich in der ersten Analyse signifikant zwischen SWS- und REM-Bedingungen unterschieden. Für jeden Probanden wurde ein zufälliger Intercept festgelegt. Hierbei weisen mehr positive Werte auf ein schlechteres Gedächtnis hin. Die Wortreihenfolge wurde mit demselben linearen Mixed-Effects-Modell analysiert. Anschließend wurde ein t-Test der geschätzten marginalen Mittelwerte für den Interaktionseffekt durchgeführt.

Die Ergebnisse des Wortflüssigkeitstests wurden mit einem gepaarten t-Test berechnet. Der PVT und der Digit Span Task wurden mithilfe einer Zweiwege-ANOVA mit wiederholten Messungen analysiert.

Für alle statistischen Tests wurde ein (unkorrigiertes) Alpha-Niveau von 0.05 verwendet. Die p-Werte werden bis zur zweiten Stelle hinter dem Komma angegeben. Alle Durchschnittswerte im Text werden mit dem Intervall des Standardfehlers angegeben.

3. Ergebnisse

3.1 Schlafdeprivation

3.1.1 Gesamtschlafdauer (TST)

Die TST unterschied sich signifikant zwischen den drei Bedingungen (Adaptionsnacht, REM-Schlafdeprivation, SWS-Deprivation), wie die ANOVA-Analyse zeigte ($F(2,46) = 9.77$, $p < 0.001$, Abbildung 8). In der Adaptionsnacht (ADA) war die durchschnittliche Schlafdauer länger im Vergleich zur REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation. Sowohl die REM-Schlafdeprivation als auch SWS-Deprivation führten im Vergleich zur Adaptionsnacht zu einer signifikanten Reduktion der TST (REM vs. ADA: $t(46) = 3.78$, $p = 0.001$; SWS vs. ADA: $t(46) = 3.78$, $p = 0.001$). Zwischen den beiden Deprivationsbedingungen zeigte sich kein signifikanter Unterschied ($t(46) = -0.06$, $p = 1.000$). Die Streuung der TST-Werte war während der Deprivationen deutlich größer im Vergleich zur Adaptionsnacht, was auf eine stärkere Variabilität in der Schlafdauer hinweist. Die exakten Werte sind in Tabelle 3 dargestellt.

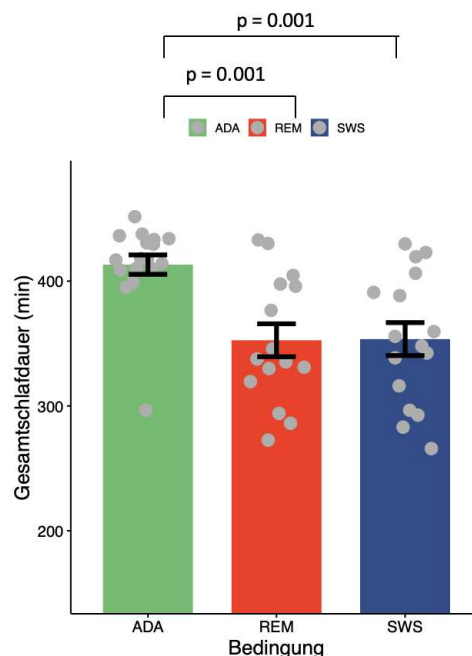


Abbildung 8: Vergleich der Gesamtschlafdauer (TST) unter verschiedenen Schlafbedingungen. Gesamtschlafdauer in Minuten (TST) in den Bedingungen ADA (Adaptionsnacht, grün), REM (REM-Schlafdeprivation, rot) und SWS (Tiefschlafdeprivation, blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.1.2 Wachzeit nach Schlafbeginn (WASO)

Auch die WASO unterschied sich signifikant zwischen den Bedingungen (ADA, REM, SWS) in der ANOVA-Analyse ($F(2,46) = 7.52$, $p = 0,001$, Abbildung 9). Während der REM-Schlafdeprivation war die WASO signifikant länger als in der Adaptionsnacht ($t(46) = -3.82$, $p = 0.001$). Die WASO war während der SWS-Deprivation ebenfalls länger als in der Adaptionsnacht, jedoch ohne statistische Signifikanz ($t(46) = -2.38$, $p = 0.065$). Zwischen den beiden Deprivationsarten (REM vs. SWS) bestand kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die WASO ($t(46) = 1.44$, $p = 0.470$). Die Werte in Minuten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

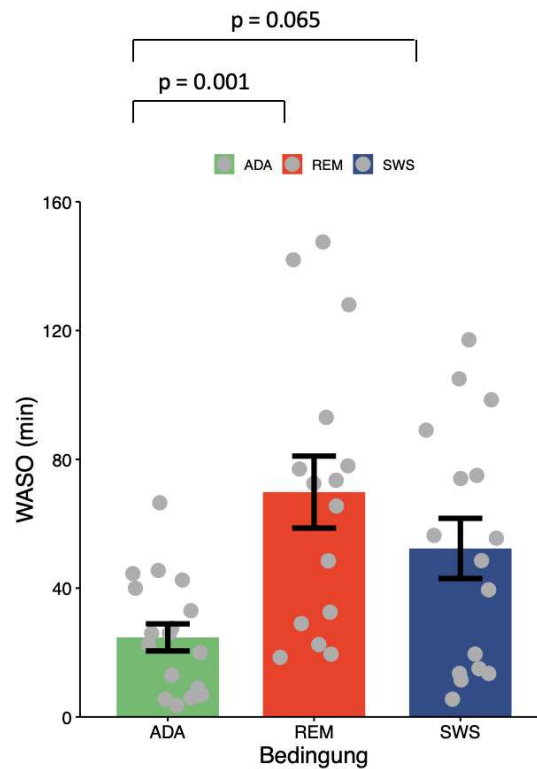


Abbildung 9: Schlafdauer nach Schlafbeginn (WASO) unter verschiedenen Schlafbedingungen
Schlafdauer nach Schlafbeginn in Minuten (WASO) in den Bedingungen ADA (Adaptionsnacht, grün), REM (REM-Schlafdeprivation, rot) und SWS (SWS-Deprivation, blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.1.3 Schlafstadium 1 (S1)

Die Dauer des Schlafstadiums 1 (S1) zeigte ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen (ADA, REM, SWS) bei der ANOVA-Analyse ($F(2,46) = 11.13$, $p < 0.001$, Abbildung 10). In beiden Deprivationsbedingungen verbrachten die Teilnehmer signifikant mehr Zeit in S1 als in der Adaptationsnacht (REM vs. ADA: $t(46) = -4.02$, $p < 0.001$; SWS vs. ADA: $t(46) = -4.05$, $p < 0.001$). Zwischen REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation zeigte sich kein signifikanter Unterschied ($t(46) = 0.04$, $p = 1.000$). Die Minutenangaben des S1 sind in Tabelle 3 dargestellt.

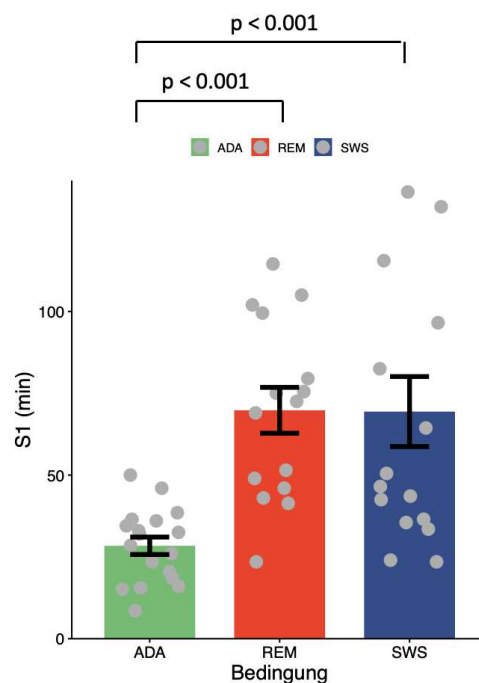


Abbildung 10: Dauer des Schlafstadiums 1 (S1) unter verschiedenen Schlafbedingungen
Dauer des Schlafstadium 1 in Minuten (S1) in den Bedingungen ADA (Adaptionsnacht, grün), REM (REM-Schlafdeprivation, rot) und SWS (Tiefschlafdeprivation, blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

Die Dauer des Schlafstadiums 2 (S2) unterschied sich nicht signifikant zwischen den Bedingungen ($F(2,46) = 1.04$, $p = 0.363$). Aus diesem Grund wurden in den nachfolgenden statistischen Analysen lediglich die TST, die WASO und die Dauer des Schlafstadiums 1 (S1) als Kovariaten berücksichtigt.

Tabelle 3: Durchschnittliche Schlafparameter bei verschiedenen Deprivationsbedingungen

Deprivation	TST	WASO	S1	S2	SWS	REM
ADA	413.22 ± 24.69	± 28.39	± 227.08	± 80.39	± 77.33	±
	32.95	17.87	11.31	34.97	25.46	15.04
REM	352.63 ± 69.83	± 69.79	± 204.23	± 60.88	± 17.70	±
	51.09	43.30	27.15	41.97	28.47	12.13
SWS	353.56 ± 52.32	± 69.41	± 220.27	± 4.47	± 59.39	±
	52.85	37.41	42.80	59.12	5.86	34.62

Mittelwert ± Standardfehler aller Probanden (N=18) unter den drei Bedingungen: Adaptationsnacht (ADA), REM-Schlafdeprivation (REM), SWS-Deprivation (SWS). Werte der Kategorien in Minuten: Gesamtschlafdauer (TST), Wachzeit nach Schlafbeginn (WASO), Schlafstadium 1 (S1), Schlafstadium 2 (S2), Slow-Wave-Sleep (SWS) und Rapid-Eye-Movement-Sleep (REM).

3.1.4 Prozentualer Anteil von REM-Schlaf und SWS

Die prozentualen Anteile von REM-Schlaf und SWS wurden unter drei experimentellen Bedingungen analysiert. Die prozentualen Anteile ermöglichen eine vergleichbare Darstellung zwischen Individuen und Bedingungen, da sie Schwankungen in der Gesamtschlafzeit berücksichtigen.

3.1.4.1 REM-Schlaf

Zur Analyse des prozentualen REM-Schlafanteils wurde eine einfach wiederholte ANOVA-Analyse durchgeführt ($F(2,46) = 35.26$, $p < 0.001$, Abbildung 11), wobei die „Bedingung“ (Adaptionsnacht, REM-Schlafdeprivation, SWS-Deprivation) als unabhängige Variable und „%-REM“ als abhängige Variable verwendet wurden.

Post-hoc-Analysen mittels gepaarten t-Tests zeigten, dass es keine signifikant unterschiedliche REM-Schlafdauer zwischen der Adaptionsnacht und SWS-Deprivation gab ($t(46) = 1.48$, $p = 1.000$). Es zeigte sich außerdem ein signifikanter Rückgang im REM-Schlafanteil während der REM-Schlafdeprivation im Vergleich zur SWS-Deprivation ($t(46) = -6.38$, $p < 0.001$) und Adaptionsnacht ($t(46) = 8.01$, $p < 0.001$). Der REM-Schlaf konnte während der REM-Deprivation auf 4.86 % reduziert werden.

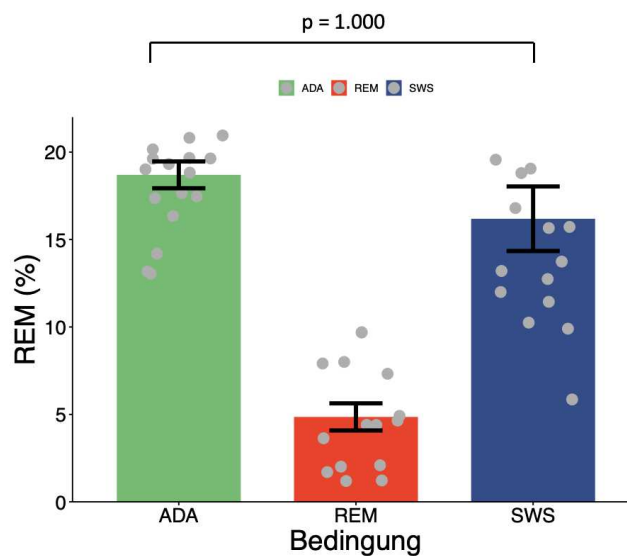


Abbildung 11: REM-Schlaf (%) unter verschiedenen Schlafbedingungen

Prozentualer REM-Schlafanteil in den Bedingungen ADA (Adaptionsnacht, grün), REM (REM-Schlafdeprivation, rot) und SWS (Tiefschlafdeprivation, blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.1.4.2 Tiefschlaf

Analog wurde für den prozentualen Anteil des SWS eine einfach wiederholte ANOVA-Analyse mit den Bedingungen Adaptionsnacht, REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation berechnet ($F(2,46) = 39.67$, $p < 0.001$, Abbildung 12).

Die Post-hoc-Analyse zeigte, dass die Teilnehmer keine unterschiedlichen SWS-Mengen zwischen der Adaptionsnacht und REM-Schlafdeprivation aufwiesen ($t(46) = 0.79$, $p = 1.000$), während die SWS-Menge während des SWS-Entzugs im Vergleich zu REM-Schlafentzug ($t(46) = 7.10$, $p < 0.001$) und der Adaptionsnacht ($t(46) = 8.23$, $p < 0.001$) signifikant niedriger war. Der SWS-Schlaf konnte unter SWS-Deprivation auf 1.13 % reduziert werden.

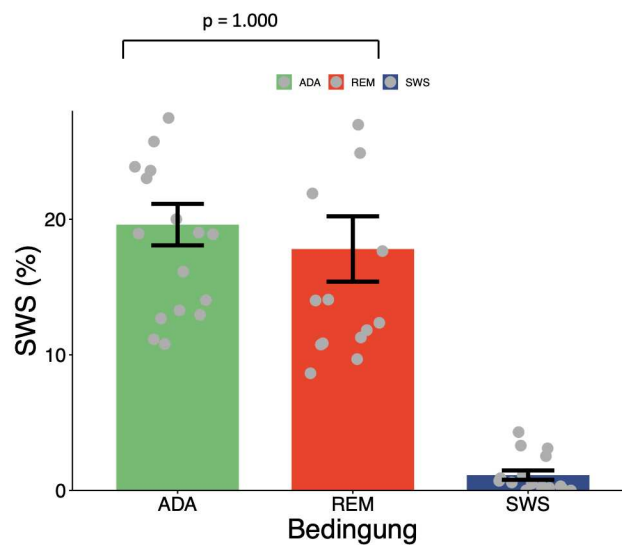


Abbildung 12: Tiefschlaf (%) unter verschiedenen Schlafbedingungen

Prozentualer Tiefschlafanteil unter den Bedingungen ADA (Adaptionsnacht, grün), REM (REM-Schlafdeprivation, rot) und SWS (Tiefschlafdeprivation, blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.2 Die Abrufleistung

Die Abrufleistung wurde anhand des Food Location Memory Task (FLM) untersucht. Bei der FLM sollten sich die Teilnehmer die Positionen von Bildern aus verschiedenen Kategorien (Lebensmittel- vs. Nicht-Lebensmittelbilder, mit unterschiedlicher emotionaler Valenz) merken und diese später in einer direkten (vor der Deprivationsnacht) sowie einer verspäteten (nach der Deprivationsnacht) Abrufphase wiederfinden. Die Abrufleistung beschreibt dabei den Anteil korrekt erinnelter Bildpositionen, also wie gut die Probanden die zuvor gelernten Positionen wiedergeben konnten. Die Ergebnisse werden jeweils mit dem Zufallsniveau (25 %, da vier Positionen möglich sind) verglichen.

3.2.1 REM-Schlafdeprivation vs. SWS-Deprivation

In der direkten Abrufphase zeigten sich in beiden Bedingungen (REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation) durchweg hohe Abrufleistungen (ca. 65-75 %) für alle Bildkategorien, jeweils signifikant über dem Zufallsniveau ($p < 0.01$). In der verspäteten Abrufphase zeigte sich erwartungsgemäß in beiden Bedingungen ein Rückgang der Abrufleistung. Auch hier lagen die Werte für alle Kategorien noch über dem

Zufallsniveau, allerdings waren die Mittelwerte insgesamt niedriger als in der direkten Abrufphase (ca. 33-44 %).

Nach der REM-Schlafdeprivation blieb die Leistung unter Verwendung von t-Tests mit einer Stichprobe nur für neutrale Nicht-Lebensmittelbildern (D) hochsignifikant über dem Zufall ($p < 0.01$), bei neutralen Lebensmitteln (B) immerhin noch signifikant ($p < 0.05$). Die anderen Kategorien erreichten keine Signifikanz (n.s.). Nach der SWS-Deprivation blieb die Leistung nur bei neutralen Lebensmittelbildern (B) hochsignifikant ($p < 0.01$), alle anderen Kategorien erreichten keine Signifikanz (n.s.).

Eine graphische Darstellung der Abrufleistungen der verschiedenen Kategorien (A-D) während der beiden Sitzungen für die REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation sind in Abbildung 13 dargestellt. Die exakten Werte sind in Tabelle 4 und 5 im Anhang aufgelistet.

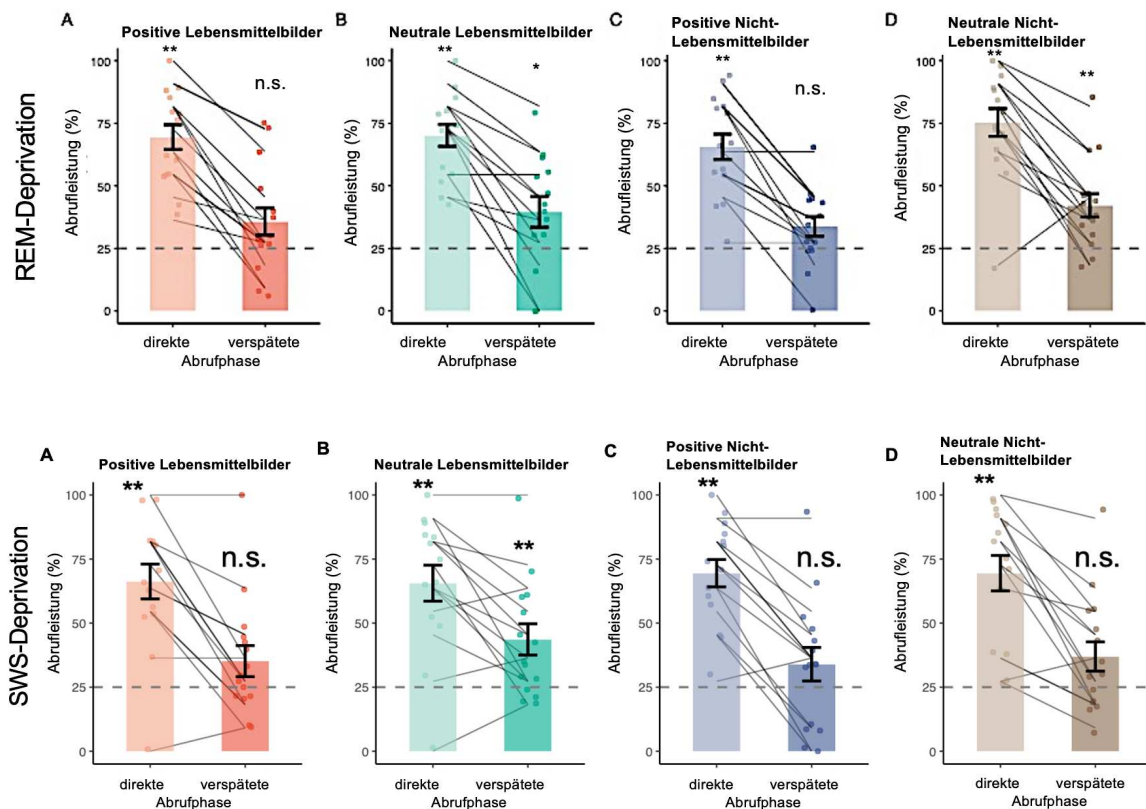


Abbildung 13: Abrufleistung vor und nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation
 Die Abrufleistung in Prozent in der direkten und verspäteten Abrufphase für die Kategorien „positive Lebensmittelbilder“ (A, rot), „neutrale Lebensmittelbilder“ (B, grün), „positive Nicht-Lebensmittelbilder“ (C, blau) und „neutrale Nicht-Lebensmittelbilder“ (D, braun) vor und nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation. Die Abrufleistung wird mit dem Zufallsniveau, das bei 25 % liegt, verglichen. Ausreißer werden außerhalb der Spanne gezeigt. Der p-Wert < 0.01 ist mit ** (hochsignifikant) und der p-Wert < 0.05 mit * (signifikant) gekennzeichnet. Nicht signifikante Ergebnisse werden mit n.s. kenntlich gemacht. Die Linien von Punkt zu Punkt stellen individuelle Teilnehmerdaten dar. Jede Linie verbindet die Werte einer einzelnen Versuchsperson zwischen den beiden Messzeitpunkten (direkter und verspäteter Abrufphase).

3.3 Erkennungsleistung

Die Erkennungsleistung basiert auf dem gleichen Test und bezieht sich auf die Fähigkeit, die Bilder selbst als bekannt zu identifizieren. Die Erkennungsleistung wurde vor und nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation untersucht. Die Analyse erfolgte jeweils in einer direkten und einer verspäteten Abrufphase für verschiedene Bildkategorie (Lebensmittel vs. Nicht-Lebensmittel, mit unterschiedlicher emotionaler Valenz). Das Zufallsniveau liegt bei einer 50 % Chance und ergibt sich aus den beiden Stufen „alt“ und „neu“.

3.3.1 REM-Schlafdeprivation vs. SWS-Deprivation

Die Ergebnisse der t-Tests mit einer Stichprobe waren für alle Emotionen und Kategorien sowohl vor und nach der REM-Schlafdeprivation als auch der SWS-Deprivation hochsignifikant ($p < 0.01$) und lagen über dem Zufallsniveau von 50 %. In der direkten Abrufphase zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation. In der verspäteten Abrufphase hingegen war die Erkennungsleistung nach der SWS-Schlafdeprivation tendenziell etwas höher. Die Probanden erreichten beim direkten Abruf fast 100 % Genauigkeit, was die interpretierbare Varianz reduziert. Eine graphische Darstellung der Ergebnisse der direkten und verspäteten Abrufphase der einzelnen Kategorien nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation ist in Abbildung 14 zu finden. Die exakten Prozentangaben sind in Tabelle 6 und 7 im Anhang dargestellt.

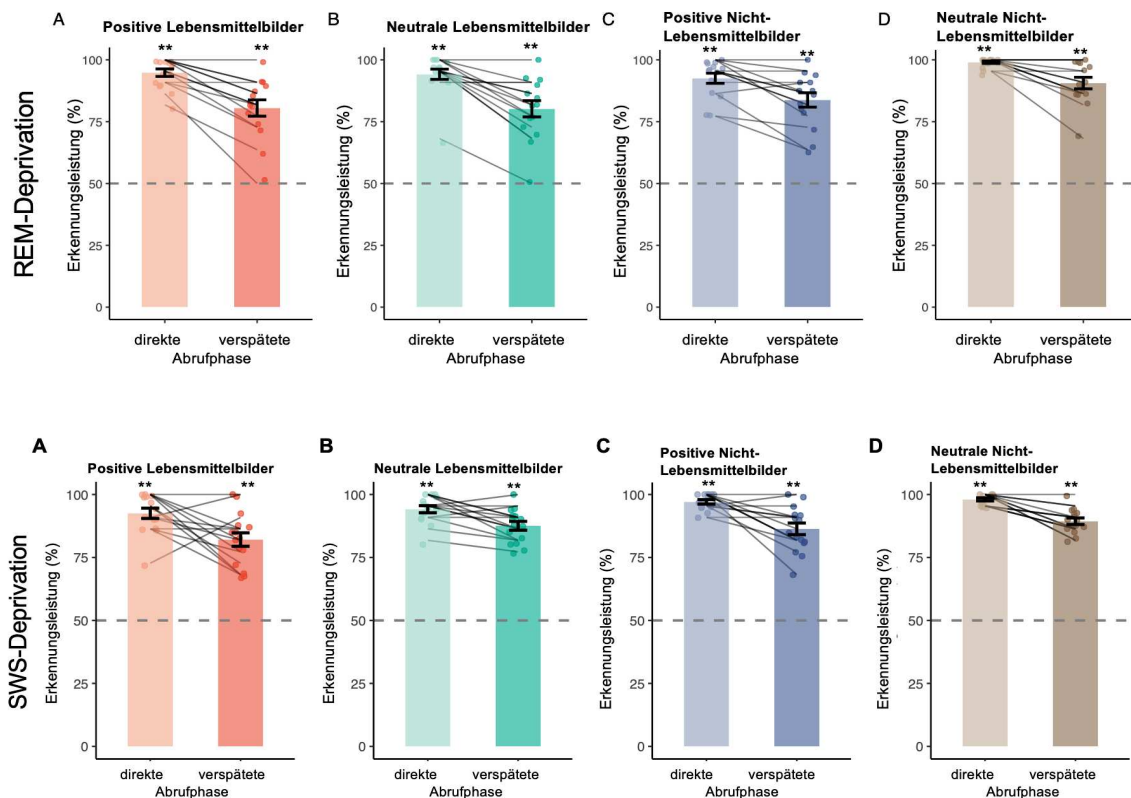


Abbildung 14: *Erkennungsleistung vor und nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation*
 Die Erkennungsleistung in Prozent in der direkten und verspäteten Abrufphase für die Kategorien „positive Lebensmittelbilder“ (A, rot), „neutrale Lebensmittelbilder“ (B, grün), „positive Nicht-Lebensmittelbilder“ (C, blau) und „neutrale Nicht-Lebensmittelbilder“ (D, braun) vor und nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation. Die Erkennungsleistung wird mit dem Zufallsniveau, das bei 50 % liegt, verglichen. Ausreißer werden außerhalb der Spanne dargestellt. Der p-Wert < 0.01 ist mit ** (hochsignifikant) und der p-Wert < 0.05 mit * (signifikant) gekennzeichnet. Nicht signifikante Ergebnisse werden mit n.s. dargestellt.

3.4 Wiedererkennungsrategie bei direktem und verspätetem Abruf

Analysiert wurde die Beeinflussung selektiver REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation auf die Wiedererkennung von Lebensmitteln bzw. Nicht-Lebensmitteln mit unterschiedlicher emotionaler Valenz (positiv vs. neutral) bei einem direkten (vor der Deprivationsnacht) und verspäteten (nach der Deprivationsnacht) Abruf mit einem linearen Mixed-Effects-Modell anhand des Food Location Memory Task. Die Wiedererkennungsrategie gibt dabei an, wie gut sich die Probanden an die gezeigten Bilder erinnern konnten.

3.4.1 Direkter Abruf

Die beste Gedächtnisleistung konnte bei der Wiedererkennung von Nicht-Lebensmitteln vor der SWS-Deprivation und vor der REM-Schlafdeprivation festgestellt werden. Eine minimal schlechtere Leistung konnte bei der Wiedererkennung von Lebensmittel-Items sowohl vor der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation beobachtet werden (Abbildung 15). Der Unterschied zwischen Lebensmitteln und Nicht-Lebensmitteln war vor dem SWS-Entzug ausgeprägter (Differenz = 4.22 %) als vor der REM-Schlafdeprivation (Differenz = 1.30 %).

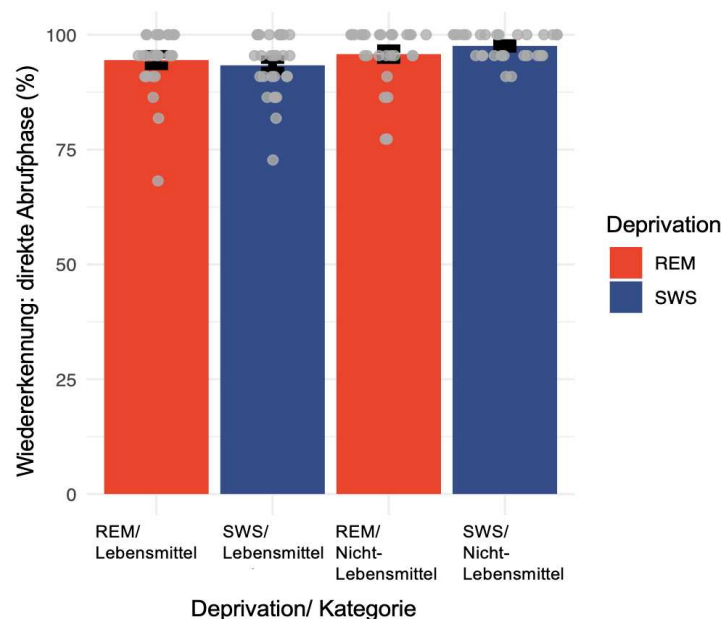


Abbildung 15: Wiedererkennungsrate bei direktem Abruf

Die Wiedererkennungsrate in Prozent beim direkten Abruf für die Kategorien „REM/ Lebensmittel“ (rot), „SWS/ Lebensmittel“ (blau), „REM/ Nicht-Lebensmittel“ (rot) und „SWS/ Nicht-Lebensmittel“ (blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

Der Einfluss der Schlafdeprivation war statistisch nicht signifikant ($t(201) = -0.93$, $p = 0.35$). Auch die Item-Kategorie hatte keinen signifikanten Effekt auf die Gedächtnisleistung ($t(201) = 1.41$, $p = 0.16$). Der Interaktionseffekt war hingegen signifikant ($t(201) = 2.24$, $p = 0.03$) und zeigte, dass der Unterschied zwischen Lebensmitteln und Nicht-Lebensmitteln bei SWS-Entzug signifikant größer war als bei der REM-Schlafdeprivation. Die Kontrollvariablen TST und S2 zeigten keinen signifikanten Einfluss.

Unter SWS-Deprivation lag ein hochsignifikanter Unterschied ($t(201) = -4.58, p < 0.01$) zwischen der Lebensmittelkategorie und Nicht-Lebensmittelkategorie vor. Die Gedächtnisleistung war für Nicht-Lebensmittel besser (-1.50 ± 1.52) im Vergleich zu Lebensmitteln (1.42 ± 1.52). Zwischen REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation in den Kategorien Nicht-Lebensmittel ($t(201) = -0.98, p = 0.33$) und Lebensmittel ($t(201) = 0.94, p = 0.35$) war der Unterschied statistisch nicht signifikant.

3.4.2 Verspäteter Abruf

Die höchsten Mittelwerte und somit die beste Wiedererkennungslleistung lagen nach der SWS-Deprivation sowie nach der REM-Schlafdeprivation für Nicht-Lebensmittel vor. Die Wiedererkennungslleistung von Lebensmitteln war nach REM-Schlafentzug und SWS-Entzug geringfügig schlechter. Bei beiden Item-Kategorien zeigte sich, dass die Gedächtnisleistung nach der SWS-Deprivation besser war als nach der REM-Schlafdeprivation (Abbildung 16). Der Unterschied bei Lebensmittelstimuli war ca. 4.5 % größer als bei Nicht-Lebensmittelstimuli (ca. 0.7 %).

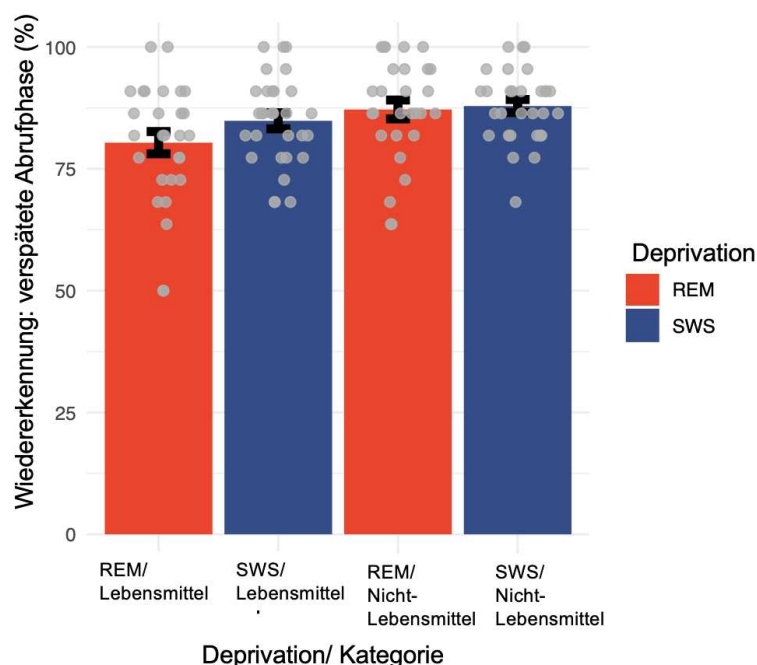


Abbildung 16: Wiedererkennungsrate bei verspätetem Abruf

Die Wiedererkennungsrate in Prozent beim verspäteten Abruf für die Kategorien „REM/Lebensmittel“ (rot), „SWS/Lebensmittel“ (blau), „REM/Nicht-Lebensmittel“ (rot) und „SWS/Nicht-Lebensmittel“ (blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

Die SWS-Deprivation führte zu einem signifikant höheren Mittelwert im Vergleich zur REM-Schlafdeprivation ($t(209) = 1.99, p = 0.05$), was auf eine bessere Gedächtnisleistung nach der SWS-Deprivation hindeutet. Nicht-Lebensmittel wurden insgesamt signifikant besser erinnert als Lebensmittel bei dem verspäteten Abruf ($t(209) = 5.42, p < 0.0001$).

Es zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen Deprivation und Item-Kategorie ($t(209) = -2.16, p = 0.032$). Die Kovariaten TST ($t(209) = 0.87, p = 0.39$) und S2 ($t(209) = -0.56, p = 0.58$) zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die Gedächtnisleistung, was auf eine untergeordnete Rolle dieser Variablen deutet.

Durch Kontrastvergleiche wurden die Interaktionseffekte konkretisiert. Nicht-Lebensmittel wurden nach der REM-Schlafdeprivation signifikant besser erinnert als Lebensmittel ($t(209) = -5.42, p < 0.0001$). Nach der SWS-Deprivation war die Gedächtnisleistung für Nicht-Lebensmittel statistisch signifikant ($t(209) = -2.49, p = 0.01$). Bei Lebensmittel-Items war die Leistung nach SWS-Deprivation signifikant besser als unter REM-Schlafdeprivation ($t(209) = -1.99, p = 0.05$). Zwischen REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation konnte kein signifikanter Unterschied für Nicht-Lebensmittel-Items festgestellt werden ($t(209) = -0.46, p = 0.65$).

3.4.3 Veränderung der Wiedererkennungsleistung von direktem zu verspätetem Abruf

Um den Einfluss verschiedener Schlafphasen auf die Gedächtnisleistung zu untersuchen, wurde die Veränderung der Wiedererkennungsleistung bei Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittel-Items vom direkten zum verspäteten Abruf analysiert (Abbildung 17). Dabei wurden die Effekte von REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation verglichen.

Nach der REM-Schlafdeprivation war die Veränderung der Wiedererkennungsleistung für Lebensmittel-Items vom direkten zum verspäteten Abruf signifikant höher als für Nicht-Lebensmittel ($t(201) = 3.98, p < 0.01$). Nach der SWS-Deprivation war die Veränderung der Wiedererkennungsleistung allerdings bei Nicht-Lebensmittelbildern etwas höher verglichen mit den Lebensmittelbildern, das Ergebnis war aber nicht statistisch signifikant ($t(201) = -0.82, p = 0.413$). Die Deprivationsart zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Wiedererkennungsleistung von Lebensmittelbildern ($t(201) = 2.80, p =$

0.005), nicht aber auf die Wiedererkennungsleistung von Nicht-Lebensmittelbildern ($t(201) = -0.66$, $p = 0.510$). Die TST und S2-Dauer hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Wiedererkennungsleistung (TST: $t(201) = -0.94$, $p = 0.350$; S2: $t(201) = 1.06$, $p = 0.291$).

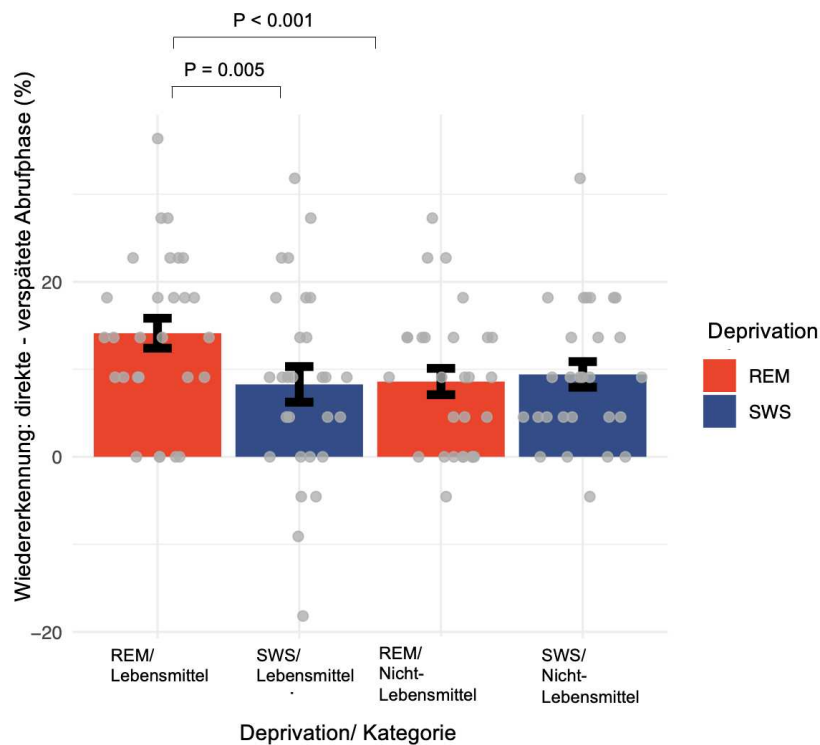


Abbildung 17: *Veränderung der Wiedererkennungsleistung von direktem zu verspätetem Abruf*
Die Veränderung der Wiedererkennungsleistung in Prozent vom direkten zu verspäteten Abruf für die Kategorien „REM/ Lebensmittel“ (rot), „SWS/ Lebensmittel“ (blau), „REM/ Nicht-Lebensmittel“ (rot) und „SWS/ Nicht-Lebensmittel“ (blau). Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.5 Emotionale und neutrale Texte

3.5.1 Bewertungsskalen

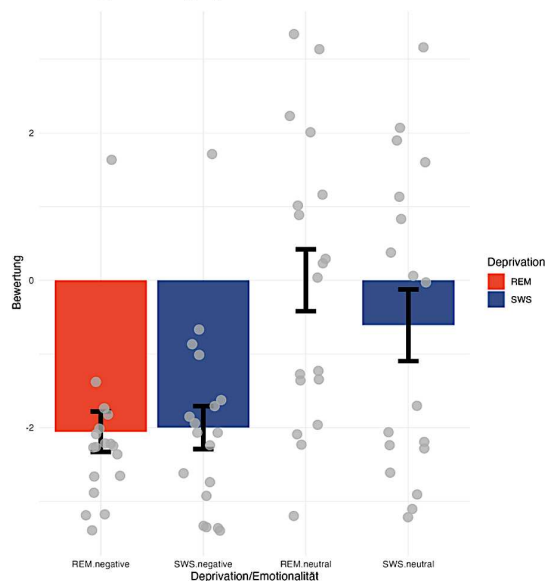
Anhand von standardisierten emotionalen und neutralen Texten wurde der Einfluss der selektiven Schlafdeprivation auf die Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte untersucht. Nach dem Lesen des Textes wurde der Proband aufgefordert auf einer Sieben-Punkte-Skala den Text nach verschiedenen Eigenschaften zu bewerten. Die subjektive Wahrnehmung der emotionalen und neutralen Texte nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation wurde mit zwölf Bewertungsskalen (von -3 bis +3) erfasst, wobei

die Bewertungen von acht Skalen signifikante Unterschiede zwischen emotionalen und neutralen Texten aufwiesen. Die Ergebnisse der Begriffe „amüsant – ernst“, „bekannt – unbekannt“, „schwierig – leicht“, „vertraut – unvertraut“ zeigten sich als nicht signifikant. Die Bewertungen der verschiedenen semantischen Dimensionen sind in Tabelle 8 aufgeführt (s. Anhang).

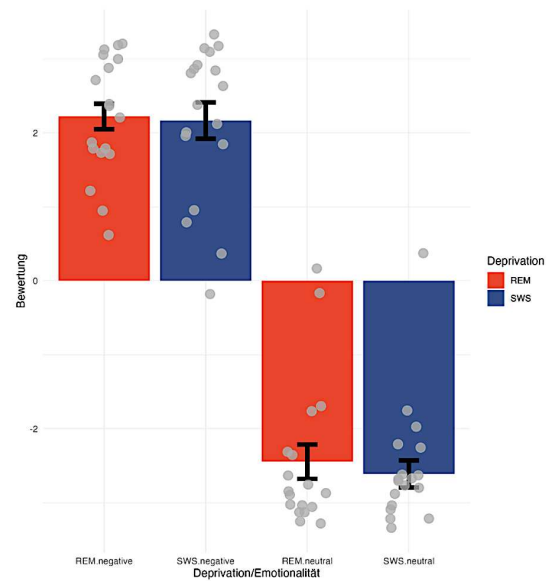
Zwischen den neutralen und emotionalen Texten zeigte sich ein signifikanter Unterschied in der Bewertung der Begriffspaare „anschaulich - abstrakt“, „harmlos - erschreckend“, „interessant – uninteressant“, „langweilig – erregend“, „neutral – emotional“, „positiv – negativ“, „verständlich – unverständlich“ und „wichtig – unwichtig“. Der Faktor Emotion zeigte somit deutlich signifikante Ergebnisse, die in der Tabelle 9 (s. Anhang) mit ** markiert sind. Dies spiegelte sich besonders in der Bewertung der Texte im Hinblick auf „harmlos – erschreckend“ wider ($F = 357.049$, $p < 0.01$). Hier wurden Texte mit emotionalem Inhalt von den Probanden als deutlich erschreckender bewertet als neutrale Texte. Aber auch in anderen Kategorien wie z.B. „verständlich – unverständlich“ oder „langweilig – erregend“ waren signifikante Werte ($F = 105.604$, $p < 0,01$) erkennbar.

Die Deprivationsart schien keinen Einfluss auf die Bewertung zu haben. Die Mittelwerte der emotionalen Texte nach der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation unterschieden sich nur geringfügig. Gleiches galt für die neutralen Texte nach beiden Deprivationsarten. Die graphische Darstellung der signifikanten Bedingungen ist in der Abbildungen 18 (A-H) zu sehen.

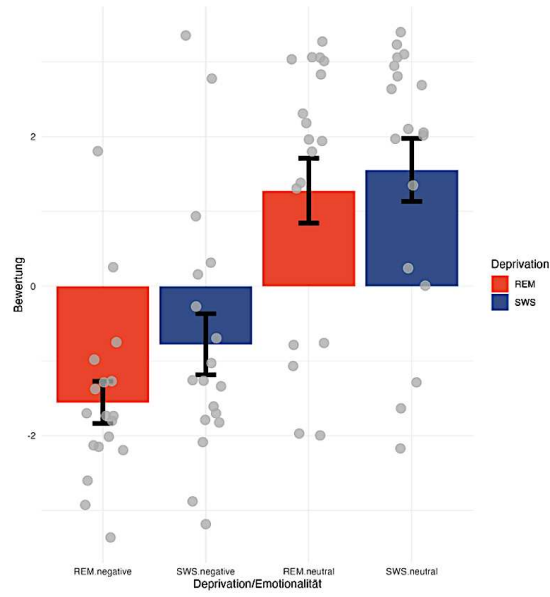
A Bewertung der Bedingung: **anschaulich - abstrakt**



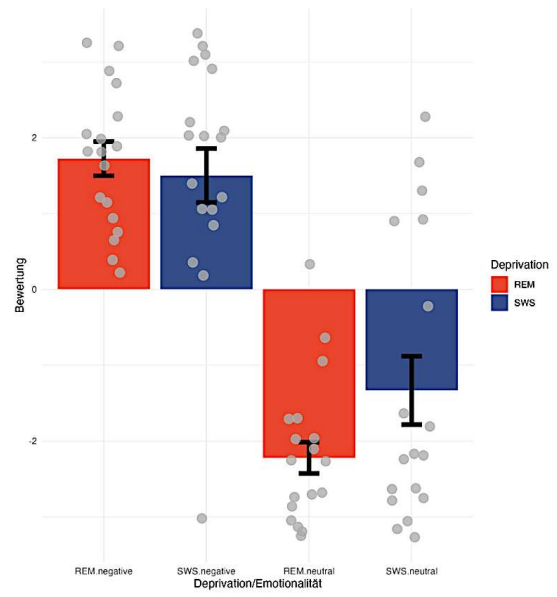
B Bewertung der Bedingung: **harmlos - erschreckend**



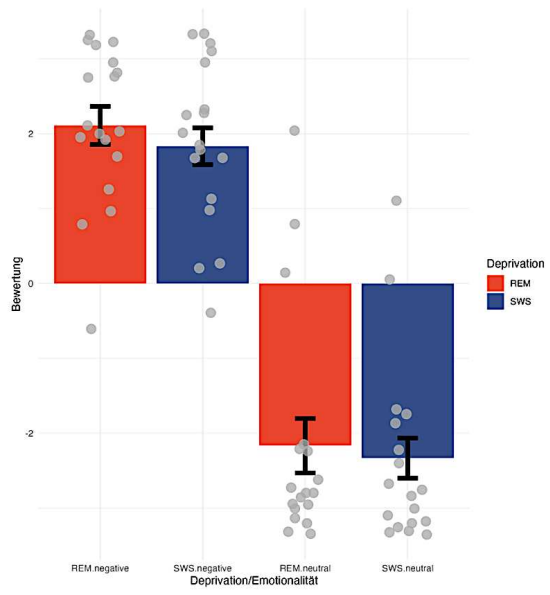
C Bewertung der Bedingung: **interessant - uninteressant**



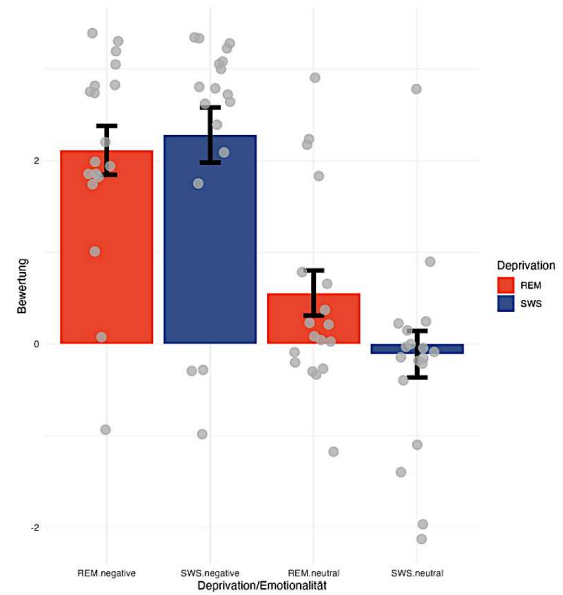
D Bewertung der Bedingung: **langweilig - erregend**



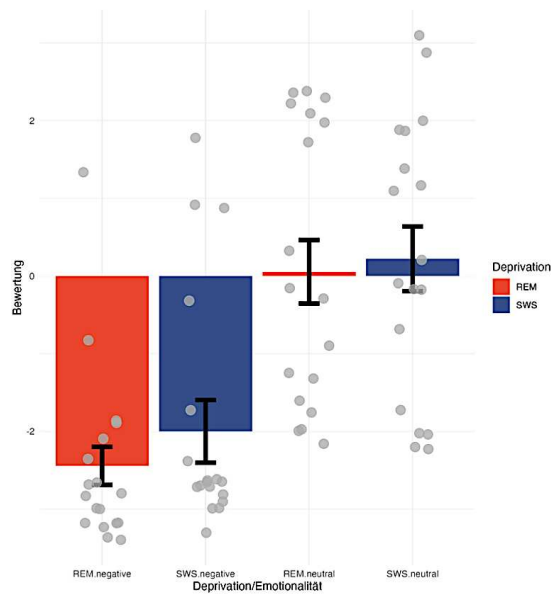
E Bewertung der Bedingung: **neutral - emotional**



F Bewertung der Bedingung: **positiv - negativ**



G Bewertung der Bedingung: **verständlich - unverständlich**



H Bewertung der Bedingung: **wichtig - unwichtig**

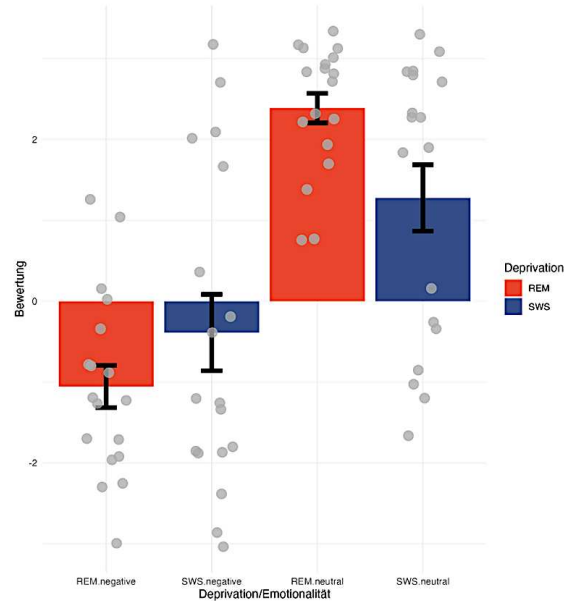


Abbildung 18: Einfluss der Deprivation und Emotion auf die Bewertung verschiedener Bedingungen
Die Bewertung verschiedener Begriffspaare nach der REM-Schlafdeprivation (rot) und SWS-Deprivation (blau) für negative (emotionale) und neutrale Texte in den Abbildungen A-H. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.5.2 Synonyme

3.5.2.1 Direkter Abruf

Untersucht wurde die Anzahl richtig wiedergegebener Synonyme in Prozent bei direktem Abruf vor der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation für negative und neutrale Valenz des Materials. Vor der REM-Schlafdeprivation unterschied sich die Abrufleistung für negative und neutrale Synonyme kaum. Die Ergebnisse des direkten Abrufs von negativen und neutralen Synonymen vor der SWS-Deprivation zeigten im Vergleich noch eine geringere Differenz. Es lag eine hohe individuelle Streuung vor (Abbildung 19).

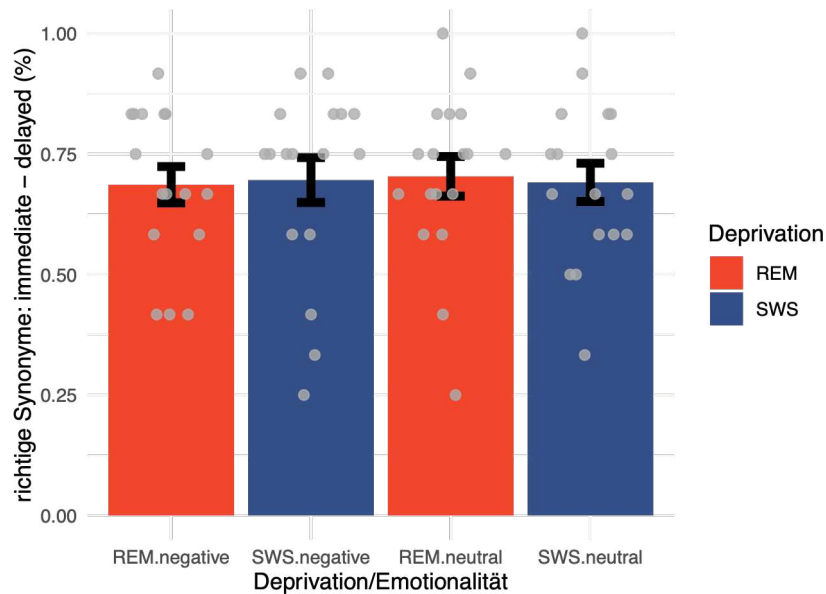


Abbildung 19: Richtige Synonyme unter verschiedenen Deprivations- und Emotionsbedingungen bei direktem Abruf

Die Anzahl der richtig wiedergegebenen Synonyme in Prozent nach REM-Schlafdeprivation (rot) und SWS-Deprivation (blau) für neutrale und negative Emotionen beim direkten Abruf.

Die Ergebnisse des direkten Abrufes wurden zusätzlich mit einem linearen Mixed-Effects-Modell analysiert. Das Modell basiert auf 69 Beobachtungen bei 18 Probanden.

Weder die Deprivation ($t(48) = 0.16, p = 0.873$) noch die Emotion ($t(48) = 0.29, p = 0.771$) hatten einen signifikanten Effekt auf die direkte Abrufleistung. Zwischen der Deprivationsart und der Valenz der Emotion gab es keine signifikante Interaktion ($t(48) = -0.26, p = 0.793$).

3.5.2.2 Verspäteter Abruf

Untersucht wurde die Anzahl richtig wiedergegebener Synonyme in Prozent beim verspäteten Abruf für die REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation sowie negativer und neutraler Valenz des Materials. Die Mittelwerte lagen alle eng beieinander, was darauf hindeutet, dass es weder einen starken Effekt der Schlafdeprivation noch der emotionalen Valenz auf die verspätete Abrufleistung gab. Nach der SWS-Deprivation war die Abrufleistung minimal besser im Vergleich zur REM-Schlafdeprivation. Nach der SWS-Deprivation war die Leistung für neutrale Inhalte leicht höher als für negative Synonyme. Nach der REM-Schlafdeprivation hingegen war die Leistung für negative

Synonyme höher als für neutrale. Auch hier lag eine hohe individuelle Streuung vor (Abbildung 20).

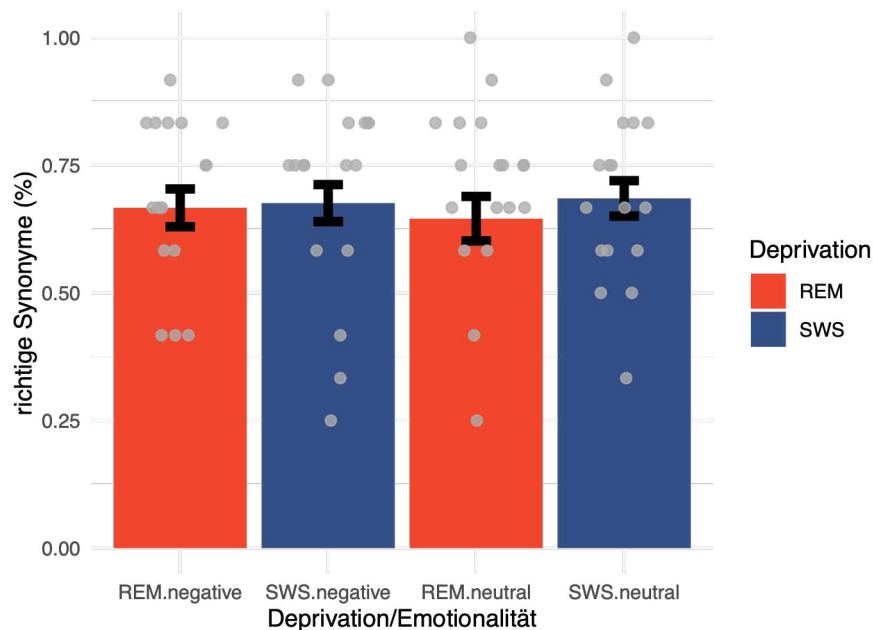


Abbildung 20: *Verspäteter Abruf von Synonymen*

Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und Emotion (negativ; neutral) auf die Anzahl der richtigen Synonyme in Prozent. Die Boxplots zeigen den Median der Stichproben. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

Mittels eines linearen Mixed-Effects-Modells wurde der Einfluss von Schlafdeprivation und emotionaler Valenz auf die verspätete Synonym-Abrufleistung untersucht. Das Modell wurde anhand von 72 Beobachtungen bei 18 Probanden ermittelt.

Weder die Deprivationsart ($t(51) = 0.17, p = 0.864$) noch die Emotion ($t(51) = -0.40, p = 0.694$) hatten einen signifikanten Effekt auf die verspätete Abrufleistung. Es lag kein signifikanter Effekt zwischen Deprivation und Emotion ($t(51) = 0.40, p = 0.690$) vor.

3.5.2.3 Differenzwerte für den Synonymabruf

Untersucht wurden die Differenz zwischen dem direkten und verspäteten Abruf von Synonymen unter Berücksichtigung der Hauptfaktoren Schlafdeprivation (REM vs. SWS) und emotionaler Valenz der Stimuli (negativ vs. neutral) mit einem linearen Mixed-Effects-Modell.

Bei der REM-Schlafdeprivation waren die Differenzwerte durchweg positiv, was auf eine Verbesserung der Abrufleistung über die Zeit spricht. Bei der SWS-Deprivation war der Wert für negative Synonyme hingegen leicht negativ, was auf eine minimale Verschlechterung der Abrufleistung durch die Deprivation im Vergleich zu neutralen Synonymen hinweist. Der Unterschied zwischen negativen und neutralen Synonymen war bei der REM-Schlafdeprivation ausgeprägter im Vergleich zur SWS-Deprivation (Abbildung 21). Die Streuung der individuellen Datenpunkte deutet auf große interindividuelle Unterschiede hin.

Weder die Schlafdeprivation ($t(39) = -0.44$, $p = 0.662$) noch die Emotionen ($t(39) = 0.77$, $p = 0.449$) oder deren Interaktion ($t(39) = -0.25$, $p = 0.802$) zeigten einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable.

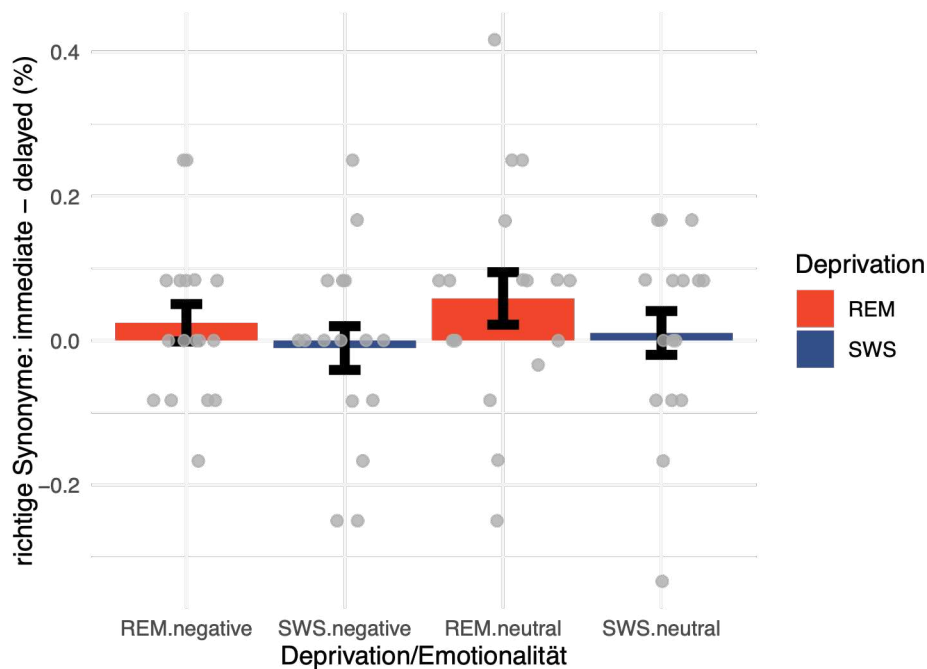


Abbildung 21: Einfluss der Deprivation und Emotion auf die Anzahl der richtigen Synonyme
 Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und Emotion (negativ; neutral) auf die Anzahl der richtigen Synonyme in Prozent. Die Boxplots zeigen den Median der Stichproben. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.5.3 Wortreihenfolge

3.5.3.1 Direkter Abruf

Zur Untersuchung der direkten Abrufleistung vor selektiver Schlafdeprivation wurden die korrekt erinnerten Wortpositionen analysiert (Abbildung 22). Die Analyse zeigte, dass negative Wörter im Durchschnitt signifikant besser erinnert wurden als neutrale Wörter ($t(97) = -4.78, p < 0.001$). Vor der REM-Schlafdeprivation war die Anzahl korrekt wiedergegebener Wortpositionen für negative Wörter signifikant höher als für neutrale Wörter ($t(97) = 4.78, p < 0.001$). Auch vor der SWS-Deprivation war die Abrufleistung bei negativen Wörtern besser als bei neutralen Wörtern, wobei der Unterschied statistisch nicht signifikant war ($t(97) = 1.89, p = 0.061$). Die Deprivationsart zeigte keinen signifikanten Einfluss auf negative und neutrale Wörter (negative: $t(97) = 1.94, p = 0.055$; neutrale: $t(97) = -0.98, p = 0.328$).

Das lineare Mixed-Effects-Modell zeigte, dass die Interaktion zwischen Deprivation und Emotion signifikant war ($t(97) = 2.18, p = 0.031$). Auch TST ($t(97) = -2.58, p = 0.011$) und S2-Schlafanteil ($t(97) = 3.01, p = 0.003$) hatten signifikante Einflüsse auf die Leistung.

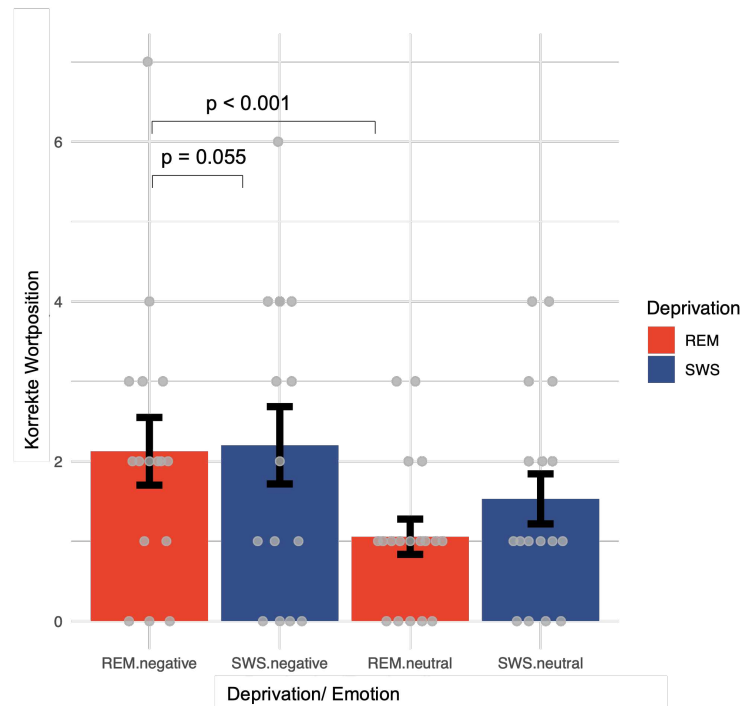


Abbildung 22: Korrekte Wortpositionen bei direktem Abruf
 Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und Emotion (negativ; neutral) auf die Anzahl der richtigen Wortpositionen. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.5.3.2 Verspäteter Abruf

Zur Untersuchung der verspäteten Abrufleistung nach selektiver Schlafdeprivation wurden die korrekt erinnerten Wortpositionen analysiert (Abbildung 23). Betrachtet wurden die Effekte der Schlafdeprivation (REM vs. SWS) und Emotion (negativ vs. neutral). Nach der REM-Schlafdeprivation wurden negative und neutrale Wörter beim verspäteten Abruf schlechter erinnert als nach der SWS-Deprivation. Nach der SWS-Deprivation war die Gedächtnisleistung für negative Wörter deutlich besser als für neutrale Wörter. Nach der REM-Schlafdeprivation wurden negative Wörter ebenfalls besser erinnert als neutrale Wörter.

Die Deprivation hatte keinen signifikanten Effekt auf die Wiedergabe der korrekten Wortreihenfolge beim verspäteten Abruf ($t(97) = 1.00, p = 0.322$). Der Effekt der Emotion hingegen war hochsignifikant ($t(97) = -3.71, p < 0.001$). Die S1-Schlafphase hatte keinen signifikanten Effekt auf die Gedächtnisleistung bei diesem Test ($t(97) = 1.44, p = 0.153$). Die S2-Schlafphase hingegen zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Wiedergabeleistung ($t(97) = 3.02, p = 0.003$).

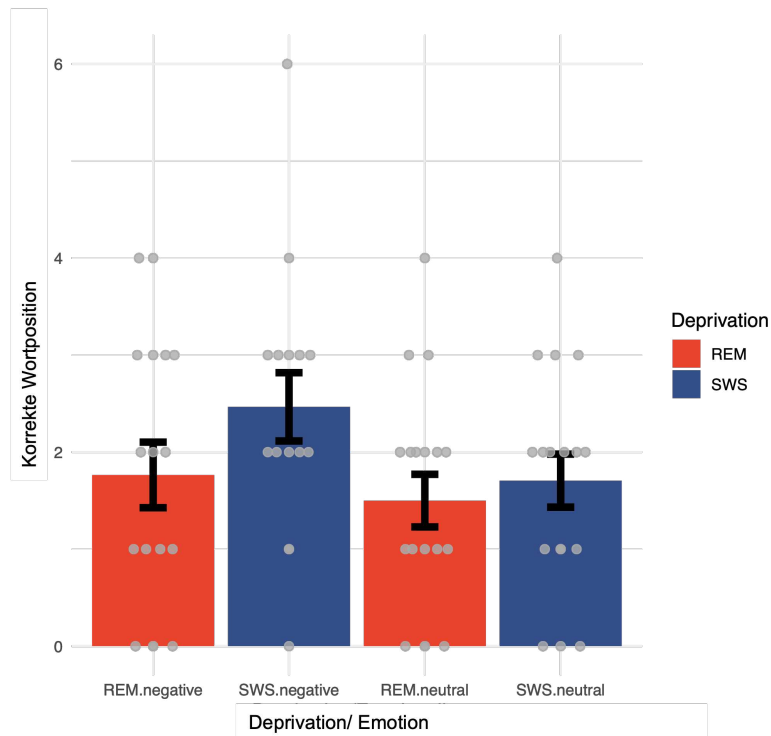


Abbildung 23: Korrekte Wortpositionen beim verspäteten Abruf
 Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und Emotion (negativ; neutral) auf die Anzahl der richtigen Wortpositionen. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.5.4 Differenzscore

Der Differenzscore wurde mit dem linearen Mixed-Effects-Modell berechnet. Es zeigt sich kein signifikanter Haupteffekt der Deprivation auf die Wiedergabe der korrekten Wortreihenfolge im Vergleich von direktem zu verspätetem Abruf ($t(95) = -1.93, p = 0.057$). Die Emotion hat einen signifikanten Einfluss auf die Wiedergabe der korrekten Wortposition beim direkten zu verspäteten Abruf ($t(95) = -2.57, p = 0.012$). Die Interaktion zwischen der Deprivation und Emotion zeigte ebenfalls einen signifikanten Einfluss ($t(95) = 2.06, p = 0.042$). Die S2-Dauer hingegen hatte keinen signifikanten Effekt ($t(0.68, p = 0.497)$).

Die Gedächtnisleistung für negative Wörter zeigte zwischen direktem und verspätetem Abruf bei der REM-Schlafdeprivation signifikante Unterschiede ($t(95) = 2.57, p = 0.012$). Nach der SWS-Deprivation konnte kein signifikanter Unterschied der Differenzwerte zwischen negativen und neutralen Wörtern festgestellt werden ($t(95) = -0.31, p = 0.761$). Negative Wörter wurden nach der REM-Schlafdeprivation marginal besser ($t(95) = 1.93,$

$p = 0.057$, Abbildung 24) erinnert als nach der SWS-Deprivation. Bei neutralen Wörtern gab es keinen Unterschied zwischen den beiden Deprivationsarten ($t(95) = -0.92$, $p = 0.361$).

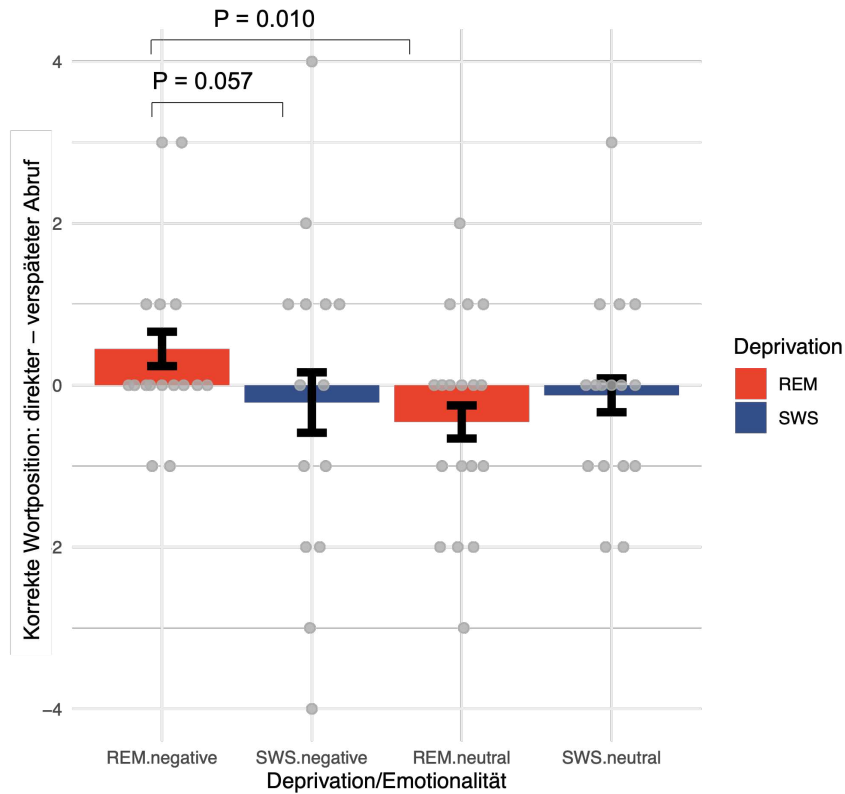


Abbildung 24: Richtige Wortposition abhängig von der Deprivation und Emotion
 Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und Emotion (negativ; neutral) auf die Anzahl der richtigen Wortpositionen in Prozent Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.6 Wortflüssigkeitstest

Mit dem Wortflüssigkeitstest wurde der Einfluss der Schlafdeprivation (SWS vs. REM) auf die Wortproduktion untersucht (Abbildung 25). Es wurde ein gepaarter t-Test berechnet, da die Probanden den Test unter beiden Deprivationsbedingungen absolvierten. Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Wortproduktion zwischen REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation ($t(14) = -0.88$, $p = 0.392$).

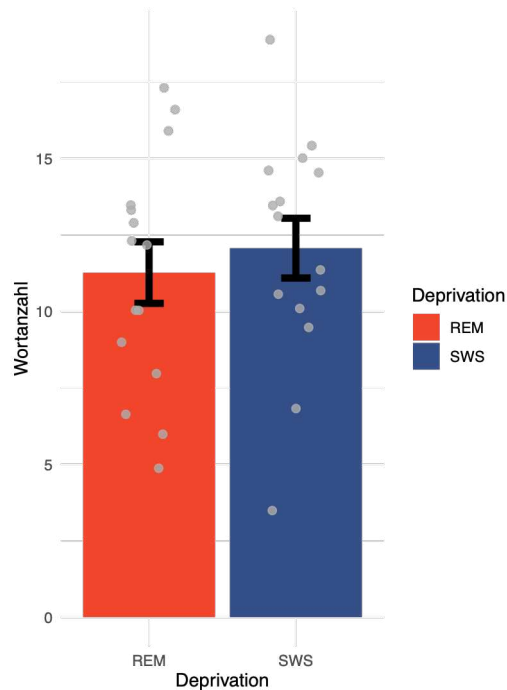


Abbildung 25: *Deprivation und Wortanzahl*

Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) auf die Anzahl der genannten Wörter. Die Boxplots zeigen den Median der Stichproben. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.7 Psychomotorischer Vigilanztest

Es wurde die Wirkung der Schlafdeprivation (REM vs. SWS) auf die durchschnittliche Reaktionszeit über zwei Sitzungen mit Hilfe einer Zweifache-ANOVA-Analyse mit wiederholten Messungen untersucht (Abbildung 26).

Zwischen der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation lag kein signifikanter Unterschied vor ($F(1) = 0.56$, $p = 0.457$). Auch zwischen den beiden Sitzungen konnte kein Unterschied festgestellt werden ($F(1) = 0.46$, $p = 0.501$). Es gab keine Interaktion zwischen der Sitzung und der Deprivation ($F(1) = 0.35$, $p = 0.558$).

Die Mittelwerte und Standardabweichungen zeigten ähnliche Reaktionszeiten zwischen der REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation sowie der ersten und zweiten Sitzung. Die Reaktionszeiten in der ersten und zweiten Sitzung bei Deprivation des REM-Schlafes waren annähernd gleich. Bei der SWS-Deprivation war die Reaktionszeit in der ersten Sitzung minimal langsamer im Vergleich zur zweiten Sitzung.

Wie zuvor erwartet konnte kein wesentlicher Unterschied in der Reaktionszeit zwischen SWS-Deprivation und REM-Schlafdeprivation während der ersten und zweiten Sitzung festgestellt werden.

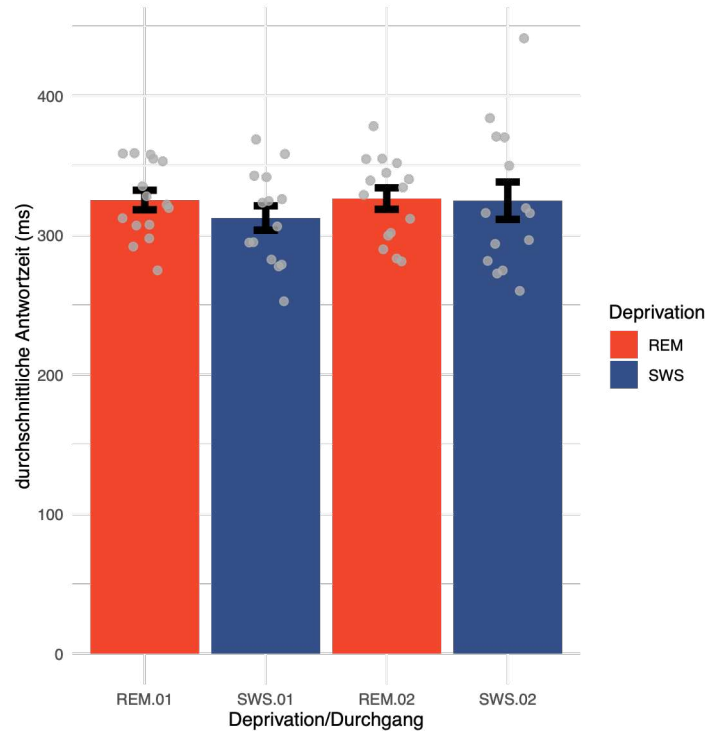


Abbildung 26: Durchschnittliche Antwortzeiten abhängig von Deprivation und Sitzung
Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und der Durchgang (01; 02) auf die durchschnittliche Antwortzeit in ms. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

3.8 Digit Span Task

Mit dem Digit Span Task wurde der Einfluss von Schlafdeprivation (REM vs. SWS) auf die kognitive Leistung in zwei Sitzungen mit einer Zweiwege-ANOVA-Analyse mit wiederholten Messungen untersucht (Abbildung 27). Es wurde geprüft, ob die Deprivationsart (REM vs. SWS) und der Zeitpunkt der Testung (erste oder zweite Sitzung) einen Einfluss auf die kurzfristige Speicherung und Wiedergabe von Zahlenfolgen hatten.

Die Deprivation zeigte keinen signifikanten Effekt ($F(1) = 0.22$, $p = 0.640$). Auch zwischen den beiden Testzeitpunkten veränderte sich die kognitive Leistung nicht ($F(1) = 0.03$, $p = 0.859$). Eine Interaktion zwischen der Deprivation und der Sitzung konnte nicht nachgewiesen werden ($F(1) = 0.86$, $p = 0.360$).

Betrachtet man die Mittelwerte, so sind die Unterschiede zwischen den Deprivationen und den Sitzungen gering. In der ersten Sitzung waren die Leistungen der Probanden unter REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation annähernd gleich. In der zweiten Sitzung war die Leistung unter REM-Schlafdeprivation geringfügig besser im Vergleich zur SWS-Deprivation. Die Schwankungen innerhalb der Gruppe waren relativ hoch, vor allem unter REM-Schlafentzug, was auf eine große individuelle Variabilität hinweist.

Wie zuvor erwartet, konnte kein Unterschied zwischen der SWS- und REM-Schlafdeprivation zwischen der ersten und zweiten Sitzung festgestellt werden.

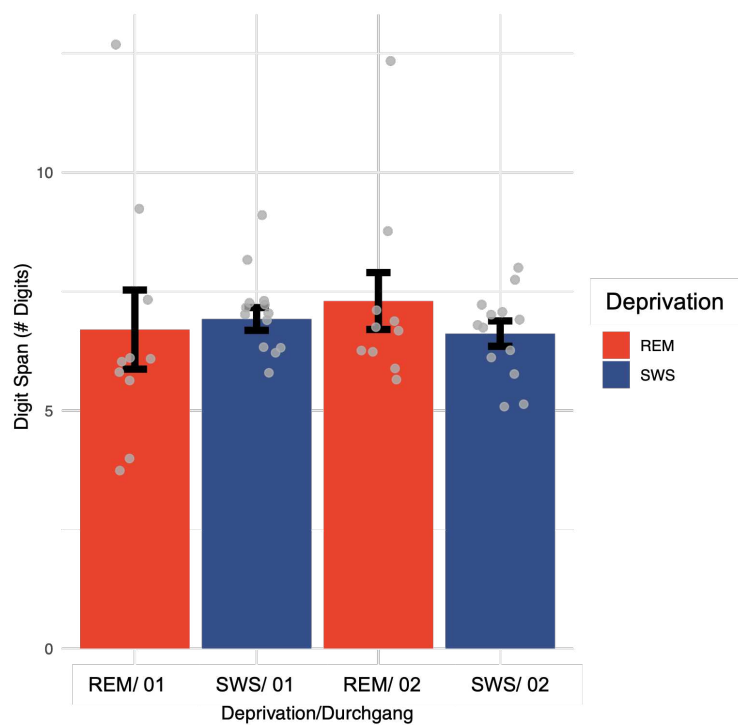


Abbildung 27: *Digit Span abhängig von Deprivation und Sitzung*
Der Einfluss der Deprivation (REM, rot; SWS, blau) und des Durchgangs (01; 02) auf die Digit Span. Ausreißer werden außerhalb der Spanne als Punkte dargestellt.

4. Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde die Wirkung selektiver Deprivation von REM-Schlaf und SWS (slow-wave-sleep) mit einer Adaptationsnacht ohne Schlafentzug verglichen, um die Hypothese zu überprüfen, dass eine gezielte REM-Schlafdeprivation die schlafassoziierte Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte bei jungen, gesunden Männern beeinträchtigt. Es wurde eine Verschlechterung des episodischen Gedächtnisses nach der Tiefschlafdeprivation erwartet. Zur Überprüfung der aufgestellten Hypothese wurden die Gedächtnisleistung nach einer Nacht REM-Schlafdeprivation bzw. Tiefschlafdeprivation ausgewertet. Die Deprivation der REM- und SWS-Phasen erfolgte mittels akustischer Stimulation.

Bisherige Studien fokussierten meist die schlafassoziierte Konsolidierung von Gedächtnisinhalten, ohne die einzelnen Schlafphasen zu unterscheiden oder deprivierten nur den SWS (Ferrara et al., 2000; Ferrara et al., 2002; Ukraintseva et al., 2020). Über die Funktion der Schlafphasen bei der Gedächtniskonsolidierung gibt es eine Vielzahl an Hypothesen. Die genaue Funktion des REM-Schlafes bei der Gedächtniskonsolidierung konnte bisher nicht eindeutig definiert werden.

4.1 Schlafdeprivation

Die selektive Deprivation der Schlafphasen REM und SWS stellt die Grundlage der Untersuchung unserer Hypothese dar. Dazu wurde der Anteil der zu deprivierenden Schlafphase durch akustische Reize auf ein Minimum reduziert. Ziel war es, den Anteil des REM-Schlafes bzw. SWS in der ersten Nacht auf unter 5 % und in der zweiten Nacht auf unter 10 % zu reduzieren. Die übrigen Schlafphasen sollten möglichst unbeeinflusst bleiben. Der SWS-Anteil nach der Deprivation konnte auf 1.13 % und der REM-Anteil auf 4.86 % im Vergleich zur Adaptionnacht ohne Deprivation reduziert werden. Allerdings konnte nach Deprivation beider Schlafphasen eine Verkürzung der Gesamtschlafdauer (TST) im Vergleich zur Adaptionnacht festgestellt werden. Die REM-Schlafdeprivation fragmentierte den Schlaf dabei stärker, was sich in einer erhöhten Wachzeit und einer verlängerten S1-Dauer im Vergleich zur Adaptionnacht zeigte. Ein

vermehrtes Auftreten der S1 konnte während der Deprivation beider Schlafphasen beobachtet werden, da nach jedem Erwachen durch die akustischen Stimuli oder das Betreten des Raumes bei ausbleibender Reaktion des Probanden auf die Töne, die physiologische Schlafarchitektur unterbrochen wurde und der Einschlafprozess von neuem begann. Dies deutet darauf hin, dass die akustischen Reize den Probanden häufig weckten, statt einen Übergang in eine andere Schlafphase zu erzielen. So war die Dauer der S1-Phase in beiden Deprivationsarten mehr als doppelt so lang wie in der Adaptionsnacht. Im Vergleich zu einer Studie von Herzog et al. (2013) konnte in unserer Studie die Anteile des REM-Schlafes und SWS unter Deprivation deutlich stärker reduziert werden. Der Anteil des REM-Schlafes lag nach selektiver Schlafdeprivation bei $16.9 \pm 1,6 \%$, der SWS-Anteil bei $4.0 \pm 1.0 \%$ (Herzog et al., 2013). Auch hier konnte eine Zunahme der S1-Dauer festgestellt werden. Die TST blieb hingegen unverändert.

In früheren Studien wurde die Weckschwelle mittels Deprivation mit aufsteigender Lautstärke mit 1000 Hz-Tonreihen erreicht (Ferrara et al., 2000). Die Töne wurden mit einer Intensität von 40-110 dB über Lautsprecher abgespielt, die ca. 40 cm vom Kopf des Probanden entfernt platziert waren (Ferrara et al., 2002). In dieser Studie wurde die SWS-Dauer auf 1.5 Minuten in der ersten und 2.9 Minuten in der zweiten Deprivationsnacht reduziert werden. Der REM-Schlaf wurde nicht depriviert. In der vorliegenden Studie wurden die Töne jedoch mit gleicher Intensität in aufsteigender Reihenfolge, allerdings über Kopfhörer, wiedergegeben. Möglicherweise führte die Wiedergabe der Töne über die Kopfhörer zu einem intensiveren akustischen Reiz und damit zu einem vermehrten Aufwachen der Probanden, was mit einer kürzeren TST und einer längeren WASO- und S1-Dauer assoziiert ist. In anderen Studien wurde der Raum nicht betreten, um ein vollständiges Erwachen der Probanden zu vermeiden. Es konnte gezeigt werden, dass die hier angewandte Deprivationsmethode nicht nur eine einzelne Schlafphase (REM vs. SWS) beeinflusst, sondern die gesamte Schlafstruktur veränderte.

Die TST von ca. 413 Minuten bzw. 6,88 Stunden in der Adaptionsnacht liegt leicht unter der von der American Academy of Sleep Medicine (AASM) empfohlenen Schlafdauer von sieben und mehr Stunden. Die leicht verkürzte TST in der ersten Nacht ohne Deprivation im Schlaflabor kann auf den „first night effect“ (FNE) zurückgeführt werden. Dieser Effekt äußert sich in längeren Wachphasen, einer kürzeren S1-Phase und einem verzögerten Auftreten von SWS und REM-Schlaf (Agnew Jr et al., 1966). Während der

REM-Schlaf unter normalen Bedingungen in der Regel 90-120 Minuten dauert, beträgt die REM-Dauer in der Adaptionsnacht dieser Studie durchschnittlich nur 77 Minuten. Der FNE könnte bereits zu einer Verfälschung der Referenzdaten der Adaptionsnacht geführt haben.

Der REM-Anteil nach der REM-Schlafdeprivation war deutlich höher als der SWS-Anteil nach der SWS-Deprivation. Die geringe Streuung der Werte während der SWS-Deprivation deutet auf eine besonders effektive Unterdrückung des Tiefschlafes hin. Der Beginn des REM-Schlafes ist im Vergleich zum Beginn des SWS schwerer zu erkennen, was die Deprivation erschwert. So wurde der SWS unterbrochen, sobald drei Delta-Wellen in einem Zeitfenster von 15 Sekunden erkannt wurden. Der REM-Schlaf wurde nach der Detektion einer abfallenden EMG-Amplitude unterbrochen.

Zusätzlich kann von einem sogenannten „REM-Rebound-Effekt“ ausgegangen werden, der eine kompensatorische Reaktion auf den REM-Schlafentzug darstellt. Als Folge des REM-Schlafentzugs in der ersten Nacht kann es in der zweiten Nacht zu einer erhöhten Häufigkeit, Tiefe und stärkeren Intensität der Schlafphase gekommen sein. Genaue Daten zur ersten und zweiten REM-Nacht können der Dissertation von Cédric Hillert entnommen werden. Dieser Effekt dient der Aufrechterhaltung des normalen Schlafmusters und der Homöostase (Feriante & Singh, 2020). Der „REM-Rebound-Effekt“ wurde 1983 erstmals beschrieben (Vogel, 1983).

4.2 Abruf- und Erkennungsleistung

Der Food Location Memory Task (FLM) ermöglicht es, emotionale und neutrale Bilder mit der räumlichen Zuordnung zu kombinieren und so Gedächtnisprozesse zu analysieren. Mit Hilfe der FLM wurde die Hypothese untersucht, dass die Probanden nach dem REM-Schlafentzug im Vergleich zum SWS-Entzug emotionale (essensbezogene) Objekte schlechter wiedererkennen als neutrale Objekte. Diese Annahme bezieht sich insbesondere auf Lebensmittel, nicht aber auf Nicht-Lebensmittel-Items. Diese Hypothese konnte teilweise bestätigt werden. Nach dem REM-Schlafentzug war die Erkennungsrate von Lebensmitteln im Vergleich zu Nicht-Lebensmitteln geringer. Nach dem SWS-Entzug konnte dies nicht bestätigt werden. Diese Erkenntnis unterstützt die Hypothese, dass der REM-Schlaf eine wichtige Rolle bei der Verarbeitung emotional

wichtiger Inhalte spielt. In der Literatur wird die Annahme beschrieben, dass der REM-Schlaf die Integration neuer Erinnerungen in ein bereits bestehendes Netzwerk fördert (Walker & Stickgold, 2010). Der REM-Schlaf steht in engem Zusammenhang mit der Aktivität der Amygdala, die eine wichtige Rolle bei der Verarbeitung und Speicherung emotionaler Gedächtnisinhalte spielt (Maquet et al., 1996).

Auch andere Studien (Groch et al., 2015; Wagner et al., 2001), welche die Wirkung von SWS-reichem Schlaf in der ersten Nachthälfte mit REM-reichem Schlaf in der zweiten Nachthälfte verglichen, zeigten, dass REM-reicher Schlaf selektiv die Konsolidierung emotionaler Erinnerungen fördert. Die Ergebnisse der FLM bestätigen diese Erkenntnis, indem sie zeigen, dass die Deprivation von REM-Schlaf zu einer signifikanten Verschlechterung der Erkennungsleistung bei emotionalen Bildern führt. Dies deutet darauf hin, dass die Verarbeitung von Nahrungsreizen eng mit dem Belohnungssystem verknüpft ist, das während des REM-Schlafs besonders aktiv ist. In der verspäteten Abrufphase ist die Abrufleistung für positive Inhalte nicht signifikant; es zeigt sich eine deutliche Abschwächung nach der Deprivation. Dies lässt vermuten, dass die emotionale Gedächtnisverstärkung ohne REM-Schlaf nur kurzfristig stabil ist (Wagner et al., 2001).

Die Hypothese, dass sich die Probanden nach dem SWS-Entzug schlechter an die Position der Bilder auf dem Bildschirm erinnern als nach dem REM-Entzug, konnte nicht bestätigt werden. Dies steht im Widerspruch zur bisherigen Literatur, die darauf hinweist, dass die langsamen Oszillationen und Schlafspindeln, die während des SWS auftreten, die synaptische Plastizität und die neuronale Reorganisation unterstützen und damit die Konsolidierung räumlicher Erinnerungen gefördert wird (Gais et al., 2007).

Die direkte Abrufphase führte im Allgemeinen zu einer besseren Abrufleistung im Vergleich zur verspäteten Abrufphase nach der Deprivation, sowohl nach der REM-Schlafdeprivation als auch nach der SWS-Deprivation. Die Verzögerung der Abrufphasen und die Deprivation der Schlafphase scheinen einen signifikanten Einfluss auf die Abrufleistung und damit auf die Langzeitkonsolidierung zu haben. Ob der zeitliche Abstand zwischen den Abrufphasen oder die Deprivation die Gedächtnisleistung verschlechtert, lässt sich hier nicht feststellen. Die Überführung der Informationen vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis scheint beeinträchtigt zu sein. Dieser Effekt wurde bei allen Kategorien beobachtet, insbesondere bei den positiven Lebensmittelbildern nach

der REM-Schlafdeprivation und bei den positiven Nicht-Lebensmittelbildern nach der SWS-Deprivation.

Bei neutralen Stimuli wurden konstant höhere Werte erzielt als bei den positiven, unabhängig von der Kategorie oder dem Abrufzeitpunkt. Neutrale nicht-nahrungsbezogene Informationen scheinen unter REM-Schlafdeprivation weniger anfällig für die Gedächtnisbeeinträchtigungen zu sein.

4.3 Einfluss der selektiven Schlafdeprivation auf die Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte

Die Verwendung emotionaler und neutraler Texte ermöglicht die Untersuchung des Einflusses selektiver Schlafdeprivation von REM-Schlaf und SWS auf die Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte. Die emotionalen und neutralen Texte wurden auf den verwendeten Bewertungsskalen statistisch signifikant unterschiedlich bewertet. Acht von insgesamt zwölf Kategorien wiesen signifikante Unterschiede auf. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass emotionale Texte im Gegensatz zu neutralen Texten eine emotionale Reaktion hervorrufen. Im Vergleich zu neutralen Texten wurden emotionale Texte als anschaulicher, erschreckender, interessanter, erregender, emotionaler, negativer, weniger verständlich und wichtiger wahrgenommen. Frühere Studien beschreiben eine Auswirkung des Schlafmangels auf das emotionale Gedächtnis, die zu einer Verstärkung der negativen Stimmung und damit zu einer negativeren Bewertung führen kann (Tempesta et al., 2018). Zu berücksichtigen ist, dass die emotionalen Texte („Mord“, „Querschnittslähmung“) einen stärker narrativen Charakter haben als die sachlich beschriebenen neutralen Texte („Bronzeguss“, „Mode“). Dies könnte zu Unterschieden in der Bewertung beigetragen haben. Begriffspaare wie „bekannt – unbekannt“ oder „vertraut – unvertraut“ der Bewertungsskalen könnten durch individuelle Vorerfahrungen der Probanden beeinflusst worden sein. Ein signifikanter Einfluss der Deprivationsart (REM vs. SWS) auf die Bewertungsskalen konnte nicht festgestellt werden. Der selektive Entzug von REM-Schlaf bzw. SWS scheint keinen Einfluss auf die emotionale Wahrnehmung und die Bewertung der Texte gehabt zu haben. Dagegen zeigt der Faktor Emotion signifikante Effekte. Eine signifikante Interaktion zwischen Deprivation und Emotion konnte wie erwartet nicht festgestellt werden.

Die Hypothese, dass die Erkennungsleistung von relevanten Kontext-Wörtern nach der REM-Schlafdeprivation schlechter sei als nach dem SWS-Entzug, konnte nicht bestätigt werden. Bei der Synonymenerkennung des direkten und verspäteten Abrufs wurde kein Einfluss von Deprivation und Emotion gefunden. Das Fehlen signifikanter Effekte bei der Synonymerkennung könnte darauf hindeuten, dass semantische Assoziationen weniger anfällig für Störungen durch Schlafdeprivation sind. Atienza und Cantero kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Sie stellten fest, dass semantische Aspekte des Gedächtnisses weniger schlafabhängig sind als episodische Komponenten (Atienza & Cantero, 2008).

Nach der REM-Schlafdeprivation waren die Leistungen bei der Wiedergabe der Wortreihenfolge wie zuvor erwartet schlechter als nach der SWS-Deprivation. Die Wiedergabe der korrekten Wortreihenfolge war nach beiden Deprivationsarten für negative Wörter besser als für neutrale. Während des SWS sollen deklarative Inhalte und während des REM-Schlafs non-deklarative Inhalte konsolidiert werden (Gais & Born, 2004). Für die Konsolidierung deklarativer Gedächtnisinhalte soll ein SWS-reicher Schlaf von Bedeutung sein (MacDonald & Cote, 2021). Die langsamen Oszillationen im SWS spielen eine zentrale Rolle bei der Gedächtnisbildung (Aeschbach et al., 2008; Westerberg et al., 2015). Diese Oszillationen sind eng mit den Schlafspindeln verknüpft, deren erhöhte Dichte als Marker für eine effektive Gedächtniskonsolidierung angesehen wird (Rasch & Born, 2013). Eine neuere Studie zeigt, dass die Kopplung zwischen Spindeln und Oszillationen mit besseren Gedächtnisleistungen assoziiert ist (Bastian et al., 2022).

Insbesondere der REM-Schlaf soll die Konsolidierung des emotionalen Gedächtnisses unterstützen. Für das emotionale Gedächtnis ist die Amygdala einer der wichtigsten Hirnbereiche. Ihre Aktivität ist vor allem im REM-Schlaf erhöht (Maquet et al., 1996). Die erhöhte Amygdala-Aktivität geht mit einer Synchronisation zwischen hippocampalen und neokortikalen Netzwerken einher, was die Konsolidierung emotionaler Erinnerungen erleichtert (Paré et al., 2002). Diese Erkenntnis deckt sich mit Studien, die zeigen, dass REM-Schlaf insbesondere das emotionale Gedächtnis stärkt, während dieser Effekt für neutrale Inhalte nicht nachweisbar ist (Wagner et al., 2001).

Die Untersuchung der Auswirkung der Schlafdeprivation (SWS vs. REM) und Emotion (negativ vs. neutral) auf die Veränderung der Wortreihenfolge zwischen der direkten und

verspäteten Erinnerung deutet darauf hin, dass die REM-Schlafdeprivation die Gedächtnisleistung signifikant schlechter beeinflusst als die SWS-Deprivation. Dieses Ergebnis bestätigt frühere Studien, die gezeigt haben, dass der REM-Schlaf sowohl für das deklarative Gedächtnis als auch für die Verarbeitung emotionaler Informationen von Bedeutung ist (Diekelmann & Born, 2010; Walker & van Der Helm, 2009). Die vorliegende Studie zeigte zudem, dass negative Emotionen nach der REM-Schlafdeprivation schlechter erinnert werden können als nach der SWS-Deprivation.

Ein bemerkenswertes Ergebnis der Studie ist der Kontrast zwischen den fehlenden Effekten bei der Synonymerkennung und den signifikanten Effekten bei der Wortreihenfolge. Demnach könnte die semantische Verarbeitung (Synonyme) weniger abhängig von spezifischen Schlafphasen sein, während die sequentielle Organisation (Wortreihenfolge) stärker vom REM-Schlaf abhängig ist, insbesondere für emotionale Inhalte.

4.4 Auswirkungen der selektiven Schlafdeprivation auf die Wortproduktion

Der Wortflüssigkeitstest ermöglicht es die Auswirkungen von REM-Schlafdeprivation und SWS-Deprivation auf die Wortproduktion unter Zeitdruck zu untersuchen. Es wurde angenommen, dass die Deprivation des REM-Schlafes keinen Einfluss auf die Wortflüssigkeit hat. Diese Annahme konnte in der Studie bestätigt werden. Die durchschnittliche Anzahl der produzierten Wörter war unter SWS-Deprivation geringfügig höher als unter REM-Schlafdeprivation, allerdings ohne statistisch signifikanten Effekt. Es konnte somit ausgeschlossen werden, dass die Deprivation andere kognitive Prozesse außer das Langzeitgedächtnis beeinflusst und somit die Ergebnisse der Gedächtnisaufgaben hätte verfälschen können.

Frühere Studien haben jedoch gezeigt, dass REM-Schlaf eine wichtige Rolle bei der Sprachverarbeitung spielt. Der SWS hingegen wird mit dem deklarativen Gedächtnis und der Konsolidierung in Verbindung gebracht (Gais & Born, 2004). Da das Ergebnis in dieser Studie nicht signifikant ist, kann daher vermutet werden, dass die Wortflüssigkeit als kognitive Funktion nicht primär vom REM-Schlaf abhängt oder dass Defizite durch kompensatorische Mechanismen ausgeglichen werden. Eine Studie von Drummond zeigte, dass eine Schlafdeprivation nicht notwendigerweise zu einer Verschlechterung der

Wortproduktion führen muss, da kompensatorische Veränderungen u.a. im präfrontalen Kortex auftreten (Drummond et al., 2000).

4.5 Erfassung der Wachsamkeit und Aufmerksamkeit

Der psychomotorische Vigilanztest (PVT) gilt als zuverlässiges Maß zur Erfassung der Wachsamkeit und Aufmerksamkeit (Basner & Dinges, 2011). Durch Schlafmangel ist die Fähigkeit zeitnah auf Reize zu reagieren eingeschränkt, was auf eine verminderte Vigilanz zurückgeführt werden kann (Lim & Dinges, 2008). Wie erwartet hatten weder die REM-Schlafdeprivation noch die SWS-Deprivation in dieser Studie einen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeit im PVT.

Frühere Studien haben gezeigt, dass die kognitiven Fähigkeiten durch den Schlafmangel beeinträchtigt bleiben, auch wenn die Wachsamkeit und Aufmerksamkeit durch stimulierende Gegenmaßnahmen wiederhergestellt werden. Das Ausmaß, in dem Schlafmangel bestimmte kognitive Prozesse beeinträchtigt, hängt jedoch von Faktoren wie dem Ausmaß des Wachsamkeits- und Aufmerksamkeitsverlustes, kompensatorischen Prozessen und auch von emotionsverarbeitenden Netzwerken ab (Killgore, 2010). Nach totaler Schlafdeprivation zeigte sich in einer Studie von Drummond und Kollegen eine signifikante Verschlechterung der Reaktionszeit im PVT (Drummond et al., 2000). Eine selektive Deprivation von REM-Schlaf bzw. SWS scheint keinen Einfluss auf die psychomotorische Vigilanz zu haben. Die vorhandene hohe individuelle Variabilität könnte zur Maskierung potenzieller Deprivationseffekte beigetragen haben. Die Anfälligkeit für Leistungsbeeinträchtigungen nach der Schlafdeprivation ist individuell sehr unterschiedlich. Dabei könnten genetische Faktoren, Persönlichkeitsmerkmale und habituelle Schlafmuster eine Rolle spielen (Banks & Dinges, 2007).

Das Ergebnis kann auf die geringe Stichprobengröße oder auch auf die verkürzte Testdauer von 5 Minuten zurückgeführt werden. Die ursprüngliche Dauer des Tests beträgt 10 Minuten (Dinges & Powell, 1985).

4.6 Einfluss der selektiven Schlafdeprivation auf die kognitive Leistungsfähigkeit

Der Digit Span Task ermöglicht es den Einfluss von selektiver Schlafdeprivation auf die kognitive Leistungsfähigkeit zu zwei Testzeitpunkten zu messen. Die Ergebnisse zeigten wie erwartet keinen signifikanten Effekt des Testzeitpunkts oder der Deprivationsart auf die Leistung der Probanden. Zwischen den beiden Faktoren konnte ebenfalls keine signifikante Interaktion festgestellt werden. Frühere Studien haben gezeigt, dass es individuelle Unterschiede in der Anfälligkeit für kognitive Defizite im Zusammenhang mit Schlafentzug gibt (Lim et al., 2007; Van Dongen et al., 2004). Das Ergebnis steht im Widerspruch zu Studien, die eine Beeinträchtigung der kognitiven Leistungen nach der Schlafdeprivation annahmen. Dem REM-Schlaf kommt eine zentrale Bedeutung für die Konsolidierung prozeduraler Gedächtnisinhalte zu, während der SWS vor allem für die Festigung deklarativer Gedächtnisinhalte relevant ist (Walker & Stickgold, 2006). Allerdings erfasst der Digit Span Task die kurzfristige Gedächtnisleistung, während der beschriebene Effekt vor allem auf die langfristige Gedächtnisleistung abzielt.

4.7 Limitationen und Ausblick

Jede wissenschaftliche Arbeit ist mit Limitationen verbunden, die aus methodischen oder auch praktischen Gründen entstehen können. Im Folgenden werden die Limitationen der vorliegenden Studie kritisch beleuchtet und damit eine realistische Einordnung der Ergebnisse ermöglicht.

Die Grundlage zur Erfassung der Gedächtnisleistung basiert auf der selektiven Schlafdeprivation. Es stellt sich die Frage, ob die Intervention ausreichend stark war, um valide Ergebnisse zu erzielen. Womöglich hätte eine Deprivation von REM-Schlaf und SWS über einen längeren Zeitraum zu deutlich ausgeprägteren Veränderungen in den untersuchten kognitiven Parametern geführt. Kritisch zu betrachten ist die reduzierte Gesamtschlafdauer bei erhöhter Wachzeit und verlängerte S1-Dauer unter den Deprivationsbedingungen. Die Probanden sind häufig aufgewacht, statt von einer Schlafphase in eine andere überzugehen. Das Aufwachen hätte womöglich durch eine andere Deprivationsmethode verhindert oder zumindest reduziert werden können. Für zukünftige Studien sollte das Betreten des Raumes und die akustische Stimulation überdacht bzw. angepasst werden.

Außerdem bleibt offen, inwieweit die verwendeten kognitiven Tasks adäquat waren, um die Gedächtnisleistung zuverlässig zu erfassen. Weitere oder andere Tasks hätten möglicherweise zu differenzierteren Ergebnissen geführt. Die Limitation der Ergebnisse der FLM besteht darin, dass die Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung der Teilnehmer das Ergebnis beeinflussen könnten. Die Verwendung von standardisierten emotionalen Bildern, die individuell kalibriert werden, könnte hilfreich sein (Lang et al., 1997). Die Manipulation der Emotion ist wahrscheinlich nicht interpretierbar, da die Valenz- und Erregungswerte der Probanden weitgehend nicht mit der vordefinierten Valenz und Erregung für jedes Bild korrelierten.

Die Erhebung zusätzlicher Kontrollmaße wäre hilfreich gewesen, um die Ergebnisse besser einzuordnen und potenzielle Störfaktoren kontrollieren zu können. Da bei zahlreichen Fragebögen Parameter wie die subjektive Einschätzung, Stimmung oder wahrgenommene Schläfrigkeit erfasst wurden, hätte man diese Ergebnisse mit der Gedächtnisleistung in Bezug setzen können, um die Ergebnisse besser einzuordnen.

Zukünftige Studien sollten geschlechterspezifische Unterschiede bei der Konsolidierung in den verschiedenen Schlafphasen analysieren, da in dieser Studie nur Männer untersucht wurden. Eine größere Anzahl an Probanden würde zu einer größeren Evidenz der Ergebnisse führen. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll mechanistische Studien durchzuführen, um die Rolle des REM-Schlafes noch genauer zu erforschen. Dabei könnten tierexperimentelle Arbeiten oder bildgebende Verfahren wichtige Einblicke in die zugrunde liegenden neuronalen Mechanismen liefern. Mithilfe der fMRT wurde bereits in der Vergangenheit wichtige Erkenntnisse über die neuronale Beteiligung an der Gedächtniskonsolidierung erzielt (Gais et al., 2007).

Die Ergebnisse dieser Studie könnten für die Behandlung neuropsychiatrischer Erkrankungen wie Depressionen oder Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS) genutzt werden, bei denen Schlafstörungen und emotionale Gedächtnisveränderungen auftreten. Eine gezielte Modulation emotionaler Erinnerungen durch Manipulation des REM-Schlafes könnte als Behandlungsansatz für Traumata und emotional belastende Erfahrungen genutzt werden. Aktuelle Studien zeigen, dass REM-Schlafstörungen ein Merkmal psychiatrischer Erkrankungen sind und eine wichtige Rolle bei der Regulation von Emotionen spielen (Mendoza-Alvarez et al., 2025; Recher et al., 2024).

5. Zusammenfassung

Der Mensch verbringt etwa ein Drittel seines Lebens im Schlaf. Schlaf erfüllt zahlreiche wichtige Funktionen im Körper und unterstützt die Gedächtnisbildung. Welche Rolle die einzelnen Schlafphasen bei der Gedächtniskonsolidierung spielen, ist bislang noch nicht abschließend geklärt, da viele bisherige Studien meist die allgemeine Funktion des Schlafes für die Gedächtniskonsolidierung, aber nicht die der einzelnen Schlafphasen betrachtet haben. In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb die unterschiedlichen Funktionen von REM-Schlaf (rapid eye movement-Schlaf) und Tiefschlaf (slow-wave-sleep, SWS) in der Konsolidierung emotionaler Gedächtnisinhalte untersucht. Die Untersuchung erfolgte im Rahmen eines randomisierten, einfach-blinden Cross-Over-Designs, wobei jeder Proband sowohl eine REM-Schlaf als auch eine SWS-Deprivation unterzogen wurde.

Untersucht wurde die Hypothese, dass speziell REM-Schlafdeprivation die Gedächtnisleistung beeinträchtigt. 21 junge, gesunde Männer durchliefen jeweils zwei aufeinanderfolgende Testnächte pro Deprivationsart (REM vs. SWS), die im Abstand von 2–4 Wochen stattfanden. Die selektive Unterdrückung von REM- oder SWS-Phasen erfolgte mittels akustischer Stimulation, mit dem Ziel, die jeweilige Schlafphase auf unter 10% zu reduzieren. Zur Erfassung der Gedächtnisleistungen wurden verschiedene Testaufgaben eingesetzt: der Food Location Memory Task (FLM) zur Prüfung der Erinnerung an emotionale und neutrale Bilder und das Lesen und Abrufen emotionaler und neutraler Texte, um die subjektive Bewertung der Texte, Synonymerkennung und Wortreihenfolge zu erfassen. Kontrollaufgaben wie der Wortflüssigkeitstest zur Erfassung der semantischen Wortflüssigkeit, der Psychomotorische Vigilanztest (PVT) zum Test der Reaktionsfähigkeit und der Digit Span Task, das Nachsprechen von Zahlenreihen, dienten dazu, generelle kognitive Auswirkungen der Schlafintervention zu erfassen.

Die Ergebnisse zeigten, dass beide Deprivationsarten zu einer signifikanten Reduktion der Gesamtschlafdauer und einer erhöhten Fragmentierung des Schlafs führten. Die REM-Schlafdeprivation reduzierte den REM-Anteil auf etwa 4.9 %, die SWS-

Deprivation den SWS-Anteil auf etwa 1.1 %. Die Dauer des Schlafstadiums 1 (S1) war in beiden Deprivationsbedingungen mehr als doppelt so lang wie in der Adaptionsnacht.

Im FLM zeigte sich, dass nach REM-Schlafdeprivation die Erkennungsrate für Lebensmittelbilder (d.h. emotional konnotierte Stimuli) signifikant geringer war als für Nicht-Lebensmittelbilder. Nach SWS-Deprivation trat dieser Effekt nicht auf. Dies deutet darauf hin, dass der REM-Schlaf besonders für die Konsolidierung emotional relevanter Inhalte wichtig ist. Bei den Textaufgaben wurden emotionale und neutrale Texte auf Bewertungsskalen signifikant unterschiedlich beurteilt, wobei die Deprivationsart keinen Einfluss auf die subjektive Bewertung hatte. Die Synonymerkennung wurde weder durch Deprivation noch durch Emotion signifikant beeinflusst, was auf eine geringere Schlafabhängigkeit semantischer Assoziationen hindeutet. Die Wiedergabe der korrekten Wortreihenfolge war nach REM-Schlafdeprivation, insbesondere bei emotionalen Inhalten, signifikant schlechter als nach SWS-Deprivation. Die Kontrollaufgaben zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Deprivationsarten, was gegen eine generelle Beeinträchtigung anderer kognitiver Prozesse spricht.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die REM-Schlafdeprivation vor allem auf die episodische bzw. semantische Gedächtniskonsolidierung sowie die Konsolidierung emotional relevanter Gedächtnisinhalte auswirkt, während die SWS-Deprivation erwartungsgemäß zu geringeren Beeinträchtigungen führt. Die beobachteten Defizite bei der Verarbeitung emotionaler Inhalte nach der REM-Schlafdeprivation stehen im Einklang mit früheren Studien, die eine erhöhte Aktivität der Amygdala während des REM-Schlafs und deren Bedeutung für die emotionale Gedächtniskonsolidierung betonen.

Zukünftige Studien sollten geschlechtsspezifische Unterschiede bei der Konsolidierung in den verschiedenen Schlafphasen analysieren, da in dieser Studie nur Männer untersucht wurden. Die erbrachten Ergebnisse könnten für die Behandlung neuropsychiatrischer Erkrankungen wie Depressionen oder PTBS genutzt werden, bei denen Schlafstörungen und emotionale Gedächtnisveränderungen auftreten. Eine gezielte Modulation emotionaler Erinnerung durch Manipulation des REM-Schlafes könnte als Behandlungsansatz für Traumata und emotional belastende Erfahrungen genutzt werden.

6. Literaturverzeichnis

- Ackermann, S., & Rasch, B. (2014). Differential effects of non-REM and REM sleep on memory consolidation? *Current neurology and neuroscience reports*, *14*, 1-10.
- Aeschbach, D., Cutler, A. J., & Ronda, J. M. (2008). A role for non-rapid-eye-movement sleep homeostasis in perceptual learning. *Journal of Neuroscience*, *28*(11), 2766-2772.
- Agnew Jr, H., Webb, W. B., & Williams, R. L. (1966). The first night effect: An Eeg study of sleep. *Psychophysiology*, *2*(3), 263-266.
- Aitken, R. C. (1969). A growing edge of measurement of feelings [abridged] measurement of feelings using visual analogue scales. *Proceedings of the royal society of medicine*, *62*(10), 989-993.
- Albrecht, U., & Ripperger, J. A. (2018). Circadian clocks and sleep: impact of rhythmic metabolism and waste clearance on the brain. *Trends in neurosciences*, *41*(10), 677-688.
- Alvaro, P. K., Roberts, R. M., & Harris, J. K. (2013). A systematic review assessing bidirectionality between sleep disturbances, anxiety, and depression. *Sleep*, *36*(7), 1059-1068.
- Aschenbrenner, S., Tucha, O., & Lange, K. W. (2000). *Regensburger wortflüssigkeitstest: RWT*. Hogrefe, Verlag für Psychologie.
- Aserinsky, E., & Kleitman, N. (1953). Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep. *Science*, *118*(3062), 273-274.
- Atienza, M., & Cantero, J. L. (2008). Modulatory effects of emotion and sleep on recollection and familiarity. *Journal of sleep research*, *17*(3), 285-294.
- Bacaro, V., Miletic, K., & Crocetti, E. (2024). A meta-analysis of longitudinal studies on the interplay between sleep, mental health, and positive well-being in adolescents. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, *24*(1), 100424.
- Baddeley, A. (2017). *Exploring working memory: Selected works of Alan Baddeley*. Routledge.
- Banks, S., & Dinges, D. F. (2007). Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *Journal of clinical sleep medicine*, *3*(5), 519-528.
- Baranwal, N., Phoebe, K. Y., & Siegel, N. S. (2023). Sleep physiology, pathophysiology, and sleep hygiene. *Progress in cardiovascular diseases*, *77*, 59-69.
- Basheer, R., Strecker, R. E., Thakkar, M. M., & McCarley, R. W. (2004). Adenosine and sleep-wake regulation. *Progress in neurobiology*, *73*(6), 379-396.
- Basner, M., & Dinges, D. F. (2011). Maximizing Sensitivity of the Psychomotor Vigilance Test (PVT) to Sleep Loss. *Sleep*, *34*(5), 581-591. <https://doi.org/10.1093/sleep/34.5.581>
- Bastian, L., Samanta, A., Ribeiro de Paula, D., Weber, F. D., Schoenfeld, R., Dresler, M., & Genzel, L. (2022). Spindle-slow oscillation coupling correlates with memory performance and connectivity changes in a hippocampal network after sleep. *Human Brain Mapping*, *43*(13), 3923-3943.
- Berger, R. J., & Phillips, N. H. (1995). Energy conservation and sleep. *Behavioural brain research*, *69*(1-2), 65-73.
- Besedovsky, L., Lange, T., & Haack, M. (2019). The sleep-immune crosstalk in health and disease. *Physiological reviews*.
- Borbély, A. (1984). *Das Geheimnis des Schlafs*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.

- Borbély, A. A., & Achermann, P. (1992). Concepts and models of sleep regulation: an overview. *Journal of sleep research*, 1(2), 63-79.
- Born, J., & Gais, S. (2000). REM sleep deprivation: the wrong paradigm leading to wrong conclusions. *Behavioral and brain sciences*, 23(6), 912-913.
- Born, J., Rasch, B., & Gais, S. (2006). Sleep to remember. *The Neuroscientist*, 12(5), 410-424.
- Boyce, R., Williams, S., & Adamantidis, A. (2017). REM sleep and memory. *Curr Opin Neurobiol*, 44, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2017.05.001>
- Cajochen, C. (2022). Schlafregulation. In *Enzyklopädie der Schlafmedizin* (pp. 1-8). Springer.
- Chieffi, S., Carotenuto, M., Monda, V., Valenzano, A., Villano, I., Precenzano, F., Tafuri, D., Salerno, M., Filippi, N., & Nuccio, F. (2017). Orexin system: the key for a healthy life. *Frontiers in physiology*, 8, 357.
- Chokroverty, S. (2010). Overview of sleep & sleep disorders. *Indian Journal of Medical Research*, 131(2), 126-140.
- D'Esposito, M. (2007). From cognitive to neural models of working memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1481), 761-772.
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 114-126.
- Diekelmann, S., Wilhelm, I., & Born, J. (2009). The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation. *Sleep medicine reviews*, 13(5), 309-321.
- Dinges, D. F., & Powell, J. W. (1985). Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior research methods, instruments, & computers*, 17(6), 652-655.
- Dresler, M., Spoormaker, V., Beitinger, P., Czisch, M., Kimura, M., Steiger, A., & Holsboer, F. (2014). Neuroscience-driven discovery and development of sleep therapeutics. *Pharmacology & therapeutics*, 141(3), 300-334.
- Drummond, S. P., Brown, G. G., Gillin, J. C., Stricker, J. L., Wong, E. C., & Buxton, R. B. (2000). Altered brain response to verbal learning following sleep deprivation. *Nature*, 403(6770), 655-657.
- Dudai, Y. (2004). The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Annu. Rev. Psychol.*, 55(1), 51-86.
- Erlacher, D., & Erlacher, D. (2019). Zirkadianik und Schlafregulation. *Sport und Schlaf: Angewandte Schlafforschung für die Sportwissenschaft*, 29-41.
- Feriante, J., & Singh, S. (2020). REM Rebound Effect.
- Ferrara, M., De Gennaro, L., Casagrande, M., & Bertini, M. (2000). Selective slow-wave sleep deprivation and time-of-night effects on cognitive performance upon awakening. *Psychophysiology*, 37(4), 440-446.
- Ferrara, M., De Gennaro, L., Curcio, G., Cristiani, R., Corvasce, C., & Bertini, M. (2002). Regional differences of the human sleep electroencephalogram in response to selective slow-wave sleep deprivation. *Cerebral Cortex*, 12(7), 737-748.
- Fischer, S., Hallschmid, M., Elsner, A. L., & Born, J. (2002). Sleep forms memory for finger skills. *Proceedings of the national academy of sciences*, 99(18), 11987-11991.
- Fischer, S., Nitschke, M. F., Melchert, U. H., Erdmann, C., & Born, J. (2005). Motor memory consolidation in sleep shapes more effective neuronal representations. *Journal of Neuroscience*, 25(49), 11248-11255.

- Fogel, S. M., Smith, C. T., & Cote, K. A. (2007). Dissociable learning-dependent changes in REM and non-REM sleep in declarative and procedural memory systems. *Behavioural brain research, 180*(1), 48-61.
- Gais, S., Albouy, G., Boly, M., Dang-Vu, T. T., Darsaud, A., Desseilles, M., Rauchs, G., Schabus, M., Sterpenich, V., & Vandewalle, G. (2007). Sleep transforms the cerebral trace of declarative memories. *Proceedings of the national academy of sciences, 104*(47), 18778-18783.
- Gais, S., & Born, J. (2004). Declarative memory consolidation: mechanisms acting during human sleep. *Learning & memory, 11*(6), 679-685.
- Gais, S., Lucas, B., & Born, J. (2006). Sleep after learning aids memory recall. *Learning & memory, 13*(3), 259-262.
- Gais, S., Mölle, M., Helms, K., & Born, J. (2002). Learning-dependent increases in sleep spindle density. *Journal of Neuroscience, 22*(15), 6830-6834.
- Genzel, L., Kroes, M. C., Dresler, M., & Battaglia, F. P. (2014). Light sleep versus slow wave sleep in memory consolidation: a question of global versus local processes? *Trends in neurosciences, 37*(1), 10-19.
- Giuditta, A., Ambrosini, M. V., Montagnese, P., Mandile, P., Cotugno, M., Zucconi, G. G., & Vescia, S. (1995). The sequential hypothesis of the function of sleep. *Behavioural brain research, 69*(1-2), 157-166.
- Görtelmeyer, R. (2011). SF-A/R und SF-B/R: Schlafragebogen A und B.
- Gottesmann, C. (2002). GABA mechanisms and sleep. *Neuroscience, 111*(2), 231-239.
- Gottlieb, D. J., Redline, S., Nieto, F. J., Baldwin, C. M., Newman, A. B., Resnick, H. E., & Punjabi, N. M. (2006). Association of usual sleep duration with hypertension: the Sleep Heart Health Study. *Sleep, 29*(8), 1009-1014.
- Groch, S., Zinke, K., Wilhelm, I., & Born, J. (2015). Dissociating the contributions of slow-wave sleep and rapid eye movement sleep to emotional item and source memory. *Neurobiol Learn Mem, 122*, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2014.08.013>
- Hallschmid, M., & Born, J. (2006). Der Schlaf der Vernunft gebiert Wissen. *MH Wiegand, von F. Sprei, H. Förstl (Hg.). Schlaf und Traum. Neurobiologie, Psychologie, Therapie, 75-106.*
- Herzog, N., Jauch-Chara, K., Hyzy, F., Richter, A., Friedrich, A., Benedict, C., & Oltmanns, K. M. (2013). Selective slow wave sleep but not rapid eye movement sleep suppression impairs morning glucose tolerance in healthy men. *Psychoneuroendocrinology, 38*(10), 2075-2082.
- Hirshkowitz, M., Whiton, K., Albert, S. M., Alessi, C., Bruni, O., DonCarlos, L., Hazen, N., Herman, J., Katz, E. S., & Kheirandish-Gozal, L. (2015). National Sleep Foundation's sleep time duration recommendations: methodology and results summary. *Sleep health, 1*(1), 40-43.
- Hoddes, E., Zarcone, V., Smythe, H., Phillips, R., & Dement, W. C. (1973). Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology, 10*(4), 431-436. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1973.tb00801.x>
- Huang, Z.-L., Urade, Y., & Hayaishi, O. (2011). The role of adenosine in the regulation of sleep. *Current topics in medicinal chemistry, 11*(8), 1047-1057.
- Jacobs, W. J., Payne, J. D., Britton, W. B., & Nadel, L. (2004). *The Biopsychology of Trauma and Memory.*
- Jenkins, J. G., & Dallenbach, K. M. (1924). Obliviscence during sleep and waking. *The American Journal of Psychology, 35*(4), 605-612.

- Kavanau, J. (1997). Memory, sleep and the evolution of mechanisms of synaptic efficacy maintenance. *Neuroscience*, 79(1), 7-44.
- Kawada, T. (2021). Sleep status and hypertension: a risk assessment. *Sleep and Breathing*, 25(2), 1167-1168.
- Killgore, W. D. (2010). Effects of sleep deprivation on cognition. *Progress in brain research*, 185, 105-129.
- Knutson, K. L., Spiegel, K., Penev, P., & Van Cauter, E. (2007). The metabolic consequences of sleep deprivation. *Sleep medicine reviews*, 11(3), 163-178.
- Krueger, J. M., Frank, M. G., Wisor, J. P., & Roy, S. (2016). Sleep function: Toward elucidating an enigma. *Sleep medicine reviews*, 28, 46-54.
- Kumar, V. M. (2008). Sleep and sleep disorders. *Indian Journal of Chest Diseases and Allied Sciences*, 50(1), 129.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. *NIMH Center for the Study of Emotion and Attention*, 1(39-58), 3.
- Lange, T., Dimitrov, S., & Born, J. (2010). Effects of sleep and circadian rhythm on the human immune system. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1193(1), 48-59.
- Lechner, H. A., Squire, L. R., & Byrne, J. H. (1999). 100 years of consolidation—remembering Müller and Pilzecker. *Learning & memory*, 6(2), 77-87.
- Lim, J., Choo, W.-C., & Chee, M. W. (2007). Reproducibility of changes in behaviour and fMRI activation associated with sleep deprivation in a working memory task. *Sleep*, 30(1), 61-70.
- Lim, J., & Dinges, D. F. (2008). Sleep deprivation and vigilant attention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1129(1), 305-322.
- MacDonald, K. J., & Cote, K. A. (2021). Contributions of post-learning REM and NREM sleep to memory retrieval. *Sleep medicine reviews*, 59, 101453.
- Malhotra, R. K., & Avidan, A. Y. (2023). Sleep Stage Scoring. In *Atlas of Sleep Medicine* (pp. 125-163). Springer.
- Maquet, P., Péters, J.-M., Aerts, J., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Franck, G. (1996). Functional neuroanatomy of human rapid-eye-movement sleep and dreaming. *Nature*, 383(6596), 163-166.
- Maquet, P., Smith, C., & Stickgold, R. (2003). *Sleep and brain plasticity*. OUP Oxford.
- Mendoza-Alvarez, M., Balthasar, Y., Verbraecken, J., Claes, L., Van Someren, E., van Marle, H. J., Vandekerckhove, M., & De Picker, L. (2025). Systematic review: REM sleep, dysphoric dreams and nightmares as transdiagnostic features of psychiatric disorders with emotion dysregulation-Clinical implications. *Sleep medicine*, 127, 1-15.
- Meng, L., Zheng, Y., & Hui, R. (2013). The relationship of sleep duration and insomnia to risk of hypertension incidence: a meta-analysis of prospective cohort studies. *Hypertension Research*, 36(11), 985-995.
- Molz, C., Schulze, R., Schroeders, U., & Wilhelm, O. (2010). Wechsler Intelligenztest für Erwachsene WIE. Deutschsprachige Bearbeitung und Adaptation des WAIS-III von David Wechsler. *Psychol. Rundsch*, 61, 229-230.
- Müller, G. E., & Pilzecker, A. (1900). *Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Gedächtnis* (Vol. 1). JA Barth.
- Oswald, I. (1980). Sleep as a restorative process: human clues. *Progress in brain research*, 53, 279-288.

- Paré, D., Collins, D. R., & Pelletier, J. G. (2002). Amygdala oscillations and the consolidation of emotional memories. *Trends in cognitive sciences*, 6(7), 306-314.
- Patel, A. K., Reddy, V., Shumway, K. R., & Araujo, J. F. (2022). Physiology, sleep stages. In *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing.
- Payne, J. D., Stickgold, R., Swanberg, K., & Kensinger, E. A. (2008). Sleep preferentially enhances memory for emotional components of scenes. *Psychological science*, 19(8), 781-788.
- 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.
- Peirano, P. D., & Algarín, C. R. (2007). Sleep in brain development. *Biological research*, 40(4), 471-478.
- Penzel, T., Peter, J. H., Peter, H., Becker, H. F., Fietze, I., Fischer, J., Mayer, G., Podszus, T., Raschke, F., Riemann, D., Schäfer, T., & Sitter, H. (2005). Themenheft 27 "Schlafstörungen". In (pp. 49): Robert Koch-Institut.
- 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.
- Plihal, W., & Born, J. (1999). Effects of early and late nocturnal sleep on priming and spatial memory. *Psychophysiology*, 36(5), 571-582.
- Plog, B. A., & Nedergaard, M. (2018). The glymphatic system in central nervous system health and disease: past, present, and future. *Annual Review of Pathology: Mechanisms of Disease*, 13(1), 379-394.
- Porkka-Heiskanen, T. (1999). Adenosine in sleep and wakefulness. *Annals of medicine*, 31(2), 125-129.
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological reviews*.
- Raschke, F., & Fischer, J. (1997). "Arousal" in sleep medicine. *Somnologie-Zeitschrift für Schlafforschung und Schlafmedizin*, 1, 59-64.
- Rattenborg, N. C., Lesku, J. A., Martinez-Gonzalez, D., & Lima, S. L. (2007). The non-trivial functions of sleep. *Sleep medicine reviews*, 11(5), 405-409.
- Recher, D., Rohde, J., Da Poian, G., Henninger, M., Brogli, L., Huber, R., Karlen, W., Lustenberger, C., & Kleim, B. (2024). Targeted memory reactivation during sleep improves emotional memory modulation following imagery rescripting. *Translational Psychiatry*, 14(1), 490.
- Riemann, D., Berger, M., & Voderholzer, U. (2001). Sleep and depression—results from psychobiological studies: an overview. *Biological psychology*, 57(1-3), 67-103.
- Rodenbeck, A. (2011). Biologische Grundlagen des Schlafens und Wachens. *Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz*, 54(12), 1270-1275.
- Rodenbeck, A. (2013). Manual der American Academy of Sleep Medicine. *Somnologie-Schlafforschung und Schlafmedizin*, 17(2), 122-130.
- Roenneberg, T., Kuehne, T., Juda, M., Kantermann, T., Allebrandt, K., Gordijn, M., & Mrosovsky, M. (2007). Epidemiology of the human circadian clock. *Sleep medicine reviews*, 11(6), 429-438.
- Saper, C. B., Scammell, T. E., & Lu, J. (2005). Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms. *Nature*, 437(7063), 1257-1263.
- Schipper, S. B., Van Veen, M. M., Elders, P. J., van Straten, A., Van Der Werf, Y. D., Knutson, K. L., & Rutters, F. (2021). Sleep disorders in people with type 2 diabetes and associated health outcomes: a review of the literature. *Diabetologia*, 64(11), 2367-2377.

- Siclari, F., Bernardi, G., Cataldi, J., & Tononi, G. (2018). Dreaming in NREM sleep: a high-density EEG study of slow waves and spindles. *Journal of Neuroscience*, *38*(43), 9175-9185.
- Siegel, J. M. (2005). Clues to the functions of mammalian sleep. *Nature*, *437*(7063), 1264-1271. <https://doi.org/10.1038/nature04285>
- Siegel, J. M. (2022). Sleep function: an evolutionary perspective. *The Lancet Neurology*, *21*(10), 937-946.
- Smith, C. (1993). REM sleep and learning: Some recent findings.
- Smith, C. T., Aubrey, J. B., & Peters, K. R. (2004). Different roles for REM and stage 2 sleep in motor learning: A proposed model. *Psychologica Belgica*, *44*, 81-104.
- 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.
- Stanny, C. J., & Johnson, T. C. (2000). Effects of stress induced by a simulated shooting on recall by police and citizen witnesses. *American Journal of Psychology*, *113*(3), 359-386.
- Steyer, R., Schwenkmezger, P., Notz, P., & Eid, M. (1994). Testtheoretische Analysen des Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogen (MDBF). *Diagnostica*.
- Stickgold, R. (2009). How do I remember? Let me count the ways. *Sleep medicine reviews*, *13*(5), 305-308.
- Stickgold, R., Whidbee, D., Schirmer, B., Patel, V., & Hobson, J. A. (2000). Visual discrimination task improvement: A multi-step process occurring during sleep. *Journal of cognitive neuroscience*, *12*(2), 246-254.
- Tempesta, D., Succi, V., De Gennaro, L., & Ferrara, M. (2018). Sleep and emotional processing. *Sleep medicine reviews*, *40*, 183-195.
- Ukraitseva, Y. V., Liaukovich, K., Saltykov, K., Belov, D., & Nizhnik, A. (2020). Selective slow-wave sleep suppression affects glucose tolerance and melatonin secretion. The role of sleep architecture. *Sleep medicine*, *67*, 171-183.
- Van Cauter, E., Spiegel, K., Tasali, E., & Leproult, R. (2008). Metabolic consequences of sleep and sleep loss. *Sleep medicine*, *9*, S23-S28.
- Van Dongen, P., Baynard, M. D., Maislin, G., & Dinges, D. F. (2004). Systematic interindividual differences in neurobehavioral impairment from sleep loss: evidence of trait-like differential vulnerability. *Sleep*, *27*(3), 423-433.
- Vogel, G. W. (1983). Evidence for REM sleep deprivation as the mechanism of action of antidepressant drugs. *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*, *7*(2-3), 343-349.
- Wagner, U., Gais, S., & Born, J. (2001). Emotional memory formation is enhanced across sleep intervals with high amounts of rapid eye movement sleep. *Learn Mem*, *8*(2), 112-119. <https://doi.org/10.1101/lm.36801>
- 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.
- Walker, M. P., Brakefield, T., Morgan, A., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2002). Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning. *Neuron*, *35*(1), 205-211.
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2004). Sleep-dependent learning and memory consolidation. *Neuron*, *44*(1), 121-133.
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annu. Rev. Psychol.*, *57*(1), 139-166.

- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2010). Overnight alchemy: sleep-dependent memory evolution. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(3), 218-218.
- Walker, M. P., & van Der Helm, E. (2009). Overnight therapy? The role of sleep in emotional brain processing. *Psychological bulletin*, *135*(5), 731.
- Westerberg, C. E., Florczak, S. M., Weintraub, S., Mesulam, M.-M., Marshall, L., Zee, P. C., & Paller, K. A. (2015). Memory improvement via slow-oscillatory stimulation during sleep in older adults. *Neurobiology of aging*, *36*(9), 2577-2586.
- Yuksel, C., Denis, D., Coleman, J., Ren, B., Oh, A., Cox, R., Morgan, A., Sato, E., & Stickgold, R. (2025). Both slow wave and rapid eye movement sleep contribute to emotional memory consolidation. *Communications Biology*, *8*(1), 485.
- Zielinski, M. R., McKenna, J. T., & McCarley, R. W. (2016). Functions and mechanisms of sleep. *AIMS neuroscience*, *3*(1), 67.

7. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie unter Betreuung von Prof. Dr. Manfred Hallschmid durchgeführt. Die Konzeption der Studie erfolgte durch Prof. Dr. Hallschmid (Doktorvater) und Lisa-Marie Bastian, MSc., (Betreuerin). Die Versuche wurden nach Einarbeitung durch Lisa-Marie Bastian in Zusammenarbeit mit Johannes Ballmann und Cédric Hillert sowie mit Unterstützung durch studentische Hilfskräfte durchgeführt. Die Auswertung der polysomnographischen Aufzeichnungen wurde in Zusammenarbeit mit Cédric Hillert und Johannes Ballmann durchgeführt. Die statistische Analyse der Gedächtnis- und Kontrollaufgaben erfolgte in Zusammenarbeit mit Lisa-Marie Bastian.

Für die grammatikalische Durchsicht wurden KI-gestützte Textbearbeitungstools verwendet, der inhaltliche Aufbau erfolgte eigenständig. Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Pliezhausen, den 31.08.2025

Katharina Anna-Sophie Schag

8. Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Hallschmid für das Überlassen des für mich weiterhin sehr interessanten und faszinierenden Themas und für die gute Betreuung dieser umfassenden Studie.

Ein besonders großes Dankeschön geht an Lisa-Marie Bastian, die uns bei der Vorbereitung und Durchführung der Studie immer zur Seite stand und Tag und Nacht erreichbar war. Auch nach der Datenerhebung hatte sie für alle Fragen ein offenes Ohr. Vielen Dank für deine unfassbare Geduld!

Eine so umfangreiche Studie ist ohne ein funktionierendes Team nicht möglich. Daher möchte ich mich bei meinen beiden Teamkollegen Johannes Ballmann und Cédric Hillert für die schöne und unkomplizierte Zusammenarbeit bedanken. Ebenso geht mein Dank an die studentischen Hilfskräfte, die sich schnell in unsere Arbeitsabläufe eingefunden haben und eine große Arbeitserleichterung waren.

Ein weiteres Dankeschön geht auch an die Probanden, die sich bereit erklärten, für diese Arbeit auf ihren kostbaren und, wie nach dem Lesen der Arbeit nun alle wissen dürften, auch unfassbar wichtigen Schlaf bzw. sehr bedeutsame Abschnitte davon zu verzichten.

Mein größtes Dankeschön geht allerdings an meine Familie und Freunde, die sich vermutlich nach jahrelangem Gejammer meinerseits nichts sehnlicher als die Abgabe dieser Arbeit herbeiwünschen. Danke, dass ihr mir geduldig zugehört und mir geholfen habt ans Ziel zu kommen. Danke, dass ihr euch die Zeit genommen habt, um Korrektur zu lesen.

Vielen Dank an Alle!

9. Anhang

Die Abrufleistung

Tabelle 4: *Abrufleistung bei REM-Deprivation*

Deprivation	Sitzung	Kategorie	Emotion	t-Wert	p-Wert	Mittelwert
REM	delayed	food	neutral	2.30	0.039	39.61 ± 6.15
REM	delayed	food	positiv	1.92	0.0777	35.71 ± 5.41
REM	delayed	non-food	neutral	3.57	0.0034	42.21 ± 4.66
REM	delayed	non-food	positiv	2.14	0.0516	33.77 ± 3.95
REM	immediate	food	neutral	10.00	2 ⁻⁷	70.13 ± 4.36
REM	immediate	food	positiv	8.73	9 ⁻⁷	69.48 ± 4.92
REM	immediate	non-food	neutral	8.75	8 ⁻⁷	75.33 ± 5.56
REM	immediate	non-food	positiv	7.75	3 ⁻⁶	65.58 ± 6.15

Mittelwert ± Standardfehler aller Probanden (N=21) während der REM-Deprivation in der ersten (immediate) und zweiten (delayed) Abrufphase für die Kategorien „Lebensmittel“ (food) und „Nicht-Lebensmittel“ (non-food).

Tabelle 5: Abrufleistung nach SWS-Deprivation

Deprivation	Sitzung	Kategorie	Emotion	t-Wert	p-Wert	Mittelwert
SWS	delayed	food	neutral	3.06	0.01	43.64 ± 6.10
SWS	delayed	food	positiv	1.67	0.12	35.15 ± 6.07
SWS	delayed	non-food	neutral	2.10	0.06	36.97 ± 5.71
SWS	delayed	non-food	positiv	1.37	0.19	33.94 ± 6.55
SWS	immediate	food	neutral	5.58	9 ⁻⁵	65.58 ± 7.02
SWS	immediate	food	positiv	5.87	6 ⁻⁵	66.23 ± 6.79
SWS	immediate	non-food	neutral	6.20	3 ⁻⁵	69.48 ± 6.93
SWS	immediate	non-food	positiv	8.05	2 ⁻⁶	69.48 ± 5.34

Mittelwerte ± Standardfehler aller Probanden (N=21) während der SWS-Deprivation in der ersten (immediate) und zweiten (delayed) Abrufphase für die Kategorien „Lebensmittel“ (food) und „Nicht- Lebensmittel“ (non-food).

Die Erkennungsleistung

Tabelle 6: *Erkennungsleistung nach REM-Deprivation*

Deprivation	Sitzung	Kategorie	Emotion	t-Wert	p-Wert	Mittelwert
REM	delayed	food	neutral	8.91	7 ⁻⁷	80.20 ± 3.28
REM	delayed	food	positiv	8.93	7 ⁻⁷	80.52 ± 3.30
REM	delayed	non-food	neutral	16.88	3 ⁻¹⁰	90.58 ± 2.32
REM	delayed	non-food	positiv	11.25	5 ⁻⁸	83.77 ± 2.90
REM	immediate	food	neutral	20.50	3 ⁻¹¹	94.16 ± 2.08
REM	immediate	food	positiv	28.54	4 ⁻¹³	94.81 ± 1.52
REM	immediate	non-food	neutral	94.78	7 ⁻²⁰	99.03 ± 0.50
REM	immediate	non-food	positiv	20.16	3 ⁻¹¹	95.53 ± 2.04

Mittelwerte ± Standardfehler aller Probanden (N=21) während der REM-Deprivation in der ersten (immediate) und zweiten (delayed) Abrufphase für die Kategorien „Lebensmittel“ (food) und „Nicht- Lebensmittelbilder“ (non-food).

Tabelle 7: Erkennungsleistung nach SWS-Deprivation

Deprivation	Sitzung	Kategorie	Emotion	t-Wert	p-Wert	Mittelwert
SWS	delayed	food	neutral	21.54	3 ⁻¹²	87.58 ± 1.75
SWS	delayed	food	positiv	11.99	9 ⁻⁹	82.12 ± 2.68
SWS	delayed	non-food	neutral	30.17	4 ⁻¹⁴	89.39 ± 1.31
SWS	delayed	non-food	positiv	15.78	3 ⁻¹⁰	86.36 ± 2.31
SWS	immediate	food	neutral	30.18	2 ⁻¹³	94.16 ± 1.41
SWS	immediate	food	positiv	20.16	3 ⁻¹¹	92.53 ± 2.04
SWS	immediate	non-food	neutral	77.02	1 ⁻¹⁸	98.05 ± 0.60
SWS	immediate	non-food	positiv	52.02	2 ⁻¹⁶	97.08 ± 0.87

Mittelwerte ± Standardfehler aller Probanden (N=21) während der REM-Deprivation in der ersten (immediate) und zweiten (delayed) Abrufphase für die Kategorien „Lebensmittel“ (food) und „Nicht- Lebensmittel“ (non-food).

Bewertungsskala

Tabelle 8: *Bewertungen verschiedener semantischer Dimensionen in Abhängigkeit von Deprivationsarten und Emotionen*

Begriff	Deprivation	Emotion	Mittelwert
Amüsan - ernst	REM	Negativ	2.06 ± 0.33
Amüsan - ernst	REM	Neutral	0.94 ± 0.34
Amüsan - ernst	SWS	Negativ	2.17 ± 0.33
Amüsan - ernst	SWS	Neutral	1.06 ± 0.31
Anschaulich - abstrakt	REM	Negativ	-2.06 ± 0.27
Anschaulich - abstrakt	REM	Neutral	0.00 ± 0.42
Anschaulich - abstrakt	SWS	Negativ	-2.00 ± 0.29
Anschaulich - abstrakt	SWS	Neutral	-0.61 ± 0.49
Bekannt – unbekannt	REM	Negativ	2.11 ± 0.33
Bekannt – unbekannt	REM	Neutral	2.56 ± 0.15
Bekannt – unbekannt	SWS	Negativ	2.00 ± 0.32
Bekannt – unbekannt	SWS	Neutral	1.83 ± 0.40
Harmlos – erschreckend	REM	Negativ	2.22 ± 0.18
Harmlos – erschreckend	REM	Neutral	-2.44 ± 0.23
Harmlos – erschreckend	SWS	Negativ	2.17 ± 0.25

Harmlos – erschreckend	SWS	Neutral	-2.61 ± 0.18
Interessant – uninteressant	REM	Negativ	-1.56 ± 0.28
Interessant – uninteressant	REM	Neutral	1.28 ± 0.43
Interessant – uninteressant	SWS	Negativ	-0.78 ± 0.41
Interessant – uninteressant	SWS	Neutral	1.56 ± 0.42
Langweilig – erregend	REM	Negativ	1.72 ± 0.23
Langweilig – erregend	REM	Neutral	-2.22 ± 0.21
Langweilig – erregend	SWS	Negativ	1.50 ± 0.36
Langweilig – erregend	SWS	Neutral	-1.33 ± 0.45
Neutral – emotional	REM	Negativ	2.11 ± 0.25
Neutral – emotional	REM	Neutral	-2.17 ± 0.36
Neutral – emotional	SWS	Negativ	1.83 ± 0.25
Neutral – emotional	SWS	Neutral	-2.33 ± 0.27
Positiv – negativ	REM	Negativ	2.11 ± 0.27
Positiv – negativ	REM	Neutral	0.56 ± 0.25
Positiv – negativ	SWS	Negativ	2.28 ± 0.30
Positiv – negativ	SWS	Neutral	-0.11 ± 0.25

Schwierig – leicht	REM	Negativ	1.50 ± 0.29
Schwierig – leicht	REM	Neutral	-0.33 ± 0.40
Schwierig – leicht	SWS	Negativ	0.28 ± 0.41
Schwierig – leicht	SWS	Neutral	-0.33 ± 0.44
Verständlich – unverständlich	REM	Negativ	-2.44 ± 0.25
Verständlich – unverständlich	REM	Neutral	0.06 ± 0.41
Verständlich – unverständlich	SWS	Negativ	-2.00 ± 0.40
Verständlich – unverständlich	SWS	Neutral	0.22 ± 0.42
Vertraut – unvertraut	REM	Negativ	1.83 ± 0.34
Vertraut – unvertraut	REM	Neutral	2.06 ± 0.39
Vertraut – unvertraut	SWS	Negativ	2.22 ± 0.30
Vertraut – unvertraut	SWS	Neutral	1.50 ± 0.42
Wichtig – unwichtig	REM	Negativ	-1.06 ± 0.26
Wichtig – unwichtig	REM	Neutral	2.39 ± 0.18
Wichtig – unwichtig	SWS	Negativ	-0.39 ± 0.47
Wichtig – unwichtig	SWS	Neutral	1.28 ± 0.41

Deprivation, Emotion und deren Interaktion

Tabelle 9: Ergebnisse der ANOVA-Analyse für Bewertungsdimensionen in Abhängigkeit von der Deprivation und Emotion

Faktor	MSE	F-Wert	Gesamt- varianz	p-Wert	Kategorie
Deprivation	2.66	0.08	2 ⁻³	8.54	Amüsant – ernst
Emotion	2.55	8.73	1 ⁻¹	10 ⁻² **	Amüsant – ernst
Deprivation:Emotion	0.56	4.31	2 ⁻³³	11.10	Amüsant – ernst
Deprivation	0.92	1.51	8 ⁻³	2.59	Anschaulich – abstrakt
Emotion	2.92	18.30	2 ⁻¹	6 ⁻³ **	Anschaulich – abstrakt
Deprivation:Emotion	0.59	3.40	1 ⁻²	0.91	Anschaulich – abstrakt
Deprivation	1.39	2.25	3 ⁻²	1.67	Bekannt – unbekannt
Emotion	1.55	0.22	3 ⁻³	7.07	Bekannt – unbekannt
Deprivation:Emotion	2.24	0.75	1 ⁻²	4.38	Bekannt – unbekannt
Deprivation	0.96	0.23	4 ⁻³	7.00	Harmlos – erschreckend
Emotion	1.12	357.05	9 ⁻¹	8 ⁻¹² **	Harmlos – erschreckend
Deprivation:Emotion	0.44	0.13	1 ⁻³	7.99	Harmlos – erschreckend
Deprivation	1.66	3.02	3 ⁻²	1.10	Interessant – uninteressant
Emotion	4.48	26.83	4 ⁻¹	8 ⁻⁴ **	Interessant – uninteressant

Deprivation:Emotion	2.42	0.47	6 ⁻³	5.55	Interessant uninteressant	–
Deprivation	2.59	0.77	2 ⁻²	4.31	Langweilig erregend	–
Emotion	1.95	105.60	6 ⁻¹	1 ⁻⁷ **	Langweilig erregend	–
Deprivation:Emotion	1.20	4.62	4 ⁻²	0.51	Langweilig erregend	–
Deprivation	1.27	0.70	9 ⁻³	4.56	Neutral – emotional	
Emotion	2.04	0.02	8 ⁻¹	6 ⁻⁹ **	Neutral – emotional	
Deprivation:Emotion	1.50	0.04	6 ⁻⁴	9.35	Neutral – emotional	
Deprivation	0.45	2.51	1 ⁻²	1.45	Positiv – negativ	
Emotion	1.63	42.91	4 ⁻¹	5 ⁻⁵ **	Positiv – negativ	
Deprivation:Emotion	2.39	1.31	3 ⁻²	2.96	Positiv – negativ	
Deprivation	3.25	2.07	4 ⁻²	1.86	Schwierig – leicht	
Emotion	3.71	7.24	1 ⁻¹	0.17	Schwierig – leicht	
Deprivation:Emotion	1.61	4.19	4 ⁻²	0.62	Schwierig – leicht	
Deprivation	3.12	0.54	10 ⁻³	5.20	Verständlich – unverständlich	–
Emotion	1.26	79.71	4 ⁻¹	9 ⁻⁷ **	Verständlich – unverständlich	–
Deprivation:Emotion	2.14	0.16	2 ⁻³	7.61	Verständlich – unverständlich	–
Deprivation	1.69	0.07	8 ⁻⁴	8.67	Vertraut unvertraut	–

Emotion	2.39	0.47	7 ⁻³	5.52	Vertraut unvertraut	–
Deprivation:Emotion	1.16	3.46	2 ⁻²	0.88	Vertraut unvertraut	–
Deprivation	1.68	0.53	6 ⁻³	5.25	Wichtig unwichtig	–
Emotion	2.11	55.60	4 ⁻¹	1 ⁻⁵ **	Wichtig unwichtig	–
Deprivation:Emotion	1.78	7.99	9 ⁻²	0.13	Wichtig unwichtig	–

Die Tabelle zeigt für die Faktoren „Deprivation“, „Emotion“ und „Interaktion von Deprivation und Emotion“ (Deprivation:Emotion) die verschiedenen Variablen sowie den Mean Squared Error (MSE), den F-Wert, die Gesamtvarianz und den p-Wert. Die p-Werte wurden für Mehrfachvergleiche mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur korrigiert (Alpha = 0,05). Der Numerator Degrees of Freedom liegt für alle Faktoren und Variablen bei 1, der Denominator Degrees of Freedom bei 17. Mit ** sind die hochsignifikanten p-Werte markiert.