

Aus dem Max-Planck-Institut für Psychiatrie, München
Geschäftsführende Direktorin:
Prof. Dr. Dr. med. univ. Elisabeth Binder

Thema:

**Effekte einer intensiven Lernphase auf das Schlaf-EEG
von Gedächtnissportlern und normalen Probanden**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Vorgelegt von
Laurentius Halimsetiawan

aus

Surabaya, Indonesien

Jahr

2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Axel Steiger

Mitberichterstatter: PD Dr. Elisabeth Kaufmann

PD Dr. Daniela Hauer

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Assist. Prof. Dr. rer. nat. Martin Dresler

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard HICKEL

Tag der mündlichen Prüfung: 25.03.2021

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	vii
A. Einleitung.....	9
1. Schlaf	10
1.1. Polysomnographie.....	10
1.2. Neuronale Grundlagen	14
2. Gedächtnis.....	16
2.1. Gedächtnissysteme.....	16
2.2. Vorgang des Lernens	17
2.3. Neuronale Grundlagen	18
2.4. Gedächtnissport	22
3. Zusammenhang von Schlaf und Gedächtnis	25
3.1. Schlaf und deklaratives Gedächtnis	26
3.2. Schlaf und prozedurales Gedächtnis.....	27
B. Eigene Fragestellung	29
C. Material und Methoden.....	31
1. Versuchspersonen	31
2. Versuchsablauf	32
3. Tests	34
3.1. <i>Directed Forgetting</i> Test (Instruiertes Vergessen).....	34
3.2. <i>False Memories</i> Test (Falsche Erinnerung)	35
3.3. <i>Binary Digits</i> Test (Binärziffer).....	36
3.4. 'n-Back' Test	37
3.5. Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter Test (<i>engl. Stories/Numbers/Words</i>)	37
3.6. Personendaten.....	38

3.7. Spielkarten	38
3.8. Andere Tests	39
4. Schlafableitung – Polysomnographie	39
5. Datenanalyse	41
5.1. Auswertung der behavioralen Daten	41
5.2. Visuelle Auswertung der EEG-Daten	42
5.3. Quantitative EEG-Auswertung	42
5.4. Auswertung der Schlafspindeln	43
5.5. Statistische Auswertung	44
D. Ergebnisse	46
1. Behaviorale Daten	46
2. Schlafstadien	48
3. Spektraldaten	50
4. Schlafspindeln	53
E. Diskussion	56
1. Schlaf-EEG in der Lern- und Kontrollbedingung.	56
2. Schlaf-EEG-Vergleich zwischen Gedächtnissportler und Kontrollprobanden.	60
3. Limitationen	64
4. Konklusion	66
F. Zusammenfassung	67
Literaturverzeichnis	70
Anhang	89
Danksagung	101
Eidesstattliche Versicherung	102

Abkürzungsverzeichnis

AMPA	<i>engl. α-amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionic acid</i>
ANOVA	<i>engl. Analysis of Variance</i>
BDI	Beck-Depressions-Inventar
CFT 20-R	<i>Culture Fair Test 20 - Revision / Grundintelligenztest Skala 2 - Revision</i>
CWT	<i>engl. Continuous Wavelet Transform / kontinuierliche Wavelet-Transformation</i>
D-MEQ	Deutsche Übersetzung eines (<i>engl.</i>) <i>Morningness-Eveningness-Questionnaires</i> / Identifizierung der subjektiven zirkadianen Phasenlage
EEG	Elektroenzephalogramm
EHI	<i>engl. Edinburgh Handedness Inventory / Erfassung der Händigkeit</i>
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomographie
GABA	<i>engl. Gamma-aminobutyric acid / Gamma-Amino-Buttersäure</i>
IQ	Intelligenzquotient
LGT-3	Lern- und Gedächtnistest 3
LQ	Lateralitätsquotient
M	Mean
m	männlich
MWT	Mehrfachwahl-Wortschatz-Test
NFC	<i>engl. Need for Cognition / Kognitionsbedürfnis</i>
NMDA	<i>engl. N-Methyl-D-Aspartic acid</i>
NonREM	<i>engl. Non-Rapid Eye Movements</i>
PSQI	Pittsburgh Schlafqualitätsindex
REM	<i>engl. Rapid Eye Movements</i>
RMS	<i>engl. Root Mean Square / Quadratischer Mittelwert</i>

Abkürzungsverzeichnis

S1	Schlafphase 1
S2	Schlafphase 2
S3	Schlafphase 3
S4	Schlafphase 4
SA	Sigma-Aktivität
SD	<i>engl. Standard Deviation</i> / Standard Abweichung
SBSOD	<i>engl. Santa Barbara Sense-of-Direction Scale</i> / Beurteilung von räumlichen Fähigkeiten, Vorlieben und Erfahrungen beim Finden von Wegen
SP	Sigma-Peak
SWS	<i>engl. Slow Wave Sleep</i> / Tiefschlaf (Schlafphasen 3 und 4)
TSST	<i>engl. Trier Social Stress Test</i>
VLPO	Ventrolaterales präoptisches Areal
VVIQ	<i>engl. Vividness of Visual Imagery Questionnaire</i> / Lebendigkeit visueller Vorstellungen
w	weiblich
ZVT	Zahlen-Verbindungs-Test

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Schlafprofil einer Nacht mit zugehörigem Elektroenzephalogramm.....	14
Abbildung 2. Einteilung des Gedächtnissystems	17
Abbildung 3. Randomisiertes Crossover-Design	32
Abbildung 4. Chronologischer Versuchsablauf	34
Abbildung 5. Elektrodenpositionierung eines EOGs (Elektrookulogramm), EMGs (Elektromyogramm) und 32-Kanal-EEGs (Elektroenzephalogramm)	40
Abbildung 6. Vereinfachte Elektrodenpositionierung für das Polysomnogramm.....	41
Abbildung 7. Vergleich der Leistungen von Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden in den Tests Spielkarten und Personendaten	47
Abbildung 8. Vergleich der Leistungen von Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden in den Tests <i>Directed Forgetting</i> und <i>False Memories</i>	47
Abbildung 9. Kontrollprobanden: Die Schlafstadien vor und nach den intensiven Lernaufgaben	49
Abbildung 10. Gedächtnissportler: Die Schlafstadien vor und nach den intensiven Lernaufgaben	49
Abbildung 11. Der Vergleich zwischen Kontrollprobanden und Gedächtnissportler: Die Schlafstadien in der Kontrollnacht.....	50
Abbildung 12. Kontrollprobanden: Die Menge von Delta- und Sigma-Wellen vor und nach den intensiven Lernaufgaben	51
Abbildung 13. Gedächtnissportler: Die Menge von Delta- und Sigma-Wellen vor und nach den intensiven Lernaufgaben	52
Abbildung 14. Der Vergleich zwischen Kontrollprobanden und Gedächtnissportler: Die Menge von Delta- und Sigma-Wellen in der Kontrollnacht.....	52
Abbildung 15. Kontrollprobanden: Die absolute Spindelzahl und Spindeldichte vor und nach den intensiven Lernaufgaben	54
Abbildung 16. Gedächtnissportler: Die absolute Spindelzahl und Spindeldichte vor und nach den intensiven Lernaufgaben	54

Abbildung 17. Der Vergleich zwischen Kontrollprobanden und Gedächtnissportler: Die absolute Spindelzahl und Spindeldichte in der Kontrollnacht.....	55
Abbildung 18. Auflistung von erinnerten und vergessenen Wörter	89
Abbildung 19. Fragebogen von erinnerten und vergessenen Wörter. Teil 1/2.....	90
Abbildung 20. Fragebogen von erinnerten und vergessenen Wörter. Teil 2/2.....	91
Abbildung 21. Fragebogen zur falschen Erinnerung. Seite 1/2.....	92
Abbildung 22. Fragebogen zur falschen Erinnerung. Seite 2/2.....	93
Abbildung 23. Fragebogen zur Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter. Teil 1/3: Kurzgeschichten.....	94
Abbildung 24. Fragebogen zur Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter. Teil 2/3: Zahlen....	95
Abbildung 25. Fragebogen zur Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter. Teil 3/3: Wörter	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Daten von Versuchsgruppen.....	31
Tabelle 2. Behaviorale Daten	46
Tabelle 3. Schlafstadien	48
Tabelle 4. Spektraldaten.....	51
Tabelle 5. Schlafspindelaten.....	53

A. Einleitung

Ein Drittel des Lebens verbringt man im Schlaf. Dabei dient der Schlaf nicht nur zur Erholung, Reparatur oder Energieersparnis (Born und Rasch 2004), sondern auch als wichtiger Zustand, der die Gedächtniskonsolidierung unterstützt. Über den Zusammenhang von Schlaf und Gedächtnisbildung wurde in den vergangenen Jahre vermehrt geforscht (Übersicht: Rasch und Born 2013).

Das Gedächtnis ist definiert als die Fähigkeit, Informationen aufzunehmen und später wieder abzurufen. Es ist die wesentliche Bedingung dafür, dass einzelne Erinnerungen und Erlebnismomente einer Person verknüpft werden können (Myers und Wilson 2014). Ohne Gedächtnis ist ein normales Leben nicht vorstellbar.

Die faszinierende Fähigkeit, viele verschiedene Informationen zu speichern, ist bei sog. Gedächtnissportlern besonders stark ausgeprägt. Es wird diskutiert, inwiefern diese außergewöhnliche Memorierleistung von Gedächtnissportlern angeboren ist. Aktuellere Studien bestätigen, dass sich allenfalls diffizile anatomische Unterschiede zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden finden lassen (Dresler, Shirer et al. 2017; Müller, Konrad et al. 2018). Verschiedene Studien belegen jedoch, dass die Memorierleistung durch Gedächtnistraining oder bestimmten Denkstrategien bzw. Mnemotechniken verbessert werden kann. In einer Studie zeigten Ericsson, Chase (1982) und auch Ericsson, Chase et al. (1980), dass normale Studenten nach einem umfangreichen Gedächtnistraining ähnlich außergewöhnliche Leistungen wie Gedächtnissportler liefern konnten. Außerdem zeigten Maguire et al. (2003) mit Hilfe einer fMRT-Untersuchung, dass es mit der Benutzung von Mnemotechniken funktionelle, nicht aber anatomische Unterschiede zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden gab. Dabei nahmen 8 Gedächtnissportler teil, die zu den Besten bei der Gedächtnisweltmeisterschaft gehören. Ericsson (2003) erwähnte, dass es eher unwahrscheinlich ist, genügend weltklassige Gedächtnissportler zwecks der Gedächtnisforschung rekrutieren zu können. Durch die Zusammenarbeit mit dem Gedächtnissportverein 'MemoryXL' konnten im Rahmen dieser Studie jedoch insgesamt 16 Gedächtnissportler, die zu den besten 50 der Weltrangliste gehörten, rekrutiert werden.

Während viele wissenschaftliche Studien sich mit Gedächtnisstörungen, z.B. bei Alzheimer-Patienten, beschäftigen, stehen in der vorliegenden Studie die

außergewöhnliche Fähigkeit von Gedächtnissportlern und deren Effekte auf die Schlafphysiologie im Vordergrund. Zwar gibt es viele Belege für die positive Wirkung von Schlaf auf die Gedächtniskonsolidierung (Übersicht: Rasch und Born 2013), umgekehrt sind die Auswirkungen intensiver Lernleistungen auf dem Schlaf sowie der Einfluss individueller Unterschiede (z.B. die kognitiven Fähigkeiten) auf den Zusammenhang zwischen Schlaf und Gedächtnis kaum erforscht.

1. Schlaf

Schlaf ist definiert als ein schnell reversibler Zustand reduzierter Antwortbereitschaft auf Umgebungsreize und allgemein verminderter Interaktionen mit der Umwelt. Schlaf ist ein physiologischer Vorgang, in dem neurale Mechanismen in voraussagbaren Zyklen aktiviert werden, die mit charakteristischen neurovegetativen und psychophysischen Phänomenen assoziiert sind, und die den Schlaf grundlegend vom Zustand des Komas unterscheiden (Pape 2010b). Die Tatsache, dass der Schlaf als Zustand aktiv durch das Gehirn selbst und zugunsten dessen gesteuert wird, wurde erst im zwanzigsten Jahrhundert erkannt (Hobson 1990).

1.1. Polysomnographie

Schlaf ist kein passiver, sondern ein aktiver Zustand des Gehirns, der aber aufgrund der schwachen neuronalen Gehirnaktivitäten mit dem Wach-Zustand nicht vergleichbar ist (Kumar 2010). Diese Aktivitäten werden durch spezifische Muster im Elektroenzephalogramm (EEG, Abb. 1) angezeigt.

Mit Hilfe einer Polysomnographie, bestehend aus Elektroenzephalogramm (EEG), Elektrokulogramm (EOG) sowie Elektromyogramm (EMG) werden die Schlafstadien ermittelt. Dadurch lässt sich der Schlaf in NonREM-Schlaf (*engl. Non Rapid Eye Movement*) und REM-Schlaf (*engl. Rapid Eye Movement*) einteilen. Die Namensgebung dieser Schlafphase stammt aus den typischen Augenbewegungen und Muskelaktivitäten, die im EOG und EMG beobachtet werden können. Der NonREM-Schlaf wird je nach Schlaftiefe in Schlafstadien 1 – 4 unterteilt. Während

die Schlafstadien 1 und 2 zum Leichtschlaf gehören, werden die Schlafstadien 3 und 4 zum Tiefschlaf bzw. SWS (*engl. Slow Wave Sleep*) zusammengefasst (Rechtschaffen und Kales 1968).

Beim Menschen werden fünf grundlegende EEG-Zustände in Abhängigkeit von der Frequenz (in Hertz, Hz) der auftretenden EEG-Wellen definiert: Die Alpha (α)-Welle mit 8 – 12 Hz, Beta (β)-Welle mit 12 – 30 Hz, Gamma (γ)-Welle mit über 30 Hz, Theta (θ)-Welle mit 4 – 8 Hz und Delta (δ)-Welle mit unter 4 Hz (Pape 2010b). Rechtschaffen und Kales (1968) entwickelten basierend auf diesen EEG-Wellen ein standardisiertes Manual der Auswertung eines Schlaf-EEGs, die die elektrophysiologische Hirnaktivität des Menschen in sechs differenzierte Stadien einteilt. In den meisten englischsprachigen Literatur wird der Ausdruck Schlaf-EEG (*engl. Sleep-EEG*) häufig als Synonym für Polysomnographie gebraucht.

Wachzustand:

Bei diesem Stadium herrscht im EEG vor allem die Alpha-Aktivität und/oder niedergespannte, gemischtfrequente Aktivität. Anders als bei geschlossenen Augen kommen bei geöffneten Augen die Beta-Wellen vor, bei denen der Muskeltonus hoch ist und durchgehend schnelle Augenbewegungen zu beobachten sind (Rechtschaffen und Kales 1968).

NonREM-Schlaf Stadium 1:

Dieses Schlafstadium wird auf eine Aktivität im Bereich von 2 – 7 Hz und Amplituden im Bereich von 50 – 75 μ V beschränkt. Außerdem kommen Vertex-Zacken von 200 μ V in diesem Schlafstadium vor. Dabei dürfen keine K-Komplexe und Schlafspindeln auftreten. Das Schlafstadium 1 ist durch langsame Augenbewegungen gekennzeichnet. Außerdem nehmen die Frequenz der Hirnaktivität und der Muskeltonus mit zunehmender Schlaftiefe langsam ab (Rechtschaffen und Kales 1968). In der Regel ist das Schlafstadium 1 das erste Stadium beim Einschlafen, es kann aber auch später während des Schlafs auftreten.

NonREM-Schlaf Stadium 2:

Das Stadium 2 gehört zusammen mit dem Stadium 1 zu dem leichten Schlaf. Für das Stadium 2 gelten das Auftreten von Schlafspindeln und K-Komplexe als wesentliche Kennzeichen. Rechtschaffen und Kales (1968) folgend soll die Hintergrundaktivität des EEG relativ niederamplitudig und gemischtfrequent sein. Schlafspindeln bestehen aus einer rhythmischen 12 – 14-Hz-Aktivität, die ein typisches spindelförmiges Aussehen hat. Im tieferen Schlafstadium 2 und im Schlafstadium 3 sind eine Frequenzabnahme auf 10 – 12 Hz zu beobachten (Hoppe, 2011). Schlafspindeln dienen vermutlich als schlafbewahrende Verarbeitungsmechanismen externer Sinnesreize (Yamadori 1971; Cote, Epps et al. 2000). In den vergangenen Jahren wird jedoch auch zunehmend eine Beteiligung an der Gedächtniskonsolidierung diskutiert (Clemens, Fabo et al. 2005; Fogel, Nader et al. 2007; Peters, Ray et al. 2008; Fogel, Smith et al. 2009; Genzel, Kroes et al. 2014; Übersicht: Fogel und Smith 2011). K-Komplexe weisen eine diphasische Morphologie mit einer gut abgrenzbaren negativen scharfen Welle auf, auf die unmittelbar eine positive Komponente folgt, wobei Spindeln der langsamen Welle aufgelagert sein können. Diese Komplexe haben eine Dauer von über 0,5 s und eine Amplitude bis über 200 μ V (Hoppe 2011). Ob K-Komplexe ebenfalls schlafbewahrende Reaktionen auf äußere Stimuli wie z.B. akustische Reize oder einfach nur passive Marker einer bestimmten Schlaftiefe sind oder möglicherweise sogar zur Informationsverarbeitung während des Schlafes beitragen, steht noch zur Diskussion (Roth, Shaw et al. 1956; Halász, Pál et al. 1985; Übersicht: Colrain 2005).

NonREM-Schlaf Stadium 3:

Dieses Stadium ist der Anfang der Tiefschlafphase. Definitionsgemäß zeigt dieses Schlafstadium während einer Epoche mindestens 20 %, aber höchstens 50 % Delta-Wellen-Aktivität mit Amplituden über 75 μ V. Die Delta-Welle ist durch eine Aktivität mit einer Frequenz von 2 Hz oder weniger gekennzeichnet. Schlafspindeln können in diesem Stadium vorkommen, können aber auch ausbleiben (Rechtschaffen und Kales 1968).

NonREM-Schlaf Stadium 4:

Bei einem Delta-Wellen-Anteil von über 50 % einer Epoche wird dieses als NonREM-Schlaf Stadium 4 definiert. Schlafspindeln können in diesem Stadium auch vorkommen. Augenbewegungen und Muskeltonus werden kaum erkennbar. Das Stadium 3 und 4 ergeben zusammen den Tiefschlaf bzw. SWS (Rechtschaffen und Kales 1968).

REM-Schlaf:

Der REM-Schlaf ist definiert durch das Auftreten von niedergespannten und gemischtrequenten EEG-Aktivitäten, die dem Schlafstadium 1 ähneln. Von diesen unterscheidet es sich durch eine Muskelatonie und episodischen schnellen Augenbewegungen, die ihm seinen Namen (*Rapid Eye Movement*) verleihen (Rechtschaffen und Kales 1968; Mayer 2011).

Ein Manual mit neuen Regeln und neuer Schlafstadien-Einteilung wurde 2007 von der American Academy of Sleep Medicine erstmals seit 1968 vorgelegt (Iber et al. 2007). Dieses stellt sowohl die Ableitkanäle wie auch deren Auswerteregeln unter Berücksichtigung einer halbautomatischen computerisierten Auswertung in einer evidenzbasierten Vorgehensweise zusammenfassend dar. Die alten Regeln wurden überarbeitet und angepasst. Dabei werden die Schlafstadium 1 – 4 abgeschafft und stattdessen N1, N2 und N3 verwendet. Das N1 entspricht ungefähr dem Stadium 1, N2 Stadium 2, und N3 Stadium 3 zusammen mit Stadium 4, während das REM-Stadium wie zuvor bleibt. Weiterhin werden frontale (F3 und F4) und occipitale (O1 und O2) zusätzlich zu den zentralen (C3 und C4) Elektroden, angebracht. Da diese neue Einteilung noch kontrovers diskutiert wird (Danker-Hopfe, Anderer et al. 2009; Ruehland, Rochford et al. 2009; Novelli, Ferri et al. 2010; Ruehland, O'Donoghue et al. 2011; Übersicht: Grigg-Damberger 2012), wurde in der hier vorgestellten Studie die alte Einteilung genutzt.

Die Schlafphasen beim gesunden Menschen wechseln im Lauf einer Nacht in einer zyklischen Reihenfolge zwischen REM- und NonREM-Schlaf ab. Am Anfang einer normalen Nacht durchlaufen die Schlafenden zunächst die vier Stadien des NonREM-Schlafes, bevor sie dann in eine REM-Phase eintreten, und anschließend

wieder zu den vier NonREM-Stadien zurückkehren. Insgesamt durchläuft ein Mensch diese Zyklen etwa vier bis fünf Mal in einer Nacht, wobei ein Zyklus sich etwa alle 90 Minuten wiederholt.

Die REM-Phasen werden mit dem Fortschreiten der Nacht länger, die NonREM-Phasen, insbesondere Stadium 3 und 4, verkürzen sich dementsprechend. Das heißt, dass die erste Nachthälfte vom Tiefschlaf (NonREM Stadium 3 und 4) und die zweiten Nachthälfte vom REM-Schlaf dominiert wird. Normalerweise ist der Tiefschlaf sogar nur in den ersten beiden Zyklen einer Nacht zu finden, während die späteren NonREM-Phasen überwiegend aus Schlaf im Stadium 2 bestehen (Schandry 2011).

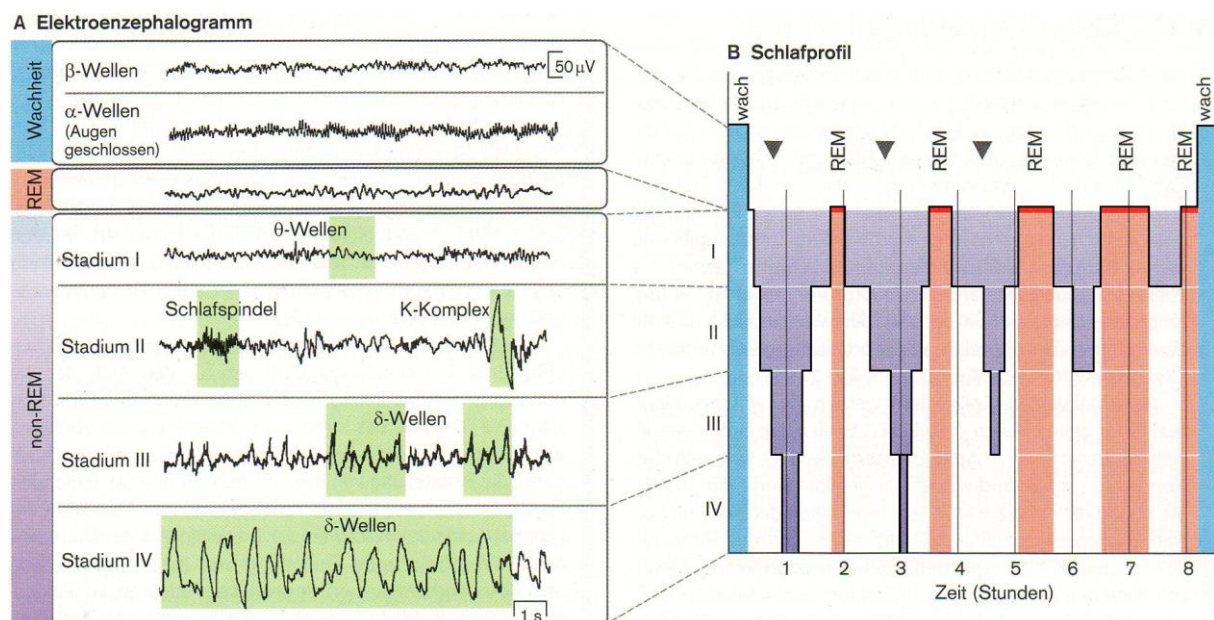


Abbildung 1. Typisches Schlafprofil einer Nacht beim gesunden Menschen mit zugehörigem Elektroenzephalogramm. A Elektroenzephalogramm im Wachzustand, NonREM- und REM-Schlaf mit zu jedem Stadium typisch auftretenden Wellen. B Schlafprofil, das sich aus vier bis fünf Zyklen der unterschiedlichen Schlafphasen (Stadium 1 – 4 und REM) zusammensetzt (modifiziert nach Pape 2010b). α =Alpha, β =Beta, δ =Delta, θ =Gamma, s=Sekunden, REM=*Rapid eye movement*-Schlaf, μ V=Mikrovolt.

1.2. Neuronale Grundlagen

Eine ganz wesentliche Rolle bei der Schlaf-Wach-Regulation spielt die im Hirnstamm säulenförmig ausgedehnte und stark vernetzte Formatio reticularis. Hier finden sich verschiedene aktivitätsmodulierende Substrukturen, die sensorische

Signale aus der Peripherie erhalten und aktivierende Impulse in den zerebralen Kortex senden (Moruzzi und Magoun 1949; Starzl, Taylor et al. 1951).

Die Steuerung der Arousal-Reaktion, die als Zustand erhöhter Wachheit, Aufmerksamkeit und Reaktionsbereitschaft definiert ist, geschieht von der Formatio reticularis aus auf zwei Wegen. Die erste Aktivierungsbahn läuft über einen dorsalen cholinergen Pfad über den Thalamus zum Kortex (Nauta und Kuypers 1958; Übersicht: Siegel 2004). Im Wachzustand und REM-Schlaf haben die Neuronen die höchste, hingegen im NonREM-Schlaf die niedrigste Aktivität. Die zweite Aktivierungsbahn läuft über eine ventrale Verbindung zum lateralen Hypothalamus und zu den basalen Vorderhirnkernen (Saper 1985; Jones 2000; Übersicht: Jones 2003). Dazu gehören auch der noradrenerge Locus coeruleus, die serotonergen Neurone der Raphe-Kerne, die dopaminerge ventrale periaqueduktale graue Substanz und die histaminergen tuberomamillären Neurone. Diese monoaminerge Neuronenaktivität sinkt mit dem Einschlafen kontinuierlich ab und erreicht mit dem Einsetzen des REM-Schlafes ihren Tiefpunkt (Aston-Jones und Bloom 1981; Fornal, Auerbach et al. 1985). Der Eingang in den zerebralen Kortex wird durch das im lateralen Hypothalamus produzierte Neuropeptid Orexin (auch als Hypocretin bekannt), sowie durch die in den basalen Vorderhirnkernen produzierten Neurotransmitter Acetylcholin oder GABA verstärkt. Die stärkste Aktivität hat sie im Wachzustand, was eine wachheitsfördernde Wirkung impliziert (Lee, Hassani et al. 2005).

Der Beginn des Schlafes wird vor allem durch GABA und Galanin vermittelt (Sherin, Elmquist et al. 1998; Gaus, Strecker et al. 2002), in den schlafinduzierenden Neuronen im ventrolateralen präoptischen Gebiet (VLPO) des anterioren Hypothalamus initiiert, die die aktivierende Neurone im Locus coeruleus, in den Raphekernen und im Nucleus tuberomamillaris hemmen. Mit zunehmender Aktivierung der VLPO und spiegelbildlicher Inaktivierung der aktivierenden Systeme im Hirnstamm und Thalamus nimmt die Schlaftiefe zu (Saper, Sherin et al. 1997; Szymusiak, Alam et al. 1998).

Das "Flip-flop Switch"-Modell erklärt, wie der Schlaf-Wach-Zustand reguliert wird. Dabei hat der 'Flip-Flop-Schalter' im Hypothalamus die Fähigkeit, das Arousalssystem während des Wachzustands zu fördern und aufrechtzuhalten, hingegen während des Schlafzustands auszuschalten. Das heißt, dass die Schlaf- und Arousalcomponenten

analog zu dem 'Flip-Flop-Schalter' sich gegenseitig hemmen. Während andere hypothalamische Neuronen die Schlaf-/Wachzustandsübergänge stabilisieren, führt ihre Abwesenheit zu einer unerwünschten Umschaltung des Wach- oder Schlafzustandes (Übersicht: Saper, Chou et al. 2001; Saper, Scammell et al. 2005). Diese Regulation ist z.B. beim Krankheitsbild der Narkolepsie aufgrund eines Orexin-Mangels gestört. Die Orexin produzierenden Neuronen haben wahrscheinlich eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung der Phasen des Schlaf-Wach-Verhaltens. Dies zeigen Studien von Thannickal et al. (2000) und Peyron et al. (2000). Diese berichten, dass Menschen mit Narkolepsie nur wenige Orexin-Neurone im lateralen Hypothalamus und niedrige Orexin-Spiegel in der Cerebrospinalflüssigkeit aufweisen.

Der Wechsel zwischen NonREM- und REM-Schlaf wird einerseits durch cholinerge Neuronen in dem laterodorsalen Nucleus tegmentalis und im Nucleus tegmenti pedunculo-pontinus (REM-on) bewirkt, andererseits durch noradrenerge Zellen im Locus coeruleus und im serotonergen dorsalen Raphe-Kern (REM-off). Mit zunehmender Schlaftiefe werden die REM-off-Neuronen inaktiviert, während die von ihnen ursprünglich inhibierten REM-on-Neuronen disinhibiert werden. Somit werden verschiedene Vorderhirngebiete wieder aktiviert, sodass die typischen schnellen Augenbewegungen und die Muskelatonie ausgelöst werden können. Weiterhin wird der regelmäßige elektrophysiologische Thetarhythmus im Hippocampus dadurch initiiert (Hobson, McCarley et al. 1975; McCarley und Hobson 1975; Schandry, 2011).

2. Gedächtnis

2.1. Gedächtnissysteme

Unter Gedächtnis versteht man die Fähigkeit des Gehirns, verschiedene Informationen aufzunehmen, zu speichern und im späteren Zeitpunkt wieder abzurufen bzw. zu reproduzieren (Hehlmann 1965). Diese gespeicherte Information wird sowohl durch bewusste als auch durch unbewusste Lernprozesse erworben.

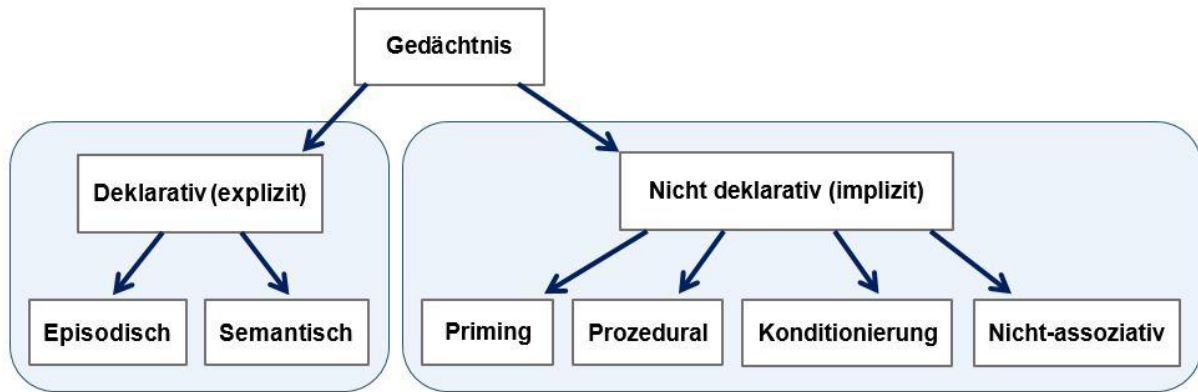


Abbildung 2. Einteilung des Gedächtnissystems.

Beim menschlichen Gedächtnis wird je nach Dauer der Informationsspeicherung zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis unterschieden. Das Langzeitgedächtnis kann man noch nach Art des Gedächtnisinhaltes in prozedurales und deklaratives Gedächtnis unterteilen (Abb. 2). Das prozedurale Gedächtnis beinhaltet das Erlernen von sensomotorischen und kognitiven Fertigkeiten, ohne dass man sich diesen explizit bewusst ist (z.B. das Erlernen von Sprechen, Radfahren oder Schwimmen). Des Weiteren sind die Inhalte des prozeduralen Gedächtnisses nicht immer in Worte zu fassen (Radvansky und Tamplin 2012). Das deklarative Gedächtnis wird in semantisches und episodisches Gedächtnis eingeteilt. Während das semantische Gedächtnis aus Fakten bzw. Allgemeinwissen über die Welt besteht, ohne dass man den Erwerb des Wissens zeitlich und räumlich einordnen kann (z.B. man weiß den Namen des ersten Präsidenten der Vereinigten Staaten von Amerika, ohne zu wissen, wann und wo man diese Information erhalten hat), umfasst das episodische Gedächtnis Informationen über räumliche und zeitliche Zusammenhänge, also wo und wann bestimmte Vorkommnisse sich ereignet haben (z.B. man kann sich an die Abschlussfeier in München vom letzten Jahr erinnern) (Tulving 1972, 1985).

2.2. Vorgang des Lernens

Zwar ist der Prozess der Gedächtnisbildung im Groben bekannt, jedoch sind einige Vorgänge im Detail noch nicht vollständig geklärt und sind deshalb immer noch Gegenstand intensiver Forschung. Zeitlich lässt sich die Gedächtnisbildung in die Phase der Enkodierung – oder Lernphase –, die Phase der Konsolidierung und

schließlich die Phase des Abrufs unterteilen. Die Konsolidierung auf der neuronalen Ebene findet innerhalb weniger Minuten bis Stunden nach einer Lernerfahrung, während die Systemkonsolidierung Tagen, Wochen, Monate oder Jahre benötigt, um eine Reorganisation ganzer Neuronenkreise gewährleisten zu können. Dies bedeutet, dass neue Erinnerungen zunächst labil sind und durch Interferenzen verloren gehen können, während sie nach Konsolidierung sicher gespeichert sind (Müller und Pilzecker 1900; Burnham 1903; McGaugh und Herz 1972; Übersicht: Squire, Genzel et al. 2015).

Neue Information wird eher im Gedächtnis behalten, wenn sie mit bereits vorhandenem Wissen verknüpft wird, wenn die Enkodierungs- mit den Abrufsbedingungen übereinstimmt, und wenn einfach verfügbare Abrufhinweise verfügbar sind (Tse et al. 2007, 2011). Im Gegensatz dazu stören inhaltlich überlappende bzw. ähnliche Lernaufgaben die Gedächtnisbildung. Diese Gegebenheit ist ein Beispiel einer Interferenz (Gluck et al. 2010). Außerdem bleiben Informationen oder Ereignisse über lange Zeit in Erinnerung, wenn sie starke emotionale Empfindungen hervorgerufen haben (LeDoux 1989; Dunsmoor et al. 2015).

2.3. Neuronale Grundlagen

Die neurobiologische Grundlage für Lernen und Gedächtnis liegt in einer Änderung der synaptischen Übertragung, die die Effizienz der synaptischen Reizleitung sowie das Wachstum der dendritischen Dornen betrifft (Eccles 1992). Diese flexible Anpassungsfähigkeit des Gehirns wird als neuronale Plastizität bezeichnet und ermöglicht ein Lernen bis ins Alter.

Das Gedächtnis wird durch Langzeitpotenzierung der postsynaptischen Nervenzellen gebildet. Danach speichern die postsynaptischen Zellen diese Aktivierung im Sinne eines Lernvorganges (Steriade 2005). Lømo hat durch seine Forschung gezeigt, dass Neuronen in der Tat ihre Aktivität als Funktion von Erfahrung verändern können und dass diese Veränderungen Stunden oder Tage andauern können (Bliss und Gardner-Medwin 1973; Bliss und Lømo 1973; Lømo 1966). Dies verstärkt die Hypothese von Hebb (1949), der den Grundsatz aufgestellt hat, dass Neuronen, die gemeinsam feuern, sich auch gemeinsam ‚verdrahten‘.

Anders ausgedrückt: Wenn zwei oder mehrere Zellen zeitlich synchron und wiederholt aktiv sind, wird die Aktivierung zwischen beide Nervenzellen verstärkt (Assoziativität). Außerdem wird die nachfolgende postsynaptische Aktivierung auch dadurch verstärkt, wenn die präsynaptische Zelle eine hochfrequente Aktivität sendet (Eingangsspezifität). Die Langzeitpotenzierung zur Gedächtnisbildung geschieht vor allem im Hippocampus (Pape 2010a, Übersicht: Eichenbaum 2004).

Ein wichtiger Mechanismus der Langzeitpotenzierung beruht auf einer starken Depolarisation der Membran, indem sich der Glutamat-abhängige Ionenkanal vom AMPA-Typ (*engl. α -amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionic acid*) öffnet und dadurch Na^+ in die postsynaptischen Elemente einströmen kann. Dadurch wird der zuvor durch Mg^{2+} blockierte, Glutamat-abhängige Ionenkanal von NMDA-Typ (*engl. N-Methyl-D-aspartic acid*) deblockiert, sodass Ca^{2+} den Kanal passieren kann. Der resultierende Anstieg der intrazellulären Ca^{2+} -Konzentration aktiviert eine Kaskade von Botenstoffen, die einerseits zu einer Verstärkung postsynaptischer Antworten durch Rezeptorphosphorylierung und andererseits zu einer Steigerung der präsynaptischen Transmitterfreisetzung führt. Außerdem induziert die aktivierte Proteinkinase die Genexpression im Zellkern, was eine Neusynthese von Proteinen, Mobilisierung ruhender Synapsen und Neubildung von Synapsen zur Folge hat (Pape 2010a).

Demgegenüber spielt die Langzeitdepression auch eine Rolle: eine Reduzierung der synaptischen Übertragungsstärke. Hierbei ist die Ca^{2+} -Freisetzung aus dem intrazellulären Speicher nach Aktivierung metabotroper Glutamat-Rezeptoren und Ca^{2+} -Einstrom durch spannungsabhängige Ca^{2+} -Ionenkanal verantwortlich. Dadurch wird eine anhaltende Depression der synaptischen Übertragungsstärke ausgelöst, über deren Mechanismen allerdings bislang nur wenig bekannt ist (Pape 2010a).

Das deklarative Gedächtnissystem wird mit dem limbischen System, dem mediotemporalen Cortex und den Assoziationscortices in Verbindung gebracht (Tranel und Damasio 1995; Mesulam 2000). Die Gedächtnisinhalte werden aus dem Kurzzeitgedächtnis in das Langzeitgedächtnis überführt, indem der Hippocampus Informationen verschiedener sensorischer Systeme aufnimmt, verarbeitet, und von dort zum Cortex zurücksendet. Das limbische System und der hippocampo-entorhinale Komplex spielen dabei eine wesentliche Rolle, zumindest für das deklarative Gedächtnis (Squire und Zola 1991; Reed und Squire 1998; Mesulam

2000; Manns und Squire 2002). Danach werden die neuen Erinnerungen parallel im Hippocampus sowie im Kortex enkodiert bzw. gespeichert. Bei einer späteren Reaktivierung der hippocampo-kortikalen Netzwerke werden die kortiko-kortikale Netzwerke graduell verstärkt. Außerdem führt sie zur Integration in bestehende Netzwerke, so dass die Gedächtnisinhalte mit der Zeit vom Hippocampus unabhängig werden. Somit hat der Hippocampus die Funktion als Mediator, Erinnerungen zu bilden. Die Speicherung von Gedächtnisinhalte erfolgt danach in der Großhirnrinde (Mishkin 1982; Teyler und DiScenna 1986; Kapur und Brooks 1999; Pape, 2010a; Übersicht: Wiltgen et al. 2004).

Zu den weiteren Hirnstrukturen, die am deklarativen Gedächtnis beteiligt sind, gehören (außer dem Temporallappen mit dem entorhinalen, perirhinalen und parahippocampalen Cortex) der frontale Cortex, das Diencephalon und das basale Vorderhirn. Der frontale Cortex beteiligt sich an der Auswahl dessen, was gespeichert und danach erinnert oder vergessen wird. Dies wird durch die 'instruiertes Vergessen'-Aufgabe (*engl. Directed forgetting task*) demonstriert, woraus man ableiten könnte, dass der präfrontale Cortex hippocampale Aktivität unterbindet und damit die Speicherung und den Abruf von ungewollten Erinnerungen hemmt (Anderson et al. 2004). Der mediale präfrontale Cortex wird mit konsolidierten und mit Vorwissen verbunden schematischen Gedächtnisstrukturen in Verbindung gebracht (Tse et al. 2007, 2011).

Das Diencephalon, das z.B. die Mammilarkörper und die mediodorsalen Thalamuskern umfasst, und das basale Vorderhirn sind mit dem Hippocampus durch ein bogenartiges Faserbündel verbunden. Aus der Beobachtung von Korsakow-Patienten und Patienten mit *A. communicans anterior* Aneurysmariss, bei denen diese Verbindung geschädigt worden ist, folgte die Annahme, dass das Diencephalon wahrscheinlich die Kommunikation zwischen Hippocampus und Cortex bei der Speicherung und Konsolidierung von Gedächtnisinhalten vermittelt, während das basale Vorderhirn wahrscheinlich bei der Regulation der Verarbeitung im Hippocampus beteiligt ist (Parsons und Nixon, 1993; Kopelman, 1995; DeLuca und Diamond, 1995).

Das episodische Gedächtnis wird in Hirnregionen verarbeitet, die auch in der entsprechenden Erfahrungssituation aktiv waren, insbesondere im Okzipitallappen und den posterioren Regionen des Parietal- und Temporallappens, aber auch in

Teilen des präfrontalen Cortex (Moscovitch 1992; Kapur et al. 1994; Tulving et al. 1994; Nyberg et al. 1996; Craik et al. 1999; Nyberg et al. 2000; Übersicht: Mayes und Roberts 2001). Es ist bisher noch unklar, ob episodische Erinnerungen jemals vollständig unabhängig vom Hippocampus werden oder ob der Hippocampus immer beim Abruf von Cortex gespeicherten Erinnerungen beteiligt ist (Shallice et al 1994; Vargha-Khadem et al. 1997; Übersicht: Suzuki, 2003). Zur Konsolidierung emotional besetzter Erinnerungen trägt zudem ganz wesentlich die Amygdala und der orbitofrontale Cortex bei (LeDoux 1989; Cahill et al. 1995; Cahill et al. 1996; Adolphs et al. 1997; Eichenbaum und Cohen, 2001; Smith et al. 2004).

Das motorische Gedächtnis entsteht durch Modifikationen und Organisation von Muskelsynergien, sodass effektive und gezielte Bewegungssequenzen ausgeführt werden können (Schieber 1990; Übersicht: Monfils et al. 2005). Insgesamt spielen das Cerebellum, der cerebrale Cortex und die Basalganglien für das Erlernen von motorischen Fertigkeiten eine entscheidende Rolle (Tranel und Damasio, 1995; Mesulam, 2000). Zum Beginn des Lernens werden motorische Abläufe/Informationen im dorsolateralen präfrontalen Cortex und den supplementären motorischen Cortexarealen bearbeitet. Dies führt dann zur Aktivierung der Basalganglien und somit auch des Cerebellums, die dauernd gegenseitig interagieren (Bizzi, 2000). Das Cerebellum ist dafür verantwortlich, den zeitlichen Ablauf und die Bewegungsabfolge präzise zu koordinieren. Eine Studie von Hikosaka et al (2000) zeigte, dass das Erlernen von motorischen sequentiellen Prozeduren in wenigstens zwei Abschnitten erfolgt: In der Kurzzeitphase (innerhalb einer Sitzung) lernt der Proband die motorische Sequenz korrekt, jedoch eher langsam aufgrund der Reaktion auf einzelne visuelle Reize. Dagegen werden in der Langzeitphase (über Tage) die motorische Sequenz durch eine Kette antizipatorischer Bewegungen schnell ausgeführt. Das neuromolekulare Prinzip dieser Gedächtnisbildung beruht auf der synaptischen Plastizität über Langzeitpotenzierung, wie bei der deklarativen Gedächtnisbildung (Sakamoto et al. 1987; Asanuma und Pavlides 1997; Übersicht: Monfils et al 2005).

2.4. Gedächtnissport

2.4.1. Definition

Unter Gedächtnissport versteht man eine Sportart, bei der Mnemotechniken zum Einsatz gebracht werden, um in kurzer Zeit große Datenmengen zu erinnern. Die internationale Weltmeisterschaft im Gedächtnissport fand erstmals 1990 statt, während die erste deutsche Meisterschaft 1997 gehalten wurde. Meisterschaften bestehen aus verschiedenen Disziplinen, die den jeweiligen Altersgruppen angepasst werden.

Die Abgrenzung zwischen Gedächtnissport und Gedächtnistraining liegt darin, dass das Gedächtnistraining aus praktischen, alltäglichen Gründen betrieben wird, wie z.B. für Schule, Beruf oder bei Demenz (Puck und Schloffer 2010; Friese et al. 2010; Schloffer 2010), während die Gedächtnissportler gezielt versuchen, ihre Gedächtnisleistung zwecks des sportlichen Wettkampfes zu verbessern. Der Gedächtnissportler greift dabei auf sogenannte Mnemotechniken zurück, die ihm erleichtern sollen, große Wissensmengen auswendig zu lernen. Diese Methoden sind schon lange bekannt und setzen keine besondere Begabung voraus, sind jedoch für die Teilnahme an Wettkämpfen notwendig (Dresler und Konrad, 2013; Ericsson, 2003; Konrad, 2016). Durch die Internationalisierung des Gedächtnissports, aber auch durch Weiterentwicklungen der verwendeten Mnemotechniken sind die Gedächtnisleistungen der Teilnehmer von Gedächtnismeisterschaften mit den Jahren immer weiter angestiegen (Konrad und Dresler, 2010; Konrad, 2016).

2.4.2. Mnemotechnik

Mnemotechniken sind nicht angeboren, sondern werden durch ein langfristiges und kontinuierliches Training erworben (Ericsson 2003). Chase und Ericsson (1981) beschreiben mit ihrer "*Skilled Memory*"-Theorie, wie durch bedeutungshaltige Strukturierung und Entwicklung einer hierarchischen Abrufstruktur die Grenzen des Arbeitsgedächtnisspeichers deutlich überwunden werden können. Dabei wird versucht, eine Reihe von nicht-signifikanten, unabhängigen und unstrukturierten Lerninhalten durch Anwendung von z.B. Geschichten, Abbildungen, semantischen Verknüpfungen und Gefühle zu verbinden, sodass die Lerninhalte wesentlich leichter

abgerufen werden können. Zudem werden neue Informationen mit bestehenden, oft explizit für die Mnemotechnik gelernten Wissensstrukturen verknüpft, die dann beim späteren Abruf als einfach zugängliche Abrufhinweise fungieren (Butcher 2000, Karsten 2011).

Loci-Methode / Routenmethode: Bei der Loci-Methode (lat. Locus für Ort/Platz) wird ein spezieller Platz bzw. Weg durch ein vertrautes Gebiet mit einigen übergeordneten, festen Wegpunkten entlang des Pfades vorgestellt. Es kann auch ein Raum oder sogar ein unrealistischer Fantasieort sein. Auf dem explizit und exakt ausgewählten Platz werden die zu merkenden Lerninhalte abgelegt und hiernach miteinander verknüpft. Um diese wieder abrufen zu können, muss man nur in Gedanken den Pfad entlanggehen und die Assoziation zu jedem Wegpunkt wieder ins Leben rufen (Worthen und Hunt 2011; Anderson 2007; Karsten 2002; Karsten 2011). Will man zum Beispiel die Begriffe "Hundefutter, Tomaten, Bananen usw." merken, so verknüpft man diese Wörter mit dem Weg von Zuhause zur Arbeit "Pizzaladen, Kreuzung, Verwaltungsgebäude, usw." Die Verknüpfung wäre z.B.: Hundefutter mit Pizzageschmack in Pizzaform – Umgestürzter Laster mit verstreuten Tomaten – Ein Rektor mit einem Hula-Röckchen aus Bananen. Je skurriler die Assoziierung ist, desto besser kann man sie sich merken.

Als eine Erweiterung der Routenmethode kann die Routenpunktbelegung betrachtet werden, bei der nicht nur ein Bild abgelegt wird, sondern mehrere Bilder auf einem Routenpunkt. Dabei werden die einzelnen Bilder zu einer Geschichte verbunden, die anschließend auf dem jeweiligen Routenpunkt visualisiert werden. Es können zwei bis acht Bilder auf einen Punkt gelegt werden. Damit hat diese Erweiterung den Vorteil, dass weniger Routenpunkte benötigt werden.

In der Studie von Luria (1968) wurde die Effektivität dieser Methode, auch zum Informationsabruf nach dem erheblichen Retentionsintervall (Wang und Thomas 2000) gezeigt. Die mehrmalige Nutzung der gleichen Loci für verschiedenen Wortlisten vermindert die Effektivität dieser Methode nicht (Massen und Vaterrodt-Plunnecke 2006). Allerdings benutzt man am besten selbstgenerierte, anstatt von anderen Personen generierte Loci, um eine bessere Leistung erzielen zu können (Moè und De Beni 2004).

Transformiersysteme: Unter Transformation versteht man den Prozess der Umwandlung abstrakter Daten wie z.B. einer Zahl in ein Wort oder ein Bild. Eine rein willkürliche Zuordnung ist eine mögliche Vorgehensweise, bei der man sich für die jeweiligen abstrakten Informationen ohne irgendein System Bilder ausdenkt.

Um bessere Gedächtnisleistungen zu erreichen, spielt das mentale Bild eine wichtige Rolle. Hierunter versteht man die Fähigkeit, geistig reale/surreale Bilder zu gestalten, die in Wirklichkeit nicht existieren und durch äußere Stimuli nicht wahrgenommen werden können (Paivio 1965; Bower 1970). Dabei werden alle Lerninhalte in personalisierten mentalen Bildern abgespeichert und können zu einem späteren Zeitpunkt schneller und leichter abgerufen werden. Zur Optimierung werden alle Sinnesmodalitäten, wie z.B. Töne oder Gerüche, im Mentalbild aufgebaut. Diese enormen visuellen Speicherfähigkeiten des Gehirns wurden bereits von Standing (1973) gezeigt. In seinem Experiment wurden die vorgezeigten Bilder besser abgespeichert und waren besser abrufbar als wenn das gleiche Experiment mit Wörtern durchgeführt wurde.

Das einfachste System zur Transformation von Zahlen ist das Zahlen-Form-System, wo jede einzelne Ziffer eine oder mehrere Ideen in uns entstehen lässt, welcher Gegenstand aus unserer Umwelt die Form der Ziffer in sich birgt. Zum Beispiel erinnert "0" an einen Reifen, "2" an einen Schwan, usw. Beim Zahl-Reim-System versucht man für jede Ziffer von 0 – 9 ein Wort zu finden, welches sich auf die Ziffer reimt. Zum Beispiel: "Bier" für die "4" (Karsten 2011). Wesentlich effizienter und am weitesten verbreitet ist das Major-System bzw. Mastersystem (auch *engl. Phonetic System*) (Karsten 2002; Karsten 2011; Konrad, 2016).

Bei dem Mastersystem wird jede Ziffer in Konsonanten, aber nicht in Vokale kodiert, wobei bei der Zuordnung nach Möglichkeit auf die Ähnlichkeit der Form oder anderer Merkhilfen geachtet wird. Danach werden die Konsonanten nach der Zahlenfolge angeordnet und durch das Einfügen von Vokalen ein Wort gebildet. Zum Beispiel hätte die Zahl 14 (t+r) die Wortmöglichkeiten: Tier, Tor oder Teer, usw. (Karsten 2011). Um mehrere Zahlenreihenfolgen zu merken, versucht man, mit diesen Wörtern eine möglichst interessante Geschichte zu erfinden (Worthen und Hunt 2011; Karsten 2002; Karsten 2011).

Die Ergebnisse aktueller Studien zur Effektivität des Mastersystems waren uneinheitlich. Einerseits unterstützte das Mastersystem untrainierte Probanden nicht und erschwerte manchmal den Abruf von Daten, Adressen und Telefonnummern (Patton 1986), andererseits zeigten Morris und Greer (1983) die Effektivität dieses Systems beim Abspeichern zweiziffriger Zahlen. Für große, langziffrige Zahlen wurde empfohlen, die Zahlen in zweiziffrige Paare zu teilen und danach jeweils ein Wort zu bilden (Bellezza et al. 1992). Im Gegensatz zur Loci-Methode benötigt das Mastersystem umfangreiche Vorarbeit und Training. Außerdem lieferte dieses System eine bessere Leistung, wenn die Kodierung von Experten bereitgestellt wurde, als wenn man die Kodierung selbst generierte (Patton et al. 1991; Patton und Lanzy 1987). Möglicherweise ist die Effektivität des Mastersystems insbesondere von der Trainingsdauer abhängig: Gedächtnissportler mit vielen hundert Stunden Trainingserfahrung erreichen mit dem System außergewöhnliche Gedächtnisleistungen (Konrad und Dresler, 2010; Konrad, 2016).

3. Zusammenhang von Schlaf und Gedächtnis

Einige Personen berichteten, dass sie nach einer Nacht mit Schlaf das intensiv gelernte Wissen vom Vortag viel besser beherrschten als am vorherigen Tag vor dem Schlaf. Offensichtlich laufen weitere Verarbeitungsschritte des Gelernten im Schlaf ab, die sogenannte Gedächtniskonsolidierung (Ebbinghaus 1885; Müller und Pilzecker 1900; Übersicht: Lechner, Squire et al. 1999; Diekelmann und Born 2010), sodass der Schlaf nicht nur als eine Gegebenheit zur Erholung bewertet werden kann. Seit mehr als einem Jahrhundert bringt man die Gedächtniskonsolidierung mit dem Schlaf in Verbindung. Nach zahlreichen Studien in den 1970er Jahren (Yaroush, Sullivan et al. 1971; Barrett und Ekstrand 1972; Fowler, Sullivan et al. 1973; Tilley und Empson 1978) und geringerer Forschungstätigkeit in den 1980er Jahren wird seit einer Veröffentlichung von Karni, Tanne et al. (1994) wieder intensiv an der schlaf-assoziierten Gedächtniskonsolidierung geforscht.

Die Rolle des Schlafes in der Gedächtniskonsolidierung, sowohl für das deklarative als auch das prozedurale Gedächtnis, wurde durch zahlreiche Studien belegt (Übersicht: Maquet 2001; Rasch und Born, 2013). Interessanterweise war der Lernerfolg in den Studien unabhängig von der Tageszeit, in der die Wach- bzw.

Schlafbedingung stattgefunden haben. Das heißt, dass nur der Schlaf selbst relevant ist und dass die Gedächtniskonsolidierung nicht von anderen äußeren Bedingungen beeinflusst wird (Fischer, Hallschmid et al. 2002; Walker, Brakefield et al. 2002; Holz, Piosczyk et al. 2012). Es wird aber immer noch diskutiert, welche Schlafstadien und welche Schlaf-EEG-Mikroprozesse für welche Lernprozesse bzw. Gedächtnisinhalte verantwortlich sind und in welchem Maße sie für diese relevant sind (Genzel, Kroes et al. 2014). In den folgenden Abschnitten wird die schlafabhängige Gedächtniskonsolidierung genauer besprochen.

3.1. Schlaf und deklaratives Gedächtnis

Anders als frühere uneinheitliche Ergebnisse zeigen neuere Untersuchungen einen deutlichen Zusammenhang zwischen deklarativer Gedächtniskonsolidierung und Schlaf (Übersicht: Rasch und Born, 2013). Durch eine indirekte Methode versuchten Plihal und Born (1999a) die Schlafphase, in der die Konsolidierung stattfindet, zu bestimmen. Die Probanden, die vor dem Schlafen gelernt haben und nach Ende der ersten Nachthälfte einem Test unterzogen wurden, zeigten bessere Ergebnisse als diejenigen Probanden, die zwischen den beiden Nachthälften gelernt haben und erst am Morgen den Test absolvierten. So wurde die Konsolidierung von deklarativen Aufgaben mit der ersten Nachthälfte, die reich an Tiefschlaf ist, in Verbindung gebracht (Yaroush, Sullivan et al. 1971; Fowler, Sullivan et al. 1973). Andere Studie konnte außerdem zeigen, dass durch einen selektiven Entzug vom REM-Schlaf die deklarative Gedächtniskonsolidierung nicht beeinflusst wird (Chernik 1972; Lewin und Glaubman 1975). Es wurde zudem bereits früh auf die Tatsache hingewiesen, dass Patienten mit Hirnstammläsionen, die daher einen verminderten oder gar keinen REM-Schlaf aufweisen, keine Einschränkung der kognitiven Fähigkeiten zeigten (Lavie et al. 1984). Das legt nahe, dass REM-Schlaf nicht das für die Gedächtniskonsolidierung verantwortliche Schlafstadium ist. Neuere Studien und Übersichtsarbeiten weisen dem REM-Schlaf vor allem eine Rolle in der emotionalen Gedächtnisverarbeitung zu (Genzel et al., 2015).

In anderen Studien wurden Veränderungen der Mikroarchitektur des Schlaf-EEGs beobachtet. Nach einer deklarativen Lernaufgabe traten vermehrt Schlafspindeln auf, deren Dichte mit den Ergebnissen der Wiedertestung korrelierte. Weiterhin zeigten

die Probanden, die keine Lernaufgaben erhielten, weniger Schlafspindeln (Gais, Molle et al. 2002; Clemens, Fabo et al. 2005). Diese Theorie wurde durch mehrere Untersuchungen mit unterschiedlichen Bedingungen, wie z.B. das Alter der Probanden, die Schlafdauer, und die Schlafhygiene, unterstützt (Plihal und Born 1999a; Ukraintseva und Dorokhov 2011; van der Helm, Gujar et al. 2011; Cox, Hofman et al. 2012; Potkin und Bunney 2012; Seeck-Hirschner, Baier et al. 2012). Eine Fallstudie von Ferini-Strambi et al. (2004) weist auf einen Zusammenhang zwischen dem NonREM-Schlaf und außergewöhnlichem Gedächtnis hin. Hierbei konnte ein Gedächtnissportler miteinbezogen werden, in dessen Schlaf-EEG eine vermehrte SWS- und Schlafspindelaktivität beobachtet wurde. Die Mehrheit der Forschung deutet sogar an, dass hohe Zahl an Schlafspindeln und Delta-Wellen bei der Gedächtniskonsolidierung nicht nur während des Tiefschlafs, sondern auch während des Stadiums 2 beobachtet wurden (Schabus, Gruber et al. 2004; Ruch, Markes et al. 2012; Genzel, Kroes et al. 2014).

Schabus, Hödlmoser et al. (2006) vermuten, dass die Schlafspindeln in der Bildung neuronales Netzwerkes nach der Lernaufgabe korrelieren. Das heißt, dass die hohe Schlafspindelaktivität die Effizienz der thalamo-kortikalen und/oder hippokampo-kortikalen Konnektivität widerspiegelt. Deshalb wurden die Schlafspindeln mit allgemeinen kognitiven Fähigkeiten (Nader und Smith 2001, Nader und Smith 2003) bzw. dem *Performance IQ* (Fogel, Nader et al. 2007) in Verbindung gesetzt. Das *Performance IQ* ist ein Non-verbaler Teil eines Intelligenztests aus dem englischsprachigen Wechsler Adult Intelligence Scale III (Wechsler, 1997). Andererseits können neuere Studien und Meta-Analysen allenfalls einen schwachen Zusammenhang zwischen Schlafspindeln und allgemeinen kognitiven Fähigkeiten nachweisen (Ujma, Konrad et al. 2014; Ujma, 2018).

3.2. Schlaf und prozedurales Gedächtnis

Ähnlich wie beim deklarativen Gedächtnis wird ein schlafassoziierter Effekt beim prozeduralen Gedächtnis kaum noch bestritten (Übersicht: King et al., 2017). Auch hier liegt der Schwerpunkt der neuesten Forschung darin herauszufinden, in welchen Schlafphasen und mithilfe welcher EEG-Mikroprozesse die Konsolidierung stattfindet und welche neuronalen Mikroprozesse beteiligt sind (Genzel, Kroes et al. 2014). Die

meisten Untersuchungen zur schlafabhängigen Konsolidierung des prozeduralen Gedächtnisses wurden anhand motorisch-sequentieller Aufgaben, wie z.B. der "Finger Tapping Task"-Aufgabe, durchgeführt. Hier wurde eine signifikante Korrelation zwischen der Steigerung der Tappingleistung über Nacht und Steigerung der Menge an Schlafstadium 2 nachgewiesen (Walker, Brakefield et al. 2002). Es gab auch unterschiedliche Forschungsergebnisse, wie z.B. die Zunahme sowohl der Menge an Stadium-2-Schlaf als auch der Menge an Schlafspindeln nach der Lernaufgabe im Vergleich zur normalen Vergleichsnacht (Fogel und Smith 2006). Andere Ergebnisse zeigten eine Zunahme der REM-Schlaf-Dichte nach verschiedenen motorischen Lernaufgaben (Yaroush, Sullivan et al. 1971; Fischer, Hallschmid et al., 2002) und einen konsolidierungsfördernde Wirkung des NonREM-Schlaf (Robertson, Pascual-Leone et al. 2004).

Wie für die deklarative Gedächtniskonsolidierung nutzten frühe Untersuchungen die ungleiche Verteilung von Schlafphasen in den Nachthälften, um den genauen Zeitpunkt der Gedächtniskonsolidierung während des Schlafes zu bestimmen, und legten einen Zusammenhang zwischen der REM-schlafreicheren zweiten Nachthälfte mit der prozeduralen Gedächtniskonsolidierung (Plihal und Born 1999a) nahe. Dieses Ergebnis wurde zunächst durch andere Studien unterstützt, bei der die prozedurale Gedächtniskonsolidierung durch selektiven REM-Schlafentzug gestört wurde (Karni, Tanne et al. 1994). Dagegen sprechen neuere Studien gegen eine enge Verbindung zwischen dem REM-Schlaf und der prozeduralen Gedächtniskonsolidierung (Genzel, Dresler et al. 2009; Rasch, Pommer et al. 2009; Dresler, Kluge et al. 2010; Übersicht: Genzel, Spoormaker et al. 2015).

B. Eigene Fragestellung

Wie oben dargestellt gibt es einen engen Zusammenhang zwischen Lernen und Schlaf. Es wurde durch mehrere Studien gezeigt, dass die Gedächtnisinhalte insbesondere im Schlaf konsolidiert werden. Aus den bisherigen Untersuchungen konnte das prozedurale, motorische Lernen mit dem Schlafstadium 2 (Plihal und Born 1999a; Fogel und Smith 2006), und auch den Schlafspindeln (Fogel, Smith et al. 2007; Morin, Doyon et al. 2008; Peters, Ray et al. 2008) in Verbindung gebracht werden. Andererseits wird die deklarative Gedächtniskonsolidierung hauptsächlich mit Tiefschlaf (Yaroush, Sullivan et al. 1971; Barrett und Ekstrand 1972; Fowler, Sullivan et al. 1973; Plihal und Born 1999a) und Schlafspindeln (Gais, Mollé et al. 2002; Clemens, Fabo et al. 2005; Rauchs, Schabus et al. 2008; Schabus, Hödlmoser et al. 2008) assoziiert. Auch für das deklaratives Lernen wurde zuletzt das Schlafstadium 2 verantwortlich gemacht (Genzel, Kroes et al. 2014).

Allerdings sind die bisherigen Daten unklar, ob die beobachtete Veränderung des Schlaf-EEGs und der Schlafarchitektur durch eine intensive Lernphase getriggert wurde; oder heißt es, dass eine erfolgreiche Lerneffekte durch Schlaf mit dessen Gedächtniskonsolidierung unterstützt wurde. Gedächtnissportler könnten im Vergleich zu anderen Personen schwierigere und kompliziertere Lernaufgabe mit Abstand besser lösen, indem sie Mnemotechnik anwenden und massiv mehr lernen. Es liegt daher nahe, dass sie ein höheres Signal im Schlaf-EEG (z.B. Tiefschlaf-, Schlafstadium 2- oder Schlafspindelmenge) als Effekt des Lernens produzieren.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Schlaf-EEG von Gedächtnissportlern und Kontrollpersonen vor und nach intensiven Lernphasen untersucht. Neben konventionellen Schlafstadien wurde die EEG-Mikroarchitektur durch eine Spektralanalyse und eine Analyse der Schlafspindeln in den NonREM-Schlafphasen untersucht.

Die Hypothesen der vorliegenden Studie lauten wie folgt:

- A) Der Vergleich zwischen Nächten zeigt nach Lernen im Vergleich zur Kontrollbedingung:

- A1) vermehrt Tiefschlaf und/oder Schlafstadium 2,
 - A2) höhere Delta- und Sigmaaktivität und
 - A3) höhere Schlafspindelaktivität
- B) Die in A prognostizierten Unterschiede sind bei Gedächtnissportlern stärker ausgeprägt als bei Kontrollprobanden.
- C) Explorativ werden die Kontrollnächte zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden verglichen, um mögliche trait-bedingte Unterschiede in konventionellen Schlafparametern, Spektraldaten und Schlafspindelaktivität aufzudecken.

C. Material und Methoden

1. Versuchspersonen

An dem Versuch nahmen insgesamt 32 Versuchspersonen teil: 16 Gedächtnissportler (Alter: 27 ± 10 Jahre) und 16 Kontrollprobanden (Alter: 27 ± 9 Jahre). Jede Gruppe bestand aus jeweils 6 Frauen und 10 Männern (Abb. 3). Die Gedächtnissportler wurden vor allem aus dem Verein für Hochbegabung „MemoryXL“ rekrutiert und hatten jahrelangen Erfolg in Gedächtnismeisterschaften. Alle Probanden wurden vor dem Studienbeginn über Ziel und Durchführung des Versuches aufgeklärt und gaben ihr informiertes schriftliches Einverständnis. Die Ethikkommission der Ludwig-Maximilians-Universität München hat diese Studie zustimmend bewertet.

Vor der Teilnahme an der Studie wurden Probanden eingehend körperlich, psychiatrisch, mit EKG, EEG und Routinelabor (Blutbild, Elektrolyte, Leberenzyme, ggf. Schwangerschaftstest) untersucht. Probanden mit akuten oder chronischen somatischen und psychiatrischen Erkrankungen in der Eigenanamnese wurden ausgeschlossen. Andere Ausschlusskriterien waren Schichtarbeit, unregelmäßiger Schlaf-Wach-Rhythmus, ein transmeridianer Flug innerhalb des letzten Monats, sowie medikamentöse Behandlung während des letzten Monats. Miteinbezogen wurden ausschließlich Probanden mit deutscher Muttersprache. Die Kontrollprobanden wurden bezüglich Alter, Geschlecht und Intelligenz (CFT 20-R, Weiß 2006) mit den Gedächtnissportlern gematcht. Außerdem wurde mittels des ‘Lern- und Gedächtnistest’ (LGT-3) nach Bäumler (1974) überprüft, ob die Kontrollprobanden eine normale Gedächtnisleistung besaßen.

	Alter	Geschlecht	IQ
Gedächtnissportler	27.1 ± 9.5	6w / 10m	129.9 ± 10.4
Kontrollprobanden	27.4 ± 8.5	6w / 10m	130.7 ± 11.6

Tabelle 1. Daten von Versuchsgruppen mit jeweiligem durchschnittlichem IQ-Tests-Ergebnis. IQ=Intelligenzquotient, w=weiblich, m=männlich.

Die weiblichen Teilnehmer wurden hinsichtlich des Testzeitpunkts ausschließlich innerhalb eines Menstruationszyklus gematcht. Ein Genuss von Alkohol, Cola-Getränken und Nikotin war während der Untersuchung nicht gestattet. Es durften nur maximal 200 ml Kaffee am Morgen getrunken werden. In der Woche vor den Studientagen sollten die Probanden regelmäßig zwischen 23 und 24 Uhr schlafen gehen und zwischen 7 und 8 Uhr am nächsten Morgen aufstehen.

2. Versuchsablauf

Die randomisiert in zwei Subgruppen eingeteilten Probanden der beiden Versuchsgruppen durchliefen jeweils 3 Studientage, die aus einer Eingewöhnungsnacht, Kontrollnacht und Studiennacht mit jeweils einer Polysomnographie im Schlaflabor bestanden. Vor der Studiennacht wurden mehrere Lernaufgaben durchgeführt mit anschließendem Abruf vor dem Schlaf und Wiedertestung am nächsten Morgen (Abb. 4).

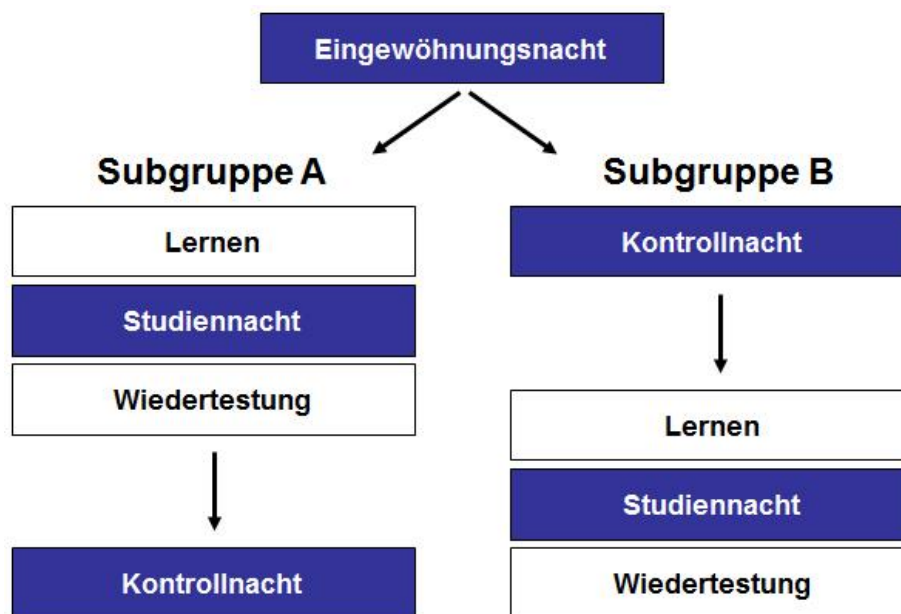


Abbildung 3. Randomisiertes Crossover-Design.

Die Probanden wurden gebeten, in der Woche vor den Studientagen regelmäßig zwischen 23 und 24 Uhr ins Bett zu gehen und zwischen 7 und 8 Uhr am nächsten

Morgen aufzustehen. Am ersten Studientag wurden die Probanden zur Eingewöhnungsnacht am Abend um 20 Uhr im Schlaflabor aufgenommen und wurden gebeten, einige allgemeine kognitive Tests, wie z.B. LGT-3 Form B, ZVT, CFT 20-R, usw. (siehe Kapitel 3.8.), zu absolvieren. Danach wurden die Probanden für die Polysomnographie vorbereitet und durften mit dem Löschen des Lichtes von 23 Uhr bis 7 Uhr am nächsten Morgen ungestört schlafen.

Die Probanden durften zwischen der Eingewöhnungs-, Kontroll- und Studiennacht tagsüber nicht schlafen. Außerdem wurden die Probanden auch gebeten, Gedächtnisleistungen, wie z.B. Lernen von Vokabeln, Zahlen, usw., während der gesamten Studientage zu vermeiden. Weiterhin war der Genuss von Alkohol während dieses Untersuchungszeitraums nicht gestattet. Es durfte nur 200 ml Kaffee am Morgen getrunken werden.

Die Probanden durchliefen zuerst die Kontroll- und anschließend Studiennacht oder umgekehrt (randomisiertes Crossover-Design). Das Ziel dieses Designs ist es zu überprüfen, ob das Schlaf-EEG und dessen Mikroarchitektur durch die intensiven Lernphasen im Vergleich mit der Kontrollnacht sich wirklich verändert haben.

Am Tag der Studiennacht wurden die Probanden um 16 Uhr wieder einbestellt und gebeten, insgesamt 7 Lerntests (3 Tests im MRT-Scanner und 4 Tests außerhalb) durchzuführen. Als Erstes sollten die Probanden den *Directed Forgetting* Test und den *False Memories* Test absolvieren. Die verwendeten Tests werden in den Kapiteln 3.1. und 3.2. genauer besprochen.

Danach wurden die Probanden in die Magnetresonanztomographie-Abteilung zum anatomischen Hirnscan gebracht. Dort bekamen die Probanden drei weitere Gedächtnistests, die im Tomographen zu absolvieren waren: Der *Binary Digits* Test, der n-Back Test und der Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter Test. Die verwendeten Tests werden in Kapitel 3.3., 3.4. und 3.5. erklärt.

Nach der Tomographie bekamen die Probanden eine kurze Pause mit einem Abendessen, bevor die EEG-Elektroden im Schlaflabor angebracht wurden. Die Probanden erhielten nach dem Essen einige Spielkarten und fiktive Personendaten, die sie auswendig lernen sollten. Am nächsten Morgen wurden sie gebeten, die am Abend zuvor gelernte Information wiederzugeben (Abb. 5). Die verwendeten Tests werden in Kapitel 3.6. und 3.7. besprochen.

Die Kontrollnacht verlief genauso wie die Eingewöhnungsnacht, jedoch ohne kognitive Tests. Alle Polysomnographien wurden unter gleichen Bedingungen aufgezeichnet. Am Ende des Versuches lagen für jeden Probanden zwei Polysomnographien vor.

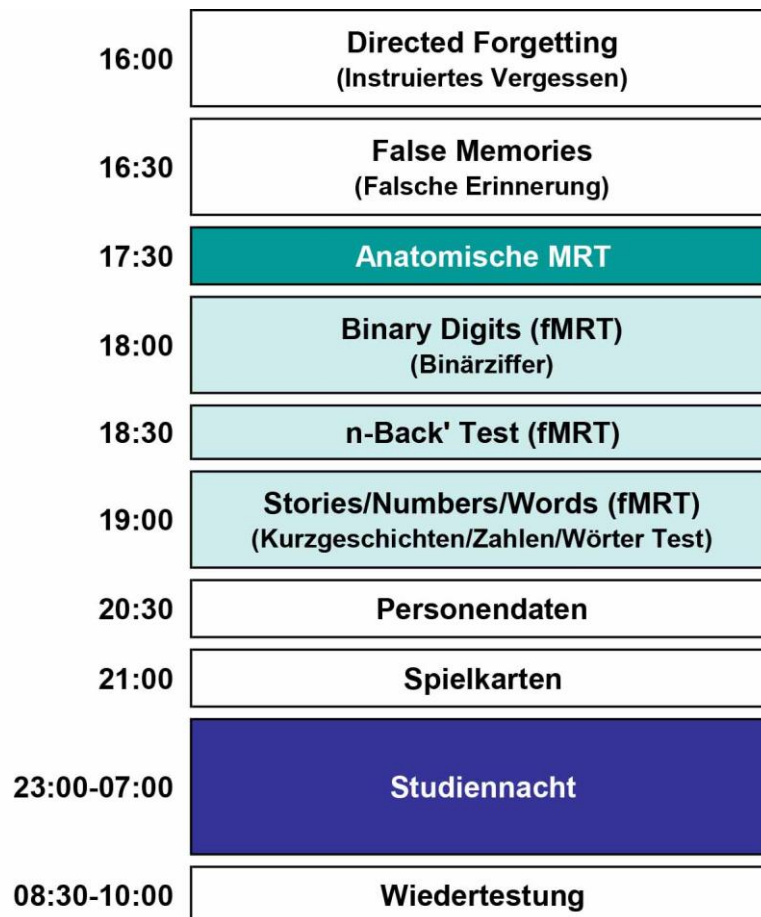


Abbildung 4. Chronologischer Versuchsablauf vor und nach der Studiennacht. Die einzelnen Tests werden in dem nächsten Kapitel erläutert. Während die Probanden *Binary Digits*-, *n-Back*- und *Stories/Numbers/Words*-Test absolvieren, wird eine fMRT-Untersuchung (funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie) durchgeführt. Zu der fMRT-Untersuchung wird eine andere separate Studie laufen (mit türkis-grün markiert). Die darin durchgeführten Tests sind jedoch für die eigene Studie relevant.

3. Tests

3.1. *Directed Forgetting* Test (Instruiertes Vergessen)

Der *Directed Forgetting* Test (MacLeod, 1998) wird genutzt, um die Auswirkung einer expliziten Vergessensinstruktion auf die Gedächtnisleistung zu analysieren.

Dabei wird der Gedächtnisabruf von Wörtern, die erinnert werden sollen ('Erinnern'-Wörter), mit Wörtern, die absichtlich vergessen werden sollen ('Vergessen'-Wörter), verglichen.

Die *Directed Forgetting*-Wortliste bestand aus 50 'Erinnern'-Wörtern und 50 'Vergessen'-Wörtern. Bei dem Test wurden die insgesamt 100 Wörter jeweils für 2 Sekunden am Computerbildschirm präsentiert. Zwischen den Wörtern wurde eine *Directed Forgetting*-Instruktion für 2 Sekunden gezeigt, in der die Probanden entweder zum Vergessen oder zum Erinnern des zuvor präsentierten Wortes aufgefordert wurden. Die Gedächtnissportler wurden insbesondere angewiesen, Mnemotechniken nur im Falle einer 'Erinnern'-Instruktion anzuwenden.

Während 18 Probanden (9 Gedächtnissportler und 9 Kontrollprobanden) den Retest sowohl im direkten Anschluss an die Lernphase als auch am folgenden Morgen absolvierten, wurden die restlichen Probanden (7 Gedächtnissportler und 7 Kontrollprobanden) ausschließlich am folgenden Morgen wiedertestet. Bei dem Test wurden die Probanden gebeten, alle präsentierten Wörter, also sowohl 'Erinnern'- als auch 'Vergessen'-Wörter, aufzulisten. Nach diesem freien Abruf bekamen sie eine Wortliste, die aus 50 'Erinnern'-, 50 'Vergessen'-Wörtern und 50 nicht präsentierten Distraktor-Wörtern bestand. Es sollte angekreuzt werden, ob das Wort vorkam, ob das Wort zum 'Erinnern'- oder 'Vergessen'-Wort gehörte und ob das Wort bewusst erinnert wurde oder lediglich vertraut erschien. Am nächsten Morgen nach der EEG-Aufzeichnung erfolgte die Wiedertestung auf die gleiche Weise.

3.2. False Memories Test (Falsche Erinnerung)

Als *False Memories* (Deese 1959; Loftus 1997; Roediger und McDermott, 1995) bezeichnet man das Phänomen, wenn eine Person ein Ereignis erinnert, das in Wirklichkeit nie stattgefunden hat. Diese unabsichtliche 'Falsche Erinnerung' unterscheidet sich von der bewussten Falschaussage dadurch, dass der Betreffende selbst seine Aussage für richtig hält.

In der Gedächtnisforschung ist insbesondere das sog. 'Deese–Roediger–McDermott' Paradigma (DGM-Paradigma) etabliert, um die 'Falsche Erinnerung' von Menschen zu erzeugen. Dabei wurden den Probanden 18 Wortlisten mit kurzen

Pausen zwischen den Wortlisten vorgelesen. Jede Wortliste enthielt 15 semantisch zusammenhängende Wörter bzw. Assoziationswörter. Danach erhielten die Probanden eine vorgedruckte Liste, die aus 54 zuvor präsentierten, 36 zuvor nicht präsentierten Distraktoren, und 18 sog. Critical Lures bestand. Das Critical Lure ist ein semantisch eng assoziiertes, aber nicht präsentiertes bzw. vorgelesenes Wort. Das Wort "Schlafen" wäre zum Beispiel das kritische Wort von der Wortliste: "Bett", "Wach", "Müde", "Ausruhen", etc.

Die Probanden wurden wie im *Directed Forgetting Test* in 2 Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe (9 Gedächtnissportler und 9 Kontrollprobanden) absolvierten den Abruf unmittelbar nach der Lernphase und erneut am folgenden Morgen, während die zweite Gruppe (7 Gedächtnissportler und 7 Kontrollprobanden) den unmittelbaren Abruf ausließ und ausschließlich am folgenden Morgen getestet wurde. Bei dem Test sollten die Probanden jeweils ankreuzen, ob das Wort vorkam und ob das Wort bewusst erkannt wurde. Die Wiedertestung erfolgte am nächsten Morgen nach der EEG-Aufzeichnung auf die gleiche Weise.

3.3. Binary Digits Test (Binärziffer)

Dieser Test wurde verwendet, um das Langzeitgedächtnis, das Langzeit-Arbeitsgedächtnis und das Arbeitsgedächtnis mittels MRT-Scanner zu untersuchen. Dabei wurden den Probanden Sequenzen aus Nullen und Einsen gezeigt, deren Reihenfolge sie sich innerhalb bestimmter Zeit einprägen mussten (Karsten 2002; Stenger 2004). Während die Gedächtnissportler alle drei Tests durchführten, absolvierten die Kontrollprobanden nur den Test zum Arbeitsgedächtnis.

Bei diesem Test mussten die Gedächtnissportler sich insgesamt fünf 24-ziffrige Binärzahlenkombinationen einprägen, die danach im MRT-Scanner wiedergegeben werden mussten. Der Langzeitgedächtnistest unterscheidet sich von dem Langzeit-Arbeitsgedächtnistest dadurch, dass die Gedächtnissportler die Binärzifferkombinationen bereits 3 Tage zuvor lernen mussten, während sie beim Langzeit-Arbeitsgedächtnistest direkt vor dem Test im MRT-Scanner sich einprägen mussten. Beim Arbeitsgedächtnistest mussten sowohl die Gedächtnissportler als auch Kontrollprobanden fünf 6-ziffrige Binärzahlenkombinationen auswendig lernen und danach im MRT-Scanner wiedergeben. Nach der 5. Binärzifferkombination des

jeweiligen Testes führen die Gedächtnissportler bzw. die Kontrollprobanden eine motorische Kontrollaufgabe durch, indem sie die Links- bzw. Rechts-Taste der Tastatur entsprechend der im Bildschirm angezeigten Pfeilrichtung tippen mussten.

3.4. 'n-Back' Test

Der n-Back Test (Kirchner 1958) wird genutzt, um das Arbeitsgedächtnis des Menschen zu analysieren. Bei diesem wurde eine Abfolge von Buchstaben sequentiell präsentiert. Die Probanden sollten stets prüfen und per Tastenklick anzeigen, ob der gegenwärtige Buchstabe mit dem n-Schritten vorher vorkommenden Buchstaben übereinstimmte. Je größer der Faktor-n war, desto höher war der Schwierigkeitsgrad. Zum Beispiel bei einem 3-back Test könnte die Liste der Buchstaben folgendermaßen aussehen (die fettgedruckten und unterstrichenen Buchstaben sind die gesuchten Buchstaben):

S J G K G F B B N J **B** K J G B N S K H K **K** K G

Dieser Versuch wurde nicht wie üblicherweise nur bis zum 3-back Test durchgeführt, sondern es wurde zusätzlich ein 4-back Test durchgeführt. Rationale für die Auswahl dieses Tests war, die Gedächtnissportler mit einer Aufgabe zu testen, auf die keine bekannte Mnemotechnik anwendbar ist.

3.5. Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter Test (*engl. Stories/Numbers/Words*)

Der Test bestand aus 3 Kategorien, die in folgender Sequenz (jeweils 30 Sekunden Präsentation mit anschließender Pause von 30 Sekunden) präsentiert wurden: Kurzgeschichten – Zahlen – Wörter. Diese Reihenfolge wurde insgesamt 3-mal wiederholt, mit unterschiedlichen Kurzgeschichten, Zahlen und Wörter pro Runde. Es wurden insgesamt 3 Kurzgeschichten vorgelesen, während die Zahlenkategorie und Wörterkategorie jeweils 30 zufällige Zahlen bzw. 30 unzusammenhängende, semantisch gehaltsarme Wörter beinhalteten (Karsten 2002; Stenger 2004). Im direkten Anschluss an den fMRT-Scan sollten die Probanden die Kurzgeschichten, Zahlen und Wörter ohne Zeitlimit möglichst genau in Antwortbögen wiedergeben. Durch diesen Test sollten die Probanden in jeweils einer Aufgabe

getestet werden, in der bei beiden Gruppen vergleichbar gute Leistungen zu erwarten sind (Kurzgeschichten); eine Aufgabe, in der bei beiden Gruppen vergleichbar schlechte Leistungen zu erwarten sind (semantisch arme Wörter); und eine Aufgabe, in der sich Gedächtnissportler durch den Einsatz von Mnemotechniken deutlich von Kontrollprobanden unterscheiden (Zahlen).

3.6. Personendaten

Die Aufgabe ist ähnlich wie eine Disziplin der Gedächtnisweltmeisterschaft konstruiert, wo Personenfotos, Vor- und Nachnamen präsentiert werden und innerhalb der vorgegebenen Zeit eingepägt werden müssen (Karsten 2002; Konrad 2011). Der Unterschied ist, dass bei dieser Studie zusätzlich das zugehörige Geburtsdatum, der Beruf und die Adresse zu merken sind. Die insgesamt 46 Personendaten wurden wie folgt generiert: 46 Fotos von Personen (17 Frauen, 29 Männer) mit neutralem Hintergrund. Den Fotos wurden zufällig die häufigsten in Deutschland vorkommenden Vor- und Nachnamen, Berufe und Straßennamen zugeordnet, weiterhin zufällige Geburtsdaten, Hausnummern und die 46 größten deutschen Städte. Die Probanden hatten 20 Minuten Zeit für diese Aufgabe. Am nächsten Morgen wurden sie ohne Zeitlimit abgefragt.

3.7. Spielkarten

Diese Aufgabe, bei der die Reihenfolge einer oder mehrerer Spielkarten innerhalb der vorgegebenen Zeit einzuprägen ist, ist eine von vielen Disziplinen der Gedächtnisweltmeisterschaft. Die Probanden hatten 20 Minuten Zeit, um sich möglichst viele gemischte Spielkartenstapel (52-er Blatt) zu merken (Stenger, 2004). Die Kartenspiele wurden nicht untereinander, sondern nur einzeln gemischt. Morgens nach der Studiennacht wurden die Probanden gebeten, die richtige Reihenfolge zu bilden.

3.8. Andere Tests

Vor dem Studienbeginn wurden einige Tests durchgeführt werden, die dazu dienten, die Probanden entsprechend der Studienkriterien zu selektieren bzw. zusätzliche Kontrollvariablen zu erheben. Dadurch konnte z.B. die Denkfähigkeiten/Denkstörungen, die Schlafqualität/Schlafstörung oder die Gewohnheiten der Probanden objektiviert bzw. standardisiert werden und somit bessere und gezielte Endergebnisse gesammelt werden. Die unterstützenden und ergänzenden Tests umfassten einen Lern- und Gedächtnistest (LGT-3 Form B; Bäuml 1974), den Zahlenverbindungstest (ZVT; Oswald und Roth 1987), den Grundintelligenztest (CFT 20-R, engl. *Culture Fair Test 20 Revision*; Weiß 2006), und den Mehrfachwahl-Wortschatz-Test (MWT; Lehl, 1977). Außerdem wurden standardisierte Fragebögen verwendet – das *Vividness of Visual Imagery Questionnaire* (VVIQ) (Marks 1973), das *Beck Depression Inventory* (BDI) (Beck, Ward et al. 1961; Hautzinger et al. 2000), der *Pittsburgher Schlafqualitätsindex* (PSQI) (Buysse, Reynolds et al. 1989), das *Morningness-Eveningness-Questionnaire* (D-MEQ) (Horne und Ostberg 1976), das *Santa Barbara Sense of Direction Scale* (SBSOD; Hegarty et al. 2002), das *Need For Cognition* (NFC; Bless et al. 1994 nach Cacioppo und Petty 1982), und das *Edinburgh Handedness Inventory* (EHI) (Oldfield 1971). Die genauere Beschreibung dieser einzelnen Tests wird im Anhang weiter erläutert.

4. Schlafableitung – Polysomnographie

Die Polysomnographie stellt die umfangreichste Untersuchung des Schlafes einer Person dar, bei der die Hirnaktivität und oft weitere Körperfunktionen während der ganzen Nacht registriert werden. In der vorliegenden Studie wurden die EEG-Elektroden in jeder Nacht zwischen 20:30 und 22.30 Uhr fixiert, sodass um 23:00 Uhr die achtstündige Polysomnographie mit dem Löschen des Lichtes begonnen werden konnte. Vor dem Lichtausschalten durften die Probanden nicht schlafen. Anschließend wurden die Probanden um 7:00 Uhr geweckt und damit endete die polysomnographische Schlafaufzeichnung. Alle physiologischen Parameter wurden mittels eines digitalen 32-Kanal-Schreibers registriert (Comlab 32 Digital Sleep Lab, Brainlab V 3.3 Software, Schwarzer GmbH, München).

Das von Jasper (1958) begründete 'Ten-Twenty-System' (10-20-System), wird als Bezugspunkt zum Anlegen der EEG-Elektroden verwendet. Dabei wird der Schädelknochen vom Nasion bis zum Inion entlang der Schädeldecke gemessen und diese Strecke als 100 angenommen. Danach teilt man diesen in 10-Prozent in Richtung Inion, dann vier weitere 20-Prozent-Schritte und am Schluss wieder 10-Prozent auf. Genauso verfährt man auf der Linie zwischen den beiden präaurikulären Punkten, sodass Koordinaten gebildet werden und anhand dessen die Elektroden auf der Kopfhaut angebracht werden.

Die EEG-, EOG- und EMG-Elektroden in der vorliegenden Studie wurden wie in der Abbildung 6 und 7 angelegt. Bei der Standard-EEG-Aufzeichnung wurden die 4 Hauptelektroden zentral Mitte links (C3), zentral Mitte rechts (C4), aurikulär links (A1) und aurikulär rechts (A2) angebracht, während die 2 EOG-Elektroden äußerer oberer Augenwinkel links (E1) und äußerer unterer Augenwinkel rechts (E2) angebracht wurden. Zudem wurden 3 EMG-Elektroden am rechten Mundwinkel, linken Mundwinkel und Kinns Spitze, sowie 2 EKG-Elektroden am rechten subclavikulären und fünften axillären intercostalen Raum angebracht (Rechtschaffen und Kales, 1968). Bei diesem Versuch wurden Elektroden erweitert über den ganzen Schädel nach 10-20-System wie in der Abbildung 6 angebracht.

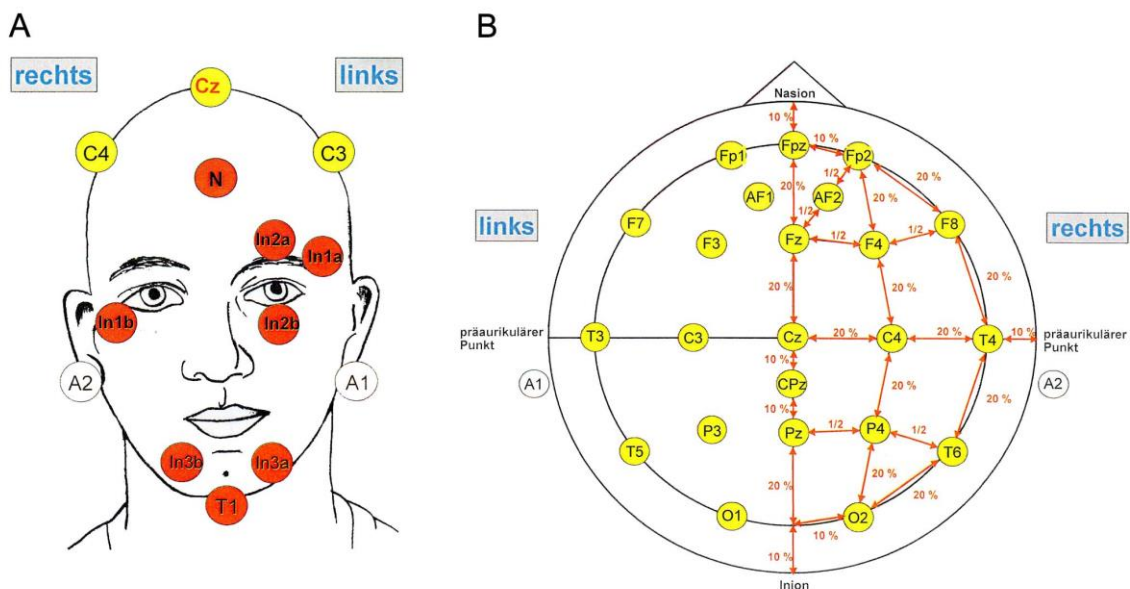


Abbildung 5. Elektrodenpositionierung eines EOGs (Elektrookulogramm), EMGs (Elektromyogramm) und 32-Kanal-EEGs (Elektroenzephalogramm). A. Darstellung der EOG- und EMG-Elektrodenpositionierung (Orange) sowie Teil der EEG-Elektroden (Gelb). In1b=EOG rechts, In1a=EOG links, In2a=EOG oben, In2b=EOG unten, In3a/In3b/T1=EMG/Kinn, N=Stirn, C=zentral (*engl. central*), z=null/Mittellinie (*engl. zero*), A=aurikular. B. Darstellung der 32-Kanal-EEG-Elektrodenpositionierung. F=frontal, T=temporal, C=zentral (*engl. central*), P=parietal, O=okzipital, z=null/Mittellinie (*engl. zero*), A=aurikular.

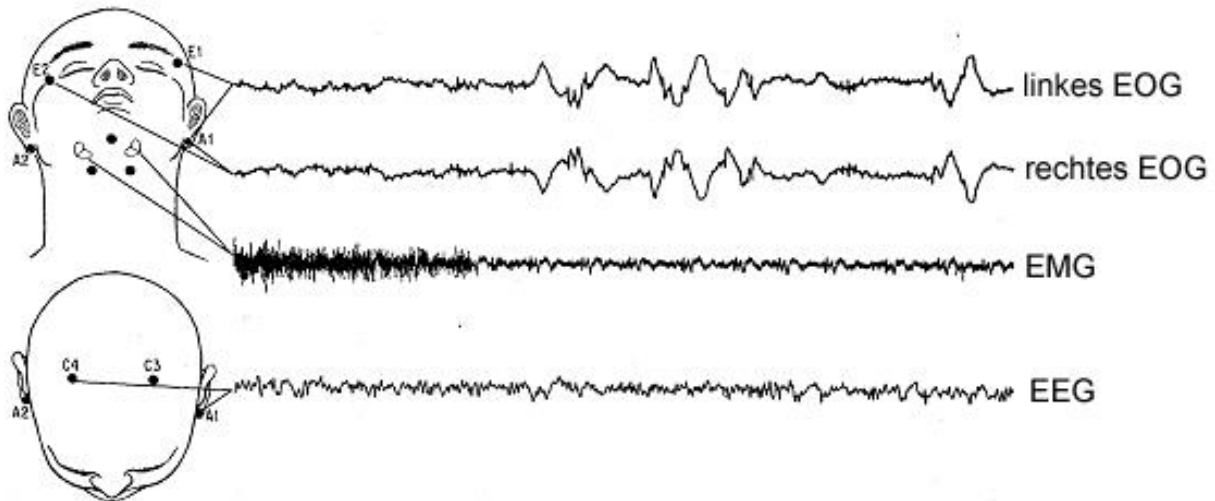


Abbildung 6. Vereinfachte Elektrodenpositionierung für die polysomnographische Schlafableitung mit Elektrookulogramm (EOG), Elektromyogramm (EMG) und Elektroenzephalogramm (EEG). E1= äußerer oberer Augenwinkel links, E2= äußerer unterer Augenwinkel rechts, A1=aurikular links, A2=aurikular rechts, C3=zentral links, C4=zentral rechts (modifiziert nach Rechtschaffen und Kales, 1968).

5. Datenanalyse

5.1. Auswertung der behavioralen Daten

In dieser Arbeit wird die Annahme vorausgesetzt, dass Gedächtnissportler deutlich mehr Informationen lernen können als Kontrollprobanden, und daher auch stärker von potentiellen Lerneffekten auf den Schlaf betroffen sein sollten. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch die Effekte einer intensiven Lernphase auf den Schlaf, nicht jedoch eine detaillierte Analyse der Gedächtnisleistungen selbst im Fokus stehen, werden im Folgenden lediglich vier exemplarische Gedächtnistests näher beleuchtet, um den Leistungsunterschied zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden zu demonstrieren: *Directed Forgetting*, *False Memories*, Spielkarten, und Personendaten.

Im *Directed Forgetting* Test wurden alle am folgenden Morgen korrekt erinnerten Wörter unabhängig von ihrer Instruktion ausgewertet, da der Fokus der Studie auf der absoluten Menge der enkodierten Information lag. Der differenzielle *Directed Forgetting*-Effekt wird im Rahmen einer anderen Arbeit beleuchtet. Ebenso wurden im *False Memories* Test ausschließlich die am folgenden Morgen korrekt erinnerten Wörter im Vergleich zu den falsch erinnerten Distraktoren und Critical Lures ausgewertet und der d-prime-Wert (d') gemäß Signalentdeckungstheorie gebildet.

Der *False Memories*-Effekt im engeren Sinne wird im Rahmen einer anderen Arbeit beleuchtet. Für den Personendaten-Test wurde jede korrekt erinnerte Information bzgl. der Variablen Vorname, Nachname, Geburtsdatum, Beruf, Straßename, Hausnummer, Stadt jeweils mit einem Punkt gewertet und diese entsprechend zu einem Gesamtwert addiert. Für den Spielkartentest wurde jede korrekt erinnerte Spielkartenposition gewertet.

5.2. Visuelle Auswertung der EEG-Daten

Die EEG-Aufzeichnungen wurden durch erfahrene und unabhängige Bewerter, die das Studienprotokoll nicht kannten, ausgewertet. Diese erfolgten visuell am Bildschirm basierend auf den Standardkriterien von Rechtschaffen und Kales (1968), bei denen jede Epoche von 30 Sekunden Dauer beurteilt wird. Die EEG-Kriterien für die Auswertung von Schlafstadien beruhen auf den Ableitungen von C4/A1 oder C3/A2. Die Schlafparameter wurden für die Zeit im Bett (entspricht der Gesamtnacht, d.h. 480 min) ermittelt. Alle Werte werden in Minuten angegeben. Zur Schlafstadieneinteilung siehe Abschnitt A 1.10. Die polysomnographische Ableitung erfolgte über 8 Stunden zwischen 23:00 Uhr ("Licht aus") und 07:00 Uhr ("Licht an") am nächsten Morgen. Die folgenden Variablen wurden erhoben und analysiert: Dauer (in Minuten) der Schlafstadien 1-4, Tiefschlaf (SWS = Stadium 3+4), REM-Schlaf und Wachheit.

5.3. Quantitative EEG-Auswertung

Die konventionelle Methode der Schlafauswertung nach Rechtschaffen und Kales, die zur Einteilung des Schlafstadiums verwendet wird, hat den Nachteil, dass quantitative Veränderungen (z.B. der Anteil der langsamen Wellen aus dem Delta-Frequenzbereich der EEG-Aktivität) durch die Schlafstadien-Klassifikation (Stadium 1, 2, 3 und 4) in semi-quantitativen Unterschieden ausgedrückt werden. Es entsteht durch ein willkürlich festgesetztes quantitatives Kriterium eine Einteilung, die, bezüglich des tatsächlichen Anteils der Delta-EEG-Aktivität, ausgedrückt durch die Menge an niederfrequenten Delta-Wellen durch einen Informationsverlust behaftet ist (Bonnet, Carley et al., 1992; Weikel, 2005). Damit dieses Problem behoben werden

konnte, wurde der Datensatz zusätzlich mittels einer quantitativen EEG-Analyse, der sog. Spektralanalyse, ausgewertet. Diese Methode unterteilt den unregelmäßigen Kurvenverlauf des EEGs in einzelne Frequenzanteile. Daraus lässt sich dann der Anteil der Gehirnaktivität, z.B. der Delta-Wellenanteil an der gesamten EEG-Aktivität im Verlauf der Nacht bestimmen. Durch diese Spektralanalyse kann eine Mikrostruktur des Schlaf-EEGs beschrieben werden.

Die spektralanalytische Auswertung mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) wurde auf die Ableitungen C4/A1 und C3/A2 angewendet. Die EEG-Aktivität wurde in Rechteckfenstern für konsekutive und nichtüberlappende 2-sek-Miniepochen, die einen Abstand von 1,0 Sekunden hatten, analysiert. Frequenzen unter 0,53 Hz sowie über 30 Hz wurden nicht ausgewertet. Dann wurde die so ermittelte spektrale Power in bestimmte Frequenzbänder gemittelt: Delta (0,5 – 4,0 Hz), Theta (4,0 – 8,0 Hz), Alpha (8,0 – 12,0 Hz), Sigma (12,0 – 16,0 Hz) und Beta (16,0 – 20,0 Hz). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird primär auf die Delta- und Sigmaaktivität fokussiert, da sich diese in zahlreichen Studien für die schlaf-assoziierte Gedächtniskonsolidierung als relevant erwiesen haben (Rasch und Born, 2013).

5.4. Auswertung der Schlafspindeln

Um die Schlafspindeln zu analysieren, wurde ein neu entwickelter Algorithmus verwendet, der diese im Schlaf-EEG automatisch erkannte (Adamczyk, Genzel et al. 2015). Dieser Algorithmus wurde mit dem von Anderer et al. (2005) verglichen und validiert. Vor der Schlafspindelerkennung wurde das Schlaf-EEG automatisch von Artefakten bereinigt. Das betraf insbesondere Signalperioden mit sehr vielen Muskelartefakten sowie Segmente mit dominierender Alpha-Aktivität, da diese zu falsch-positiver Schlafspindelerkennung führen kann. Die Schlafspindelerkennung erfolgte anschließend wie folgt: Die Signalamplitude eines EEGs kann zwischen Probanden und zwischen EEG-Kanälen variieren. Deshalb muss der Schwellenwert des EEG-Signals zwecks Schlafspindelerkennung individuell für jeden der EEG-Kanäle eingestellt werden. Für die Berechnung des Schwellenwertes wurden nur die als Schlafstadium 2 ausgewerteten Epochen berücksichtigt. Das EEG-Signal wurde durch einen Butterworth Band-pass Filter in den Frequenzbereich 3,3 und 20,2 Hz gefiltert. Für jeden 0,25 Sekunden-Abschnitt mit gefiltertem Signal wurde der

quadratische Mittelwert (RMS, engl. *Root Mean Square*) berechnet. Zwei Schwellenwerte wurden für die Schlafspindelerkennung festgelegt: Die Sigma-Aktivität (SA), die auf das 3-fache des mittleren RMS eingestellt wurde, und der Sigma-Peak (SP), der auf das 4,5-fache des mittleren RMS eingestellt wurde. Um die Schlafspindeln zu erkennen, wurde die kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT, engl. *continuous wavelet transform*; Addison 2002) verwendet. Ein etablierter Algorithmus zur Spindelanalyse (Zygierewicz, Blinowska et al. 1999; Latka, Kozik et al. 2005; Wamsley, Tucker et al. 2012) prüfte Spindelereignisse im Frequenzbereich von 9–16 Hz. Eine Schlafspindel wurde erkannt, wenn das Ergebnis der CWT die Sigma-Aktivität über einem Zeitraum von mindestens einer halben Sekunde und den Sigma-Peak mindestens einmal überschritt. Für den Vergleich zwischen Experimental- und Kontrollnacht bzw. zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden wurde sowohl die absolute Anzahl an Spindeln als auch die relative Spindeldichte erhoben.

5.5. Statistische Auswertung

5.5.1. Statistische Auswertung der behavioralen Daten.

Zur Kontrolle der Annahme, dass Gedächtnissportler deutlich mehr Informationen lernen können als Kontrollprobanden wurden die Ergebnisse der vier Gedächtnistests *Directed Forgetting*, *False Memories*, Personendaten, und Spielkarten für beide Probandengruppen jeweils mittels einfacher t-Tests verglichen. Als Signifikanzniveau wurde ein Alpha von $p=0,05$ gewählt.

5.5.2. Statistische Auswertung der Schlafstadien.

Zur Analyse des Effekts der Lernphase auf die Schlafstadien wurde eine multivariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor „Bedingung“ (Lernen vs. Kontrolle) und dem Zwischensubjektfaktor „Gruppe“ (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden) als unabhängigen Variablen und den Schlafstadien S1, S2, SWS, REM und wach als abhängigen Variablen gerechnet. Für den Fall signifikanter Effekte waren univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung

und entsprechende Posthoc-Tests geplant. Als Signifikanzniveau wurde ein Alpha von $p=0,05$ gewählt.

5.5.3. Statistische Auswertung der quantitativen Schlafdaten.

Zur Analyse des Effekts der Lernphase auf die quantitativen Schlafdaten wurde jeweils eine univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor „Bedingung“ (Lernen vs. Kontrolle) und dem Zwischensubjektfaktor „Gruppe“ (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden) als unabhängigen Variablen und der Delta- bzw. Sigma-Power als abhängigen Variablen gerechnet. Für den Fall signifikanter Effekte waren entsprechende Posthoc-Tests geplant. Als Signifikanzniveau wurde ein Alpha von $p=0,05$ gewählt.

5.5.4. Statistische Auswertung der Schlafspindeln.

Zur Analyse des Effekts der Lernphase auf die Spindelaktivität wurde jeweils eine univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor „Bedingung“ (Lernen vs. Kontrolle) und dem Zwischensubjektfaktor „Gruppe“ (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden) als unabhängigen Variablen und der absoluten Spindelzahl bzw. der relativen Spindeldichte als abhängigen Variablen gerechnet. Für den Fall signifikanter Effekte waren entsprechende Posthoc-Tests geplant. Als Signifikanzniveau wurde ein Alpha von $p=0,05$ gewählt.

D. Ergebnisse

1. Behaviorale Daten

Aufgrund eines technischen Fehlers wurden für zwei Gedächtnissportler die Anzahl der erinnerten Werte nicht gespeichert. Wie erwartet zeigten Gedächtnissportler bei den analysierten Lernaufgaben deutlich bessere Gedächtnisleistungen als die Kontrollprobanden (s. Abb. 8 und 9). Insbesondere beim Spielkarten-Test, mit dem Gedächtnissportler in der Weltmeisterschaft als einer von mehreren Disziplinen konfrontiert werden, zeigten diese eine hochsignifikant bessere Leistung ($t_{28}=9,68$; $p<0,001$), jedoch auch in den Tests Personendaten ($t_{30}=3,53$; $p=0,001$), *Directed Forgetting* ($t_{30}=8,40$; $p<0,001$) und *False Memories* ($t_{30}=2,80$ $p=0,009$) übertrafen sie die Kontrollprobanden deutlich.

Behaviorale Daten

Lernaufgaben	Kontrollprobanden		Gedächtnissportler	
	M	SD	M	SD
Spielkarten: Erinnerte Spielkarten (#)	15,60	7,70	170,60	63,70
Personendaten: Erinnerte Personendaten (#)	42,90	17,50	84,20	40,60
<i>Directed Forgetting</i> (Instruiertes Vergessen): Erinnerte Wörter (#)	15,90	10,10	43,60	8,40
<i>False Memories</i> (Falsche Erinnerung): d-prime (#)	0,75	0,50	1,44	0,86

Tabelle 2. Behaviorale Daten. M=Mean, SD=Standard Abweichung (engl. *standard deviation*), #=Anzahl.

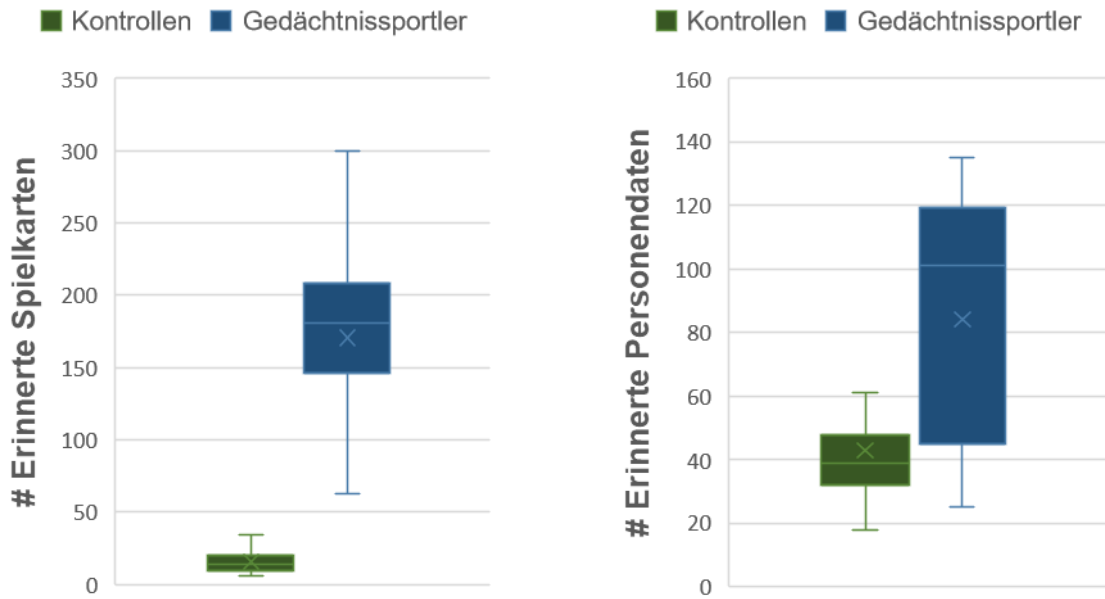


Abbildung 7. Vergleich der Leistungen von Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden (Kontrollen) in den Tests Spielkarten und Personendaten. #=Anzahl, X=Mean.

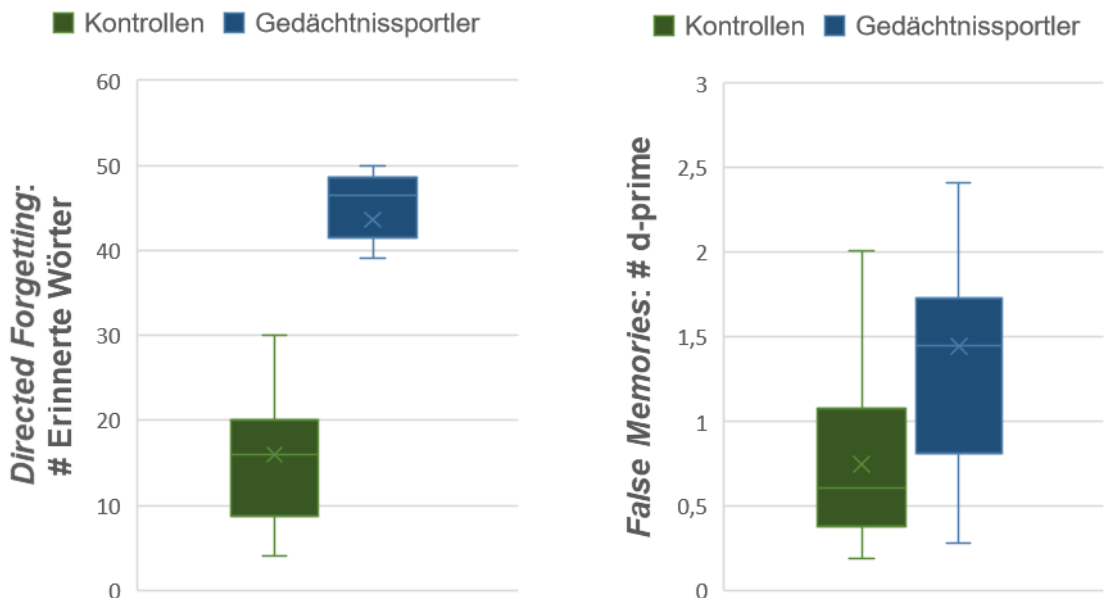


Abbildung 8. Vergleich der Leistungen von Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden (Kontrollen) in den Tests *Directed Forgetting* und *False Memories*. #=Anzahl, X=Mean.

2. Schlafstadien

Aufgrund eines technischen Problems konnte die Spektralanalyse lediglich für jeweils $n=14$ Gedächtnissportler und Kontrollprobanden berechnet werden. Die multivariate Varianzanalyse ergab weder einen Haupteffekt der Gruppe (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden, $F_{5,26}=1,47$, $p=0,23$) noch der Experimentalbedingung (Lernen vs. Kontrollbedingung, $F_{5,26}=1,37$, $p=0,23$), und auch keine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F_{5,26}=1,26$, $p=0,31$). Entsprechend wurde auf weiterführende univariate Varianzanalysen und Posthoc-Tests verzichtet. Weder die Eigenschaft, erfolgreicher Gedächtnissportler zu sein, noch eine intensive Lernphase in den Stunden vor dem Schlafengehen scheint somit einen signifikanten Effekt auf die Schlafstadien auszuüben.

Schlafstadien

Schlafstadium	Kontrollprobanden				Gedächtnissportler			
	Kontrollnacht		Studiennacht		Kontrollnacht		Studiennacht	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
S1 (Minuten)	32,41	11,94	32,34	11,30	41,44	19,56	37,78	15,22
S2 (Minuten)	233,25	31,58	219,81	34,45	210,50	31,22	211,06	45,17
SWS (Minuten)	86,22	37,20	88,22	42,18	82,63	35,22	87,31	32,97
REM (Minuten)	93,59	16,43	95,41	18,38	93,50	26,55	82,75	19,65
Wach (Minuten)	32,59	18,50	42,72	22,78	49,78	36,32	58,97	53,02

Tabelle 3. Schlafstadien. S1=Stadium 1, S2=Stadium 2, SWS=Slow wave sleep, REM=Rapid eye movement-Schlaf, M=Mean, SD=Standard Abweichung (engl. *standard deviation*).

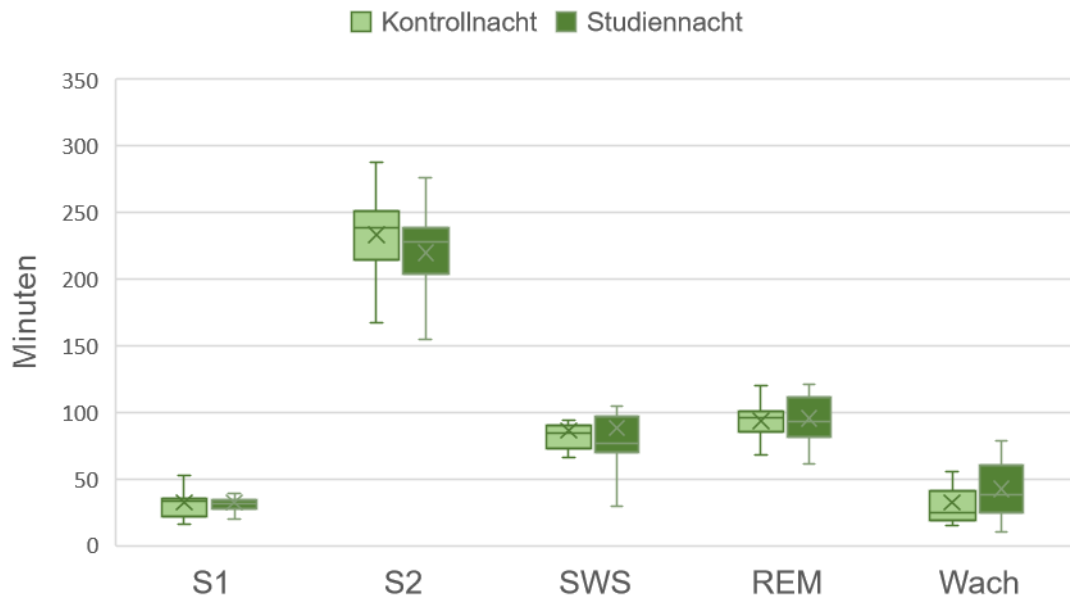


Abbildung 9. Kontrollprobanden: Die Schlafstadien vor (Kontrollnacht) und nach den intensiven Lernaufgaben (Studiennacht). S1=Stadium 1, S2=Stadium 2, SWS=Slow wave sleep, REM=Rapid eye movement-Schlaf, X=Mean.

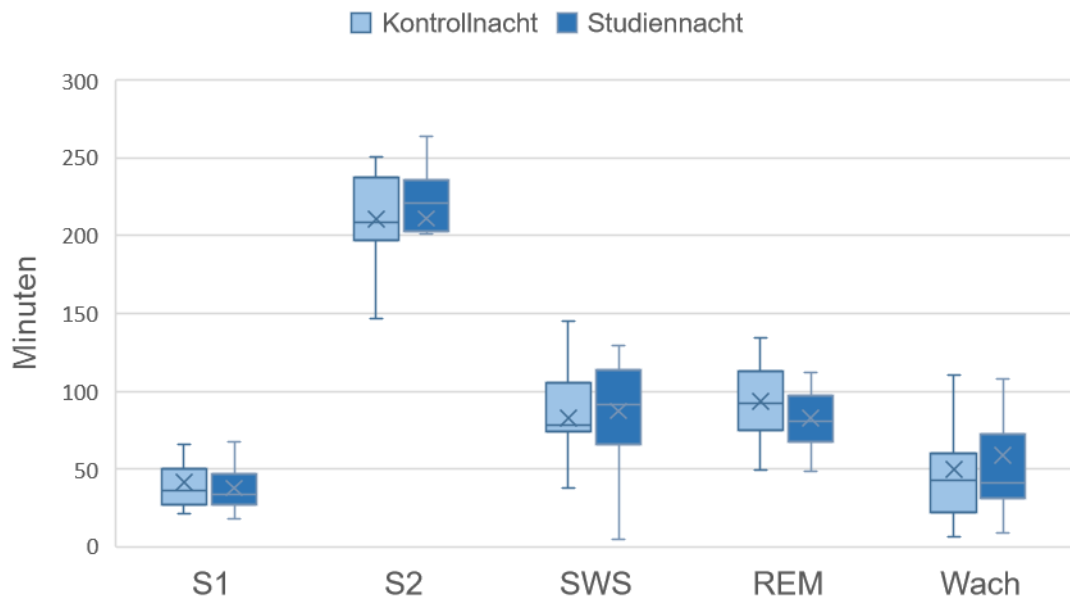


Abbildung 10. Gedächtnissportler: Die Schlafstadien vor (Kontrollnacht) und nach den intensiven Lernaufgaben (Studiennacht). S1=Stadium 1, S2=Stadium 2, SWS=Slow wave sleep, REM=Rapid eye movement-Schlaf, X=Mean.

Auch bei Fokussierung auf die Kontrollnacht konnte kein Unterschied zwischen der Kontrollgruppe und der Gedächtnissportgruppe in irgendeinem Schlafstadium gefunden werden.

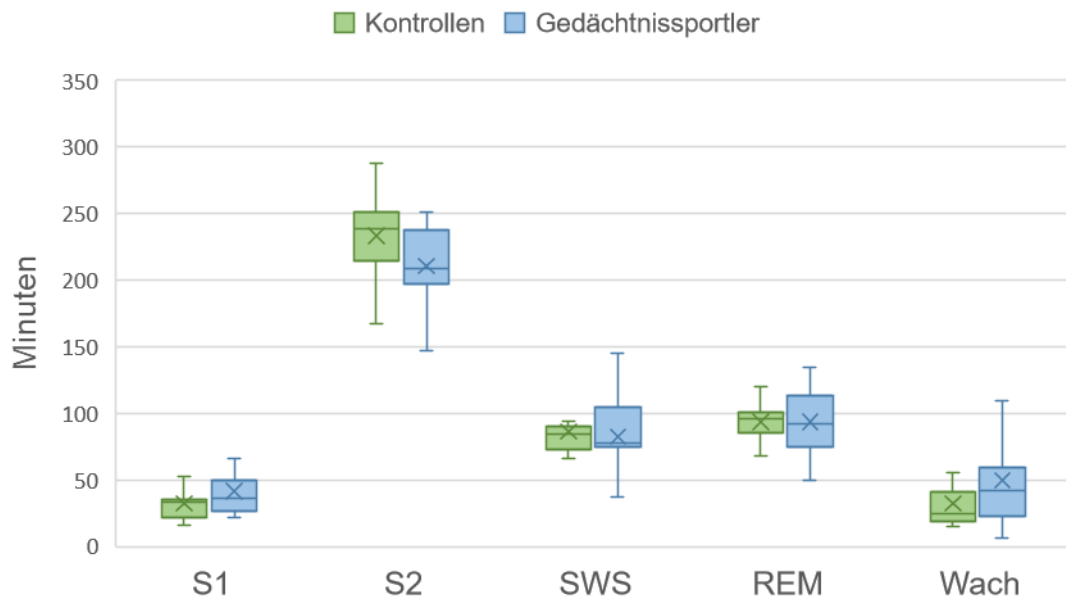


Abbildung 11. Der Vergleich zwischen Kontrollprobanden (Kontrollen) und Gedächtnissportler: Die Schlafstadien in der Kontrollnacht. S1=Stadium 1, S2=Stadium 2, SWS=Slow wave sleep, REM=Rapid eye movement-Schlaf, X=Mean.

3. Spektraldaten

Die Varianzanalyse für die Delta-Aktivität ergab weder einen Haupteffekt der Gruppe (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden, $F_{1,26}=0,90$, $p=0,35$) noch der Experimentalbedingung (Lernen vs. Kontrollbedingung, $F_{1,26}=0,01$, $p=0,91$), und auch keine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F_{1,26}=0,11$, $p=0,74$). Ebenso ergab die Varianzanalyse für die Sigma-Aktivität keinen Haupteffekt der Gruppe (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden, $F_{1,26}=0,59$, $p=0,45$) oder der Experimentalbedingung (Lernen vs. Kontrollbedingung, $F_{1,26}=1,62$, $p=0,22$), und auch keine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F_{1,26}=0,05$, $p=0,84$). Entsprechend wurde in beiden Fällen auf Posthoc-Tests verzichtet. Weder die Eigenschaft, erfolgreicher Gedächtnissportler zu sein, noch eine intensive Lernphase in den Stunden vor dem Schlafengehen scheint somit einen signifikanten Effekt auf die Delta- oder Sigmaaktivität im Schlaf auszuüben.

Spektraldaten

Spektraldaten	Kontrollprobanden				Gedächtnissportler			
	Kontrollnacht		Studiennacht		Kontrollnacht		Studiennacht	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Delta (μV^2)	7404,79	603,07	7426,00	645,71	7213,86	663,93	7171,50	759,42
Sigma (μV^2)	478,29	139,81	509,14	164,99	446,14	107,55	468,21	129,61

Tabelle 4. Spektraldaten. M=Mean, SD=Standard Abweichung (engl. *standard deviation*), μV^2 =Mikrovolt Quadrat.

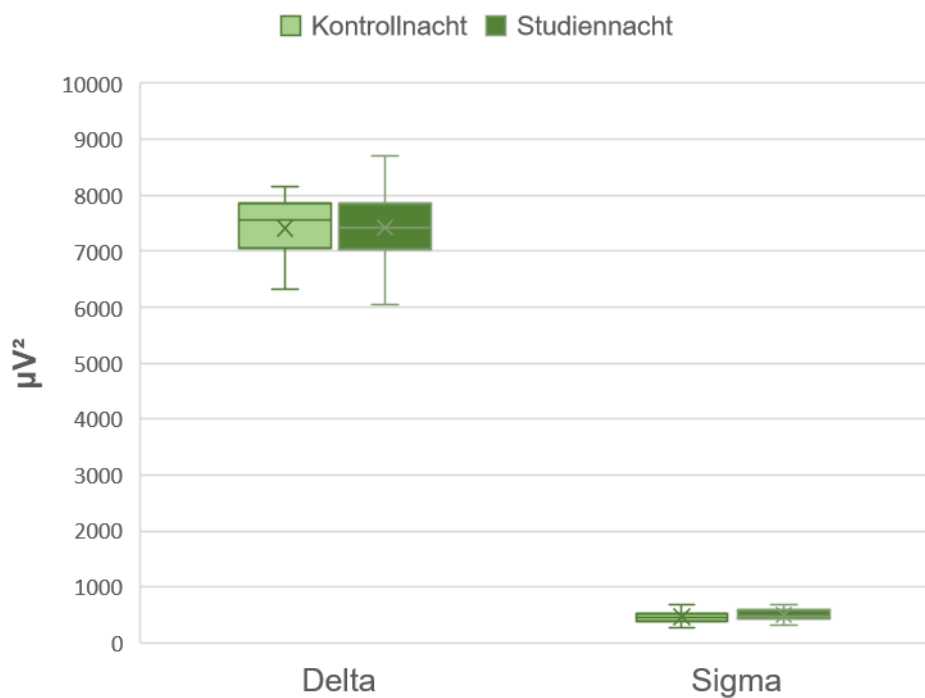


Abbildung 12. Kontrollprobanden: Die Menge von Delta- und Sigma-Wellen vor (Kontrollnacht) und nach den intensiven Lernaufgaben (Studiennacht). μV^2 =Mikrovolt Quadrat, X=Mean.

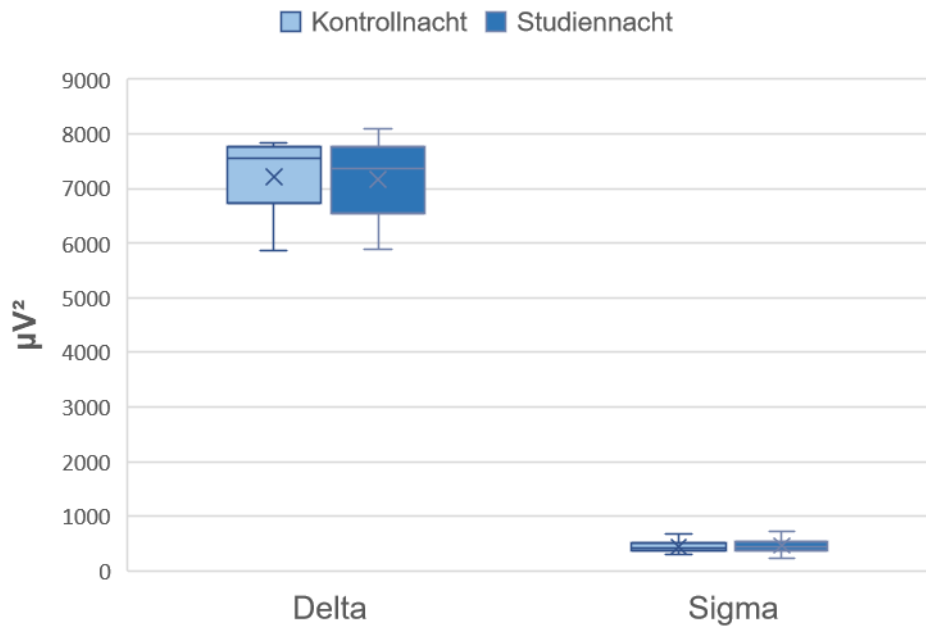


Abbildung 13. Gedächtnissportler: Die Menge von Delta- und Sigma-Wellen vor (Kontrollnacht) und nach den intensiven Lernaufgaben (Studiennacht). μV^2 =Mikrovolt Quadrat, X=Mean.

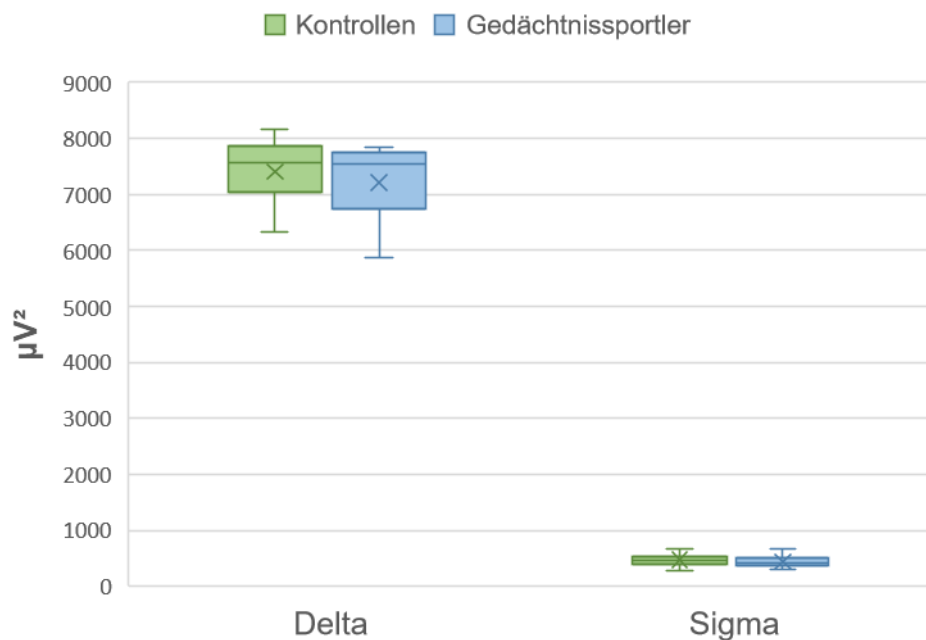


Abbildung 14. Der Vergleich zwischen Kontrollprobanden (Kontrollen) und Gedächtnissportler: Die Menge von Delta- und Sigma-Wellen in der Kontrollnacht. μV^2 =Mikrovolt Quadrat, X=Mean.

4. Schlafspindeln

Aufgrund eines technischen Problems konnte die Spektralanalyse lediglich für $n=15$ Gedächtnissportler und $n=14$ Kontrollprobanden berechnet werden. Die Varianzanalyse für die absolute Spindelanzahl ergab weder einen Haupteffekt der Gruppe (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden, $F_{1,27}=3,78$, $p=0,06$) noch der Experimentalbedingung (Lernen vs. Kontrollbedingung, $F_{1,27}=0,22$, $p=0,65$), und auch keine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F_{1,27}=0,23$, $p=0,64$). Ebenso ergab die Varianzanalyse für die relative Spindeldichte keinen Haupteffekt der Gruppe (Gedächtnissportler vs. Kontrollprobanden, $F_{1,27}=2,86$, $p=0,10$) oder der Experimentalbedingung (Lernen vs. Kontrollbedingung, $F_{1,27}=1,91$, $p=0,18$), und auch keine Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F_{1,27}=0,25$, $p=0,62$). Entsprechend wurde in beiden Fällen auf Posthoc-Tests verzichtet. Der Haupteffekt der Gruppe lag für beide Spindelmaße im statistischen Trendbereich, jedoch entgegengesetzt zur Hypothese: Gedächtnissportler wiesen tendenziell – absolut und relativ – weniger Schlafspindeln auf im Vergleich zu Kontrollprobanden. Weder die Eigenschaft, erfolgreicher Gedächtnissportler zu sein, noch eine intensive Lernphase in den Stunden vor dem Schlafengehen scheint somit einen signifikant positiven Effekt auf die Schlafspindelaktivität auszuüben.

Schlafspindeln

Parameter	Kontrollprobanden				Gedächtnissportler			
	Kontrollnacht		Studiennacht		Kontrollnacht		Studiennacht	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Schlafspindeln (#)	1553,36	656,29	1552,93	642,51	1088,87	596,92	1125,53	609,48
Schlafspindeln/ NREM Epoche (#)	2,42	0,97	2,53	0,95	1,85	0,98	1,90	1,00

Tabelle 5. Schlafspindelraten. NREM=Non rapid eye movement-Schlaf, M=Mean, SD=Standard Abweichung (engl. *standard deviation*), #=Anzahl.

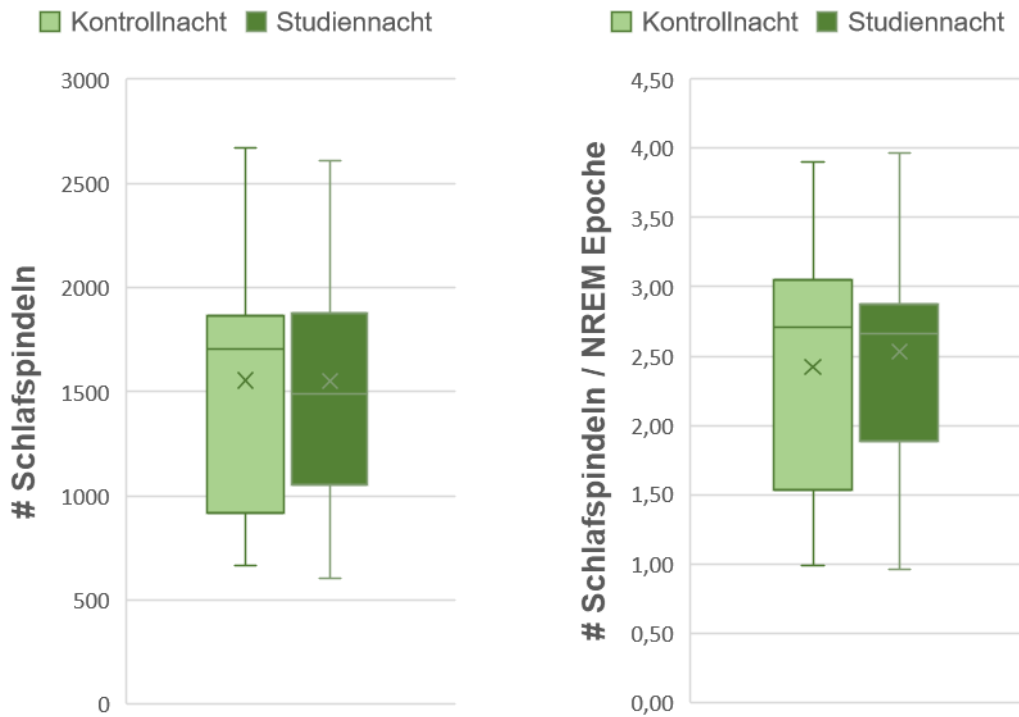


Abbildung 15. Kontrollprobanden: Die absolute Spindelzahl und Spindeldichte vor (Kontrollnacht) und nach den intensiven Lernaufgaben (Studiennacht). NREM=Non rapid eye movement-Schlaf, #=Anzahl, X=Mean.

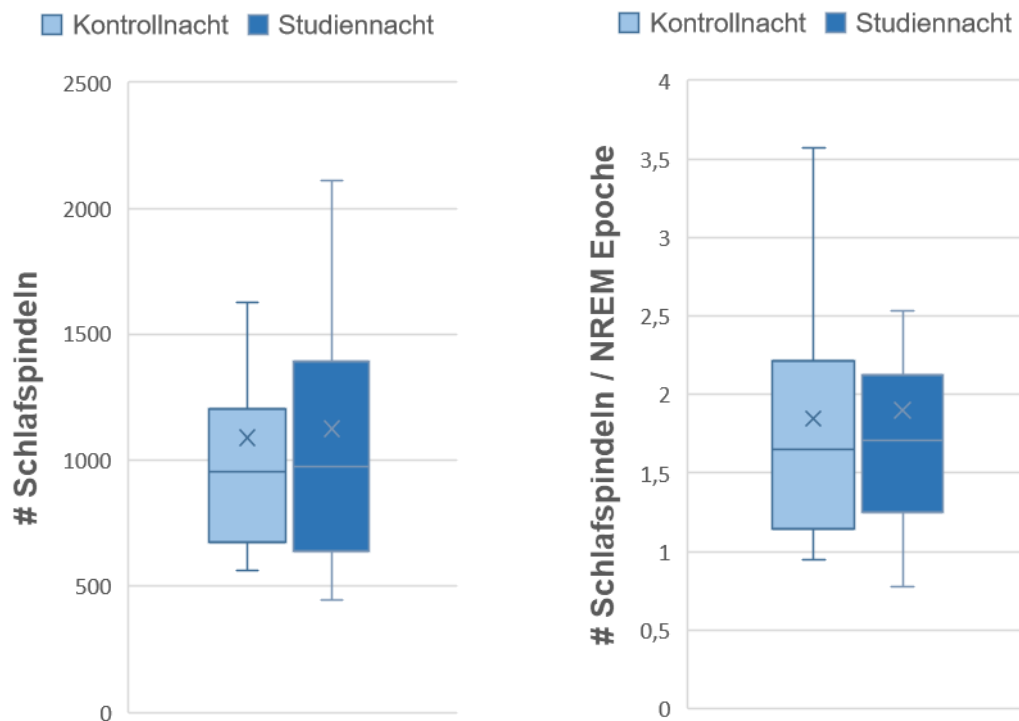


Abbildung 16. Gedächtnissportler: Die absolute Spindelzahl und Spindeldichte vor (Kontrollnacht) und nach den intensiven Lernaufgaben (Studiennacht). NREM=Non rapid eye movement-Schlaf, #=Anzahl, X=Mean.

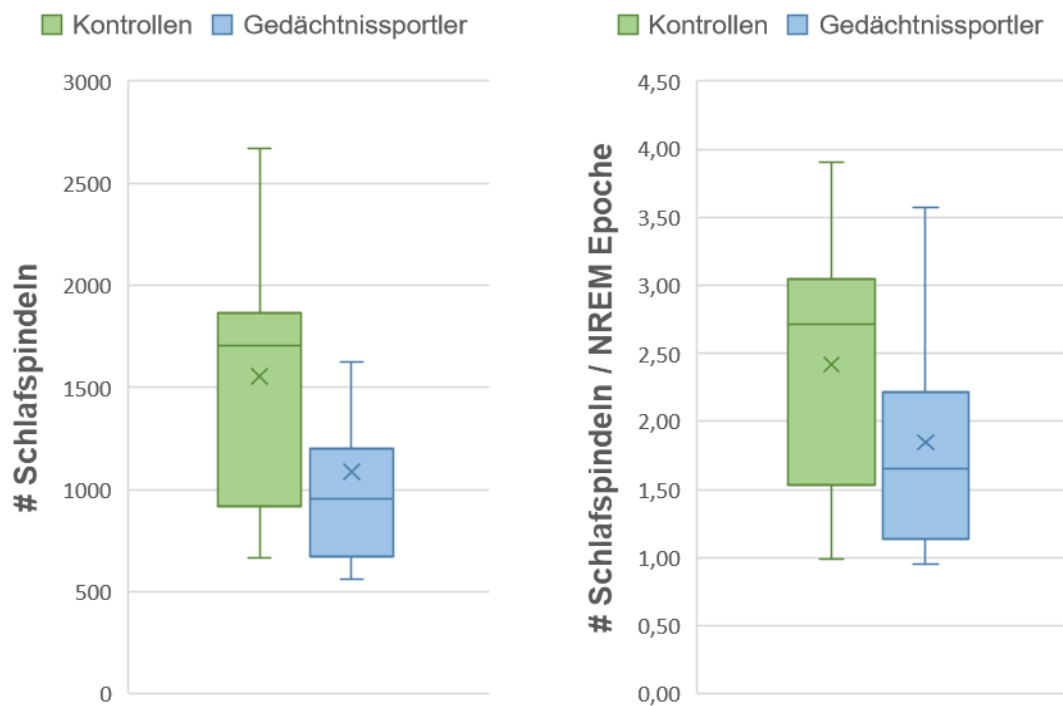


Abbildung 17. Der Vergleich zwischen Kontrollprobanden (Kontrollen) und Gedächtnissportler: Die absolute Spindelzahl und Spindeldichte in der Kontrollnacht. NREM=Non rapid eye movement-Schlaf, #=Anzahl, X=Mean.

E. Diskussion

In der vorliegenden Studie wurden die Auswirkungen einer intensiven Lernphase auf das Schlaf-EEG von Gedächtnissportlern und normalen Probanden untersucht. Bei den einzelnen Tests schnitten die Gedächtnissportler im Vergleich zu den Kontrollprobanden deutlich besser ab. Die polysomnographisch erhobenen Schlafdaten ergaben jedoch keinen wesentlichen Unterschied in der Verteilung von Schlafphasen, Spindel- und Spektraldaten. Dabei wurde die Kontroll- und Studiennacht innerhalb einer Gruppe sowie die Kontrollnacht der beiden Gruppen verglichen.

1. Schlaf-EEG in der Lern- und Kontrollbedingung.

Die Studie zeigte unerwartet keine signifikanten Unterschiede in den Schlafdaten zwischen der Kontrollnacht und Studiennacht, sowohl bei der Kontrollgruppe als auch bei der Gedächtnissportlergruppe. Hiermit konnten die eigenen Daten den bisher in anderen Studien beobachteten Zusammenhang zwischen Lern- und Schlafprozessen nicht bestätigen.

Frühe Studien zum Zusammenhang zwischen Schlaf und Gedächtnis legten nahe, dass die durch SWS dominierte erste Nachthälfte mit der Konsolidierung des deklarativen Gedächtnisses assoziiert war, während die mit REM-Stadium dominierte zweite Nachthälfte ein wichtiger Faktor für die prozedurale Gedächtniskonsolidierung war. Hierfür unterteilten Plihal und Born (1997 und 1999a) die Untersuchungsnacht in zwei Hälften und die Probanden lernten vor dem Schlaf verbale Aufgaben (deklaratives Gedächtnis) und motorische Aufgaben (prozedurales Gedächtnis). Während die Probanden den Abruf von verbalen Lernaufgaben nach der ersten Nachthälfte (SWS-/Tiefschlafstadium) besser wiederrufen konnten, lieferten die Probanden den Abruf von motorischen Lernaufgaben nach der zweiten Nachthälfte (REM-Stadium) besseren Ergebnisse. Zwar konnten neuere Studien diese Zwei-Prozess-Hypothese nicht bestätigen (Genzel, Kroes et al. 2014); jedoch haben zahlreiche Studien die generell unterstützende Wirkung des Schlafs auf prozedurale sowie auch deklarative Gedächtniskonsolidierung im Vergleich mit dem Lernprozess

ohne Schlaf repliziert (Übersicht: Diekelmann und Born 2010; Rasch und Born 2013). Vermehrte Schlafspindeln wurden nach intensiven deklarativen Lernaufgaben beobachtet (Gais, Molle et al. 2002; Clemens, Fabo et al. 2005): Dieser Effekt wurde sowohl im Tiefschlaf wie auch im Stadium 2 beobachtet (Ferini-Strambi et al. 2004; Schabus, Gruber et al. 2004; Cox, Hofman et al. 2012; Ruch, Markes et al. 2012; Genzel, Kroes et al. 2014). Eine prozedurale Lernaufgabe konnte in der Studie von Fogel und Smith (2006) aber auch Stadium 2 und Schlafspindeln triggern. Zudem berichteten Walker, Brakefield et al. (2002), dass die hohe Zahl des Schlafspindelreichen NonREM-Stadiums 2 im zurückliegenden Schlaf mit dem Erwerb einer motorischen Lernfähigkeit korrelierte. Die Studie von Holz et al. (2012) zeigte jedoch, dass der Abruf von deklarativen Gedächtnisinhalten nach einem Lernprozess am Nachmittag (7,5 Stunden-Intervall zum Schlaf) signifikant besser als direkt vor dem Schlaf war. Weitere Studien (Schabus, Hödlmoser et al. 2005; Tucker, Hirota et al. 2006; Tucker und Fishbein 2008) zeigten, dass der Mittagsschlaf die deklarative Gedächtniskonsolidierung verbesserte, nur wenn SWS-Aktivität vermehrt beobachtet wurde. Im Gegensatz dazu konnte die Studie von Backhaus und Junghanns (2006) keine Verbesserung der deklarativen Gedächtnisleitung trotz vermehrter SWS-Aktivität beim Mittagsschlaf zeigen. Schüler zwischen 14 und 19 Jahren, die einen unzureichenden Schlaf hatten, hatten eher das Gelernte innerhalb einer kurzen Zeit vergessen (Huang, Deshpande et al. 2016). Ähnliches Ergebnis zeigte sich bei Schülern zwischen 10 und 14 Jahren (Potkin und Bunney 2012). Welche Art von Gedächtnis (prozedurales oder deklaratives) und in welchen Stadien oder EEG-Mikroprozessen während des Schlafes konsolidiert wird, bleibt umstritten. Warum diese Konsolidierungsprozesse bevorzugt durch Schlaf gefördert werden oder ausschließlich auf den Schlaf beschränkt sind, bleibt ebenfalls unklar. Das eigene nicht signifikante Ergebnis bringt erneut die Frage auf, wie eng Schlaf und Gedächtniskonsolidierung assoziiert sind, bzw. wie sensibel auf Skalp-Ebene erhobene EEG-Messungen für potentielle Konsolidierungsprozesse sind.

Eine Schwierigkeit sensibler Messungen potenzieller Konsolidierungsprozesse ist es, standardisierte Schlaf- sowie Testbedingungen zu erschaffen, da ansonsten die Ergebnisse bei unterschiedlichen Bedingungen sehr variieren können. Außerdem sollen die hormonellen Einflüsse und während des Schlafes veränderte Hormonkonzentrationen beachtet werden, da diese den Schlaf sowie die Schlafregulation beeinflussen können. Biologische und technische Einschränkungen

verursachen oft uneinheitliche Ergebnisse, die nicht verhindert, jedoch minimalisiert werden können.

Die Hormone, die bei der Gedächtniskonsolidierung im nächtlichen Schlaf mitwirken (wie z.B. Kortisol und Wachstumshormon), haben deutlich höhere Aktivität im Vergleich zu den Hormonen, die am Tage ausgeschüttet werden. Diese können den Prozess der schlafabhängigen Gedächtniskonsolidierung und somit auch die Schlafarchitektur beeinflussen (Plihal und Born 1999b; Gais und Born 2004). Die experimentelle Studie von Lupien, Gillin et al. (1999) konnte bei einer intravenösen Hydrokortison-Gabe und somit erhöhter Kortikosteroid-Spiegel eine Verbesserung der Effektivität der Gedächtniskonsolidierung im Schlaf zeigen. Umgekehrt wurde beobachtet, dass der Kortisol-Spiegel durch Schlaf oder Wachheit in der Nacht beeinflusst wird (Späth-Schwalbe, Uthgenannt et al. 1993). Die Studien hierzu ergaben unterschiedliche Ergebnisse. Einerseits wurde bei exogen verabreichtem Glukokortikoid überwiegend eine verbesserte Gedächtniskonsolidierung beobachtet, andererseits zeigten andere Studien einen verschlechterten Abruf des Lerninhaltes bei erhöhten Glukokortikoid-Werten (de Quervain, Roozendaal et al. 2000; Buchanan und Lovallo 2001; Wolf, Convit et al. 2001; Lupien, Wilkinson et al. 2002; Monk und Nelson 2002; de Quervain, Henke et al. 2003; Tops, van der Pompe et al. 2003; Maheu, Joober et al. 2005; Buchanan, Tranel et al. 2006). Eine realistischere Studie ohne exogene Anreicherung, sondern mittels TSST (Trier Social Stress Test (Kirschbaum, Pirke et al. 1993)) konnte zeigen, dass psychosozialer Stress meistens einen eingeschränkten (Kirschbaum, Wolf et al. 1996; Lupien, Gaudreau et al. 1997; Wolf, Schommer et al. 2001; Kuhlmann, Piel et al. 2005), einige aber im Gegensatz dazu einen verbesserten Abruf von Gedächtnisinhalten (Abercrombie, Speck et al. 2006; Beckner, Tucker et al. 2006; Nater, Moor et al. 2007) herbeiführten. In der eigenen Studie wurden die Probanden einer sehr intensiven Lernphase ausgesetzt, die für die Kontrollprobanden sehr ungewöhnlich war. Gedächtnissportler könnten die Lernsituation möglicherweise als gewohnt, jedoch hoch kompetitiv empfunden haben. Beides könnte mit Auswirkungen auf die Stresshormonsekretion verbunden sein, die Effekte auf den Schlaf haben könnte. Die Tatsache, dass die Schlafdaten der eigenen Untersuchung keine signifikanten Unterschiede zeigen, erlaubt grundsätzlich zwei verschiedene Interpretationen: Entweder haben sich die möglichen stress-assoziierten Störfaktoren nur minimal ausgewirkt, wobei die intensive Lernphase tatsächlich keine Wirkung auf den Schlaf hatte. Oder die

potentiellen Störfaktoren haben exakt in der gegengesetzten Richtung gewirkt und eine potentielle Wirkung des intensiven Lernens überdeckt. Zukünftige Studien sollten zur Klärung diese Frage daher auch psychologische und/oder physiologische Stress erheben.

Die Schlafspindel, die als entscheidendes Element für die deklarative Gedächtniskonsolidierung gilt, wird von verschiedenen Faktoren wie dem Alter bzw. der Maturation, dem zirkadianen Rhythmus, vom Menstruationszyklus, einer Schwangerschaft und von pharmakologischen Mitteln beeinflusst (Übersicht: De Gennaro und Ferrara 2003). Die Spindelaktivität nahm mit dem Alter (Nicolas, Petit et al. 2001; Backhaus, Born et al. 2007; Gui, Li et al. 2017), bei demenzieller Krankheit (Petit, Gagnon et al. 2004) sowie nach einem Schlaganfall (Gottselig, Bassetti et al. 2002) ab. Das Schlafstadium 2 mit den dazugehörigen Schlafspindeln wurde als "Offline-Speicherprozess" bezeichnet. Nach sukzessiven Lernen fanden sich ein Anstieg des Stadiums 2 und der Schlafspindeln (Meier-Koll, Bussmann et al. 1999; Walker, Brakefield et al. 2002; Schabus, Hödlmoser et al. 2006). Umgekehrt wurde ein Abfall der Lernleistung durch Deprivation des Schlafstadiums 2 beobachtet (Smith und MacNeill 1994; Lo, Bennion et al. 2016). Zudem konnten Nader und Smith (2001) eine signifikante Korrelation zwischen der Sigma- und Schlafspindelaktivität mit der IQ-Leistung basierend auf dem Multidimensional Aptitude Battery II Test zeigen (Jackson 1998). Die eigenen Probanden durchliefen vor dem Versuch einen Intelligenz-Test, bei dem es aufgrund eines gezielten Matchings keine größeren Abweichungen zwischen den Gruppen gab (Kontrollprobanden 130.7 ± 11.6 und Gedächtnissportler 129.9 ± 10.4). Insofern war der Intelligenz-Faktor hier nicht relevant.

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen der in Stadium 2 und SWS verbrachten Nacht vor und nach dem intensiven Lernen, sowohl in der Kontrollgruppe als auch in der Gedächtnissportlergruppe. Dieses Ergebnis steht in Kontrast zu den früheren Studien, die zeigen konnten, dass Stadium 2 und Tiefschlafphasen nach intensiver deklarativer Lernaufgaben vermehrt beobachtet wurden (Plihal und Born 1999a). Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass die Kontrollprobanden als auch die Gedächtnissportler durchschnittlich hohen IQ besitzen, sodass die untersuchten Personen die intensiven Lernaufgaben nicht als schwere Aufgaben empfinden und somit keine Veränderung in der Schlaf-EEG

erbringen. Es könnte außerdem vermutet werden, dass bei der Kontrollgruppe die maximale Gedächtniskapazität erreicht wird, weshalb keine weitere Gedächtniskonsolidierung stattfindet; oder dass bei der Gedächtnissportlergruppe die verwendeten Mnemotechniken angeblich keinen Einfluss auf die Schlafarchitektur, weil die schweren Aufgaben durch die Mnemotechnik als einfache Aufgaben aufgefasst werden.

Weitere Forscher berichteten, dass die beobachtete Menge/Dichte von Delta- und Schlafspindeln im Schlaf-EEG innerhalb einer Nacht von der homöostatischen und zirkadianen Situation abhängig war (Dijk und Czeisler 1995; Knoblauch, Martens et al. 2003a; Knoblauch, Martens et al. 2003b). Nicht unwichtig war bei Frauen die Rolle des Menstruationszyklus (Hampson 1990; Ishizuka, Pollak et al. 1994; Driver 1996; Postma, Winkel et al. 1999; Maki, Rich et al. 2002; Farage, Osborn et al. 2008). Zum Beispiel konnten Frauen in der mittleren lutealen Phase deklarative Lernaufgaben nach dem Mittagschlaf besser lösen (Genzel, Kiefer et al. 2012). In der eigenen Studie war sowohl Männer als auch Frauen eingeschlossen. Dabei wurden die weiblichen Teilnehmer hinsichtlich des Testzeitpunkts innerhalb des Menstruationszyklus gematcht. Weiterhin wurden die Schlafableitungen in aufeinanderfolgenden Nächten durchgeführt, so dass keine zyklusbedingten systematischen Unterschiede zwischen den Bedingungen oder Gruppen zu erwarten waren. Alle Probanden gaben zudem an, dass sie keine besonderen Veränderungen des zirkadianen Rhythmus während und zwischen den einzelnen Tests hatten. Außerdem wurde das Alter der Probanden so gewählt, dass mögliche Streuungen bzw. Störfaktoren, wie z.B. der hormonelle Einfluss in der Pubertät oder Menopause, ausgeschlossen werden konnten. Die Homogenität der Schlafstruktur führt zur Annahme, dass sich Störfaktoren nur gering auswirken konnten.

2. Schlaf-EEG-Vergleich zwischen Gedächtnissportler und Kontrollprobanden.

Überraschenderweise zeigte die eigene Studie trotz der deutlich besseren Gedächtnisleistung von Gedächtnissportlern keinen signifikanten Unterschied in den Schlafdaten zwischen beiden Gruppen. Dieses betraf die Schlafstadien, die Schlafspindelaktivität, sowie die erhobenen Spektraldaten. Diese Ergebnisse

unterstützen die Ansicht, dass der Zusammenhang zwischen Gedächtnis und Schlaf – zumindest als Trait – nicht so einfach ist, wie es andere Studien andeuten.

Dass Lernphasen am Tage die Schlafspindelaktivität im Schlaf-EEG modulieren können, wurde in bisherigen Untersuchungen mehrfach berichtet (Gais, Molle et al. 2002; Fogel und Smith 2006; Schabus, Hödlmoser et al. 2006; Fogel, Smith et al. 2007; Morin, Doyon et al. 2008; Schabus, Hödlmoser et al. 2008). Weiterhin wurde in der Studie von Gibbs und Gibbs (1962) beobachtet, dass mental retardierte Personen ungewöhnlich extreme Schlafspindeln hatten, welche durch eine höhere Amplitude und längere Dauer gegenüber normalen Schlafspindeln charakterisiert waren. Ähnlich wie in der Arbeit von Shibagaki und Kiyono (1983) wurden abnormale Schlaf-EEG und Schlafspindeln sowie epileptiforme Aktivität bei mental retardierten Kindern beobachtet. Briere, Forest et al. (2000) sowie Gais, Molle et al. (2002) berichteten über eine positive Korrelation der Schlafspindelintensität mit dem deklarativen Gedächtnis. Bodizs, Kis et al. (2005) konnten eine signifikante Korrelation zwischen der schnellen, jedoch nicht der langsamen Schlafspindelaktivität und hohen Werte eines *Raven Progressive Matrices Test* (1976) finden, welche als Maß für die allgemeine mentale Geschicklichkeit betrachtet wurde. Schabus, Hödlmoser et al (2006) ergänzten diese Forschungsergebnisse und zeigten, dass Personen mit besseren Werte ($122 \pm 11,22$) am *Wechsler Memory Scale* eine höhere Schlafspindelaktivität gegenüber Personen mit schlechteren Werte ($111 \pm 16,61$) aufwiesen. Zudem wurde beobachtet, dass nur die langsamen und nicht die schnellen Schlafspindeln bei hochbegabten Gedächtnissportlern (basierend auf dem *Wechsler Memory Scale* und *Raven Progressive Matrices Test*) im Vergleich mit weniger begabten bzw. normalen Person auftraten (Fogel, Nader et al. 2007; Schabus, Hödlmoser et al. 2008). Neuere Studien mit größerer Fallzahl und eine Meta-Analyse weisen jedoch auf einen nur geringen Zusammenhang zwischen Schlafspindelaktivität und kognitiven Traits hin (Ujma et al., 2014; Ujma 2018). Um mögliche Verzerrungen des statistischen Ergebnisses dennoch zu vermeiden, wurden in der eigenen Studie Probanden mit durchschnittlich gleich hohem IQ-Test-Ergebnis eingeschlossen.

Zusammengefasst ergaben die vorliegenden fremden Forschungsergebnisse den Hinweis, dass die Schlafspindelaktivität die Stärke bzw. das Ausmaß einer deklarativen Gedächtniskonsolidierung im Schlaf widerspiegelt – als ‚state‘ im Sinne

einer akuten Lernphase und als ‚trait‘ im Sinne der allgemeinen kognitive Kapazität (Fogel und Smith 2006; Nader und Smith, 2003). Das behaviorale Test-Ergebnis, wo die Gedächtnissportler bei den einzelnen deklarativen Lernaufgaben mit Abstand besser als die Kontrollprobanden abschnitten, war zu erwarten, da die Gedächtnissportler jahrelanges Gedächtnistraining und erfolgreiche Gedächtnissporterfahrung aufwiesen. Jedoch zeigte die Schlafspindelaktivität zwischen beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede. Damit stellt sich ein enger Zusammenhang zwischen Schlafspindeln und Gedächtnisfähigkeit wieder in Frage und verbleibt offen für weitere Diskussion.

Manche Lernaufgaben in der eigenen Studie gehören zu den Disziplinen in der Gedächtnisweltmeisterschaft, welche eine große Herausforderung für den Probanden darstellen. Es wird deshalb erwartet, dass deutliche Veränderungen der Schlafarchitektur nach intensiven Lernaufgaben sowohl in der einzelnen Gruppe als auch zwischen Kontrollprobanden und Gedächtnissportlern beobachtet werden können. Solche Veränderungen treten jedoch nicht auf und liefert somit ein nicht signifikantes Ergebnis. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass das Gehirn und dessen neuromolekulares System durch die Lernaufgaben nicht deutlich beeinflusst werden. Mit anderen Worten: Lernen vor dem Schlaf müsste effizient genug sein (d.h. ein ausreichender Kodierungspfad müsste erreicht werden), sodass ein „Offline-Prozess“ im Schlaf angeregt werden kann und damit eine veränderte Schlafspindelaktivität im Schlaf-EEG erzeugt werden kann (Schmidt, Peigneux et al. 2006). Die Gedächtnissportler beherrschten eine bessere Mnemoniertechnik als die Kontrollprobanden, wodurch möglicherweise die Gedächtnissportler die Lernaufgaben nicht als schwer genug empfanden, sodass eine deutlich vermehrte Schlafspindelaktivität im Schlaf-EEG nicht beobachtet werden konnte. Umgekehrt war die geforderte Lernleistung für die Kontrollgruppe möglicherweise zu hoch, so dass wiederum die normalen Prozesse der Gedächtniskonsolidierung nicht aktiviert wurden (Feld et al. 2016). Eine mögliche Erklärung zu diesem Ergebnis wäre damit die Qualität und Quantität der zu konsolidierenden Informationen. Wären die neuen Informationen zu viel und zu kompliziert, wie es in der vorliegenden Arbeit bei den Kontrollprobanden der Fall war, akkommodierte der Schlaf die Gedächtniskonsolidierung nicht. Wären die neuen Informationen zu wenig und zu einfach, wie in der vorliegenden Arbeit bei den Gedächtnissportlern der Fall war, so unterstützte der Schlaf die Gedächtniskonsolidierung auch nicht. Das würde

bedeuten, dass der Schlaf seine höchste Effektivität zur Gedächtniskonsolidierung beiträgt, wenn mittelschwere Aufgaben und mittelgroße Mengen an Informationen einzuprägen sind. Feld et al. (2016) nahmen an, dass mit zunehmenden Lasten von Informationen, die während des Wachzustandes kodiert wurden, der Schlaf einen Vergessensprozess anstatt Konsolidierung bewirkte. Mit anderen Worten deutet dies auf eine begrenzte Kapazität für die schlafabhängige Speicherkonsolidierung hin. Die eigene Studie zeigt gleiche Mengen an Schlafspindeln sowie SWS innerhalb beider Gruppen vor und nach dem intensiven Lernen. Diese würde bedeuten, dass die Probanden aus den beiden Gruppen die maximale Kapazität für die schlafabhängige Gedächtniskonsolidierung durch den Lernprozess erreicht hätten. Warum lieferten die Gedächtnissportler jedoch deutlich besseren Testergebnisse als die Kontrollprobanden? Eine mögliche Erklärung hierfür sind die vom Gedächtnissportler angewendete Mnemotechnik, die das Erinnern deutlich erleichtern. Umgekehrt wäre die größere Speicherkapazität von Gedächtnissportlern die Erklärung für deutlich besseren Testergebnisse, würden Schlafspindeln und SWS in der Gedächtnissportler-Gruppe im Vergleich mit der Kontrollgruppe deutlich mehr beobachtet.

Möglicherweise ist die schlafabhängige Gedächtniskonsolidierung eines deklarativen Lerninhaltes von der für das Lernen verwendeten Strategie abhängig. Damit wäre sie auf die Integration des neu erworbenen Gedächtnisses bei der Kodierung zurückzuführen (Himmer, Muller et al. 2017). Dann wäre aber zu erwarten, dass die Gedächtnissportler mehr Schlafspindelaktivität als Kontrollprobanden hätten, was jedoch hier nicht der Fall war. Eine andere Möglichkeit wäre, dass bei den Gedächtnissportlern eine bessere Stabilisierung und Reorganisation stattfindet und diese nicht durch Schlafspindeln gekennzeichnet ist. Denn bisher wird immer noch kontrovers diskutiert, wo und wann die deklarative Gedächtniskonsolidierung stattfindet. Die Mehrheit der Studien berichteten eine gute Korrelation zwischen einer Gedächtniskonsolidierung mit dem NonREM-Schlaf (Yaroush, Sullivan et al. 1971; Plihal und Born 1999a; Gais, Molle et al. 2002; Clemens, Fabo et al. 2005; Übersicht: Stickgold 2005), während andere Studien dieser Theorie widersprechen (Empson und Clarke 1970, Tilley und Empson 1978). Eine weitere mögliche Theorie wäre, dass die Schlafspindelaktivität weitgehend unabhängig von allgemeinen Lern- und Gedächtnisfähigkeiten (Mnemoniertechnik) erzeugt wird. Konsistente Veränderungen des Schlaf-EEG, v.a. der Schlafspindelaktivität, wurden nur nach schwerer aber nicht

nach leichter assoziativer Enkodierungskondition beobachtet (Smith und Wong 1991; Gais, Molle et al. 2002). Die gleiche Menge der Schlafspindelaktivität in beiden Gruppen in der vorliegenden Studie lag möglicherweise aber auch daran, dass die Gedächtniskonsolidierung und deren Reorganisation nicht nur ausschließlich durch Anstieg der Schlafspindelaktivität gekennzeichnet war, sondern auch durch andere komplizierte und eventuell noch unbekannte Prozesse während des Schlafes.

3. Limitationen

Der Schlaf, das Gedächtnis und die Gedächtniskonsolidierung stellen komplexe Phänomene dar, von denen keines als voneinander unabhängige Ereignisse behandelt werden bzw. untersucht werden sollten. Andere Einflüsse, wie Stimuli während des Tages vor Beginn des Experimentes, könnten zu der individuellen Variabilität beigetragen haben, indem die Schlaf-EEG-Architektur, in diesem Fall die Spindeldichte, in einigen der Adaptationsnächte oder Nächten ohne Lernbedingungen erhöht wurde. Ein anderes Problem, das bei jeder Art von Langzeitgedächtnis nicht vermieden werden kann, wäre die mögliche Wiederholung des Lerninhaltes zwischen Lern- und Testphase (sog. *Rehearsal*), die von den Probanden nicht berichtet wurde, jedoch vom Untersucher nicht kontrolliert werden konnte. In der vorliegenden Studie nahmen wir an, dass eine solche Wiederholung des Lerninhaltes, wenn sie auftreten würde, alle Probanden gleichermaßen betrifft.

Die Studie von Lewin, Wolger et al (2001) gab eine weitere Empfehlung, dass Studien zur Gedächtnisleistung und -konsolidierung immer geschlechtsspezifisch durchgeführt werden sollten. In der Studie wurde beobachtet, dass Frauen bei deklarativen Aufgaben unabhängig von Schlaf und Wachheit des Probanden, durchschnittlich besser als Männer abschnitten. Entsprechend haben wir in der vorliegenden Studie auf ein exaktes Matching bzgl. des Geschlechts geachtet. Theoretisch mögliche Interaktionen zwischen Geschlecht und extremen Gedächtnisleistungen im Gedächtnissport können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Bei der vorliegenden Studie verwendeten wir Testmaterialien, welche nicht exakt gleich wie in anderen früheren Studien verwendet wurden. Es war daher schwierig,

die Ergebnisse mit anderen früheren Studien (mit unterschiedlichen Aufgaben) direkt zu vergleichen. Es ist in diesem Zusammenhang auch anzumerken, dass die Aufgaben zwar nach der klassischen Definition eine deklarative Lernaufgabe darstellten, aber diese möglicherweise nicht rein deklarative, sondern auch prozedurale Aspekte in unterschiedlichem Ausmaß enthalten könnten (Squire 1992; Peigneux, Laureys et al. 2001), insbesondere in der eventuell hoch automatisierten Weise, in der Gedächtnissportler die Aufgaben absolvieren.

Für die Auswertung der Polysomnographien wurde eine voreingestellte Filter-Einstellung von 0,53 – 30 Hz, wie in der üblichen psychiatrischen Schlafforschung, gewählt. Jedoch entsprach diese Einstellung mit der DGKN-Empfehlung (Deutsche Gesellschaft für Klinische Neurophysiologie und Funktionelle Bildgebung) nicht, welche eine obere Grenzfrequenz von 70 Hz empfohlen wurde (Besser et al. 2012). Diese Diskrepanz könnte bewirken, dass die schnelleren EEG-Signale nicht dargestellt werden könnten. Der Fokus der vorliegenden Studie blieb jedoch bei der Delta- (0,5 – 4,0 Hz) und Sigma-Aktivität (12,0 – 16,0 Hz), da sich diese in zahlreichen Studien für die schlaf-assoziierte Gedächtniskonsolidierung als relevant erwiesen haben.

In der Studie von Ferini-Strambi et al. (2004) wurde eine vermehrte SWS- und Schlafspindelaktivität nach einer außergewöhnlichen Gedächtnisleistung von einem Gedächtnissportler beobachtet. Steriade (2005) erklärte diese Veränderung als Folge einer Induzierung der synaptischen Effektivität durch Langzeitpotenzierung des Gedächtniskonsolidierungspfades, die während der Wachheit erworben wurde. Bislang war eine ausführlichere Untersuchung der Schlafarchitektur von Gedächtnissportlern noch wenig erforscht. Dies lag daran, dass die Rekrutierung solche Probanden zeitlich und örtlich limitiert war. Eine größere Stichprobe konnten wir in der vorliegenden Studie durch eine Kooperation mit dem deutschen Gedächtnissportverband sicherstellen, jedoch war die Teilnehmerzahl mit $n = 16$ vs. 16 noch immer begrenzt. Eine Folgestudie mit zahlreicheren Teilnehmern wäre daher wünschenswert, um eine belastbarere Konklusion und einen direkten Vergleich ziehen zu können.

4. Konklusion

In dieser Studie wurde gezeigt, dass sich die Schlafdaten von Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden nach einer intensiven Lernphase nicht unterscheiden – weder im Vergleich zu jeweils einer Kontrollnacht, noch im Vergleich zwischen den Gruppen, obwohl die Gedächtnissportler ein deutlich besseres Ergebnis bei den einzelnen Tests als die Kontrollprobanden lieferten. Dabei wurden die Schlafstadien, Schlafspindeln, und Spektraldaten verglichen. Das Ergebnis legt somit nahe, dass die extreme Gedächtnisleistung tagsüber keinen Effekt auf das Schlaf-EEG der folgenden Nacht hatte. Dieses Ergebnis steht in Kontrast zu früheren Untersuchungen, die vereinzelt zeigen konnten, dass z.B. Schlafspindeln abhängig von der Lernleistung der Probanden induziert wurden.

F. Zusammenfassung

Theoretischer Hintergrund und eigene Fragestellung

Gedächtniskonsolidierung ist eine der Funktionen des Schlafs. Sowohl der REM-Schlaf als auch NonREM-Schlaf werden in zahlreichen Studien mit der Gedächtniskonsolidierung in Verbindung gebracht. Die deklarativen Lernprozesse werden insbesondere mit dem NonREM-Schlaf und darin mit Mikroprozessen wie etwa Schlafspindeln assoziiert. Während deutliche Veränderungen des Schlafs – etwa durch Schlafentzug – auch deutliche Veränderungen der Gedächtnisleistung zur Folge haben, ist die umgekehrte Kausalrichtung weniger erforscht: Verändert Lernen den Schlaf? Bisherige Studie fanden allenfalls subtile Effekte von Lernen auf das Schlaf-EEG. Die Grundannahme der vorliegenden Studie war, dass intensives Lernen einen deutlichen Effekt auf objektive Schlaf-Parameter zur Folge haben sollte. Dazu wurde Gedächtnissport genutzt.

Ein Gedächtnissportler unterscheidet sich von einem Nicht-Gedächtnissportler dadurch, dass er semantisch nicht zusammenhängende Neuinformationen mit Hilfe einer Mnemotechnik besser merken kann, d.h. diese außergewöhnliche Fähigkeit ist nicht angeboren. Mithilfe jahrelangen Mnemotechnik-Trainings erreichen Gedächtnissportler Gedächtnisleistungen weit jenseits derer von Kontrollpersonen, die keinen Gedächtnissport betreiben. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob extreme Gedächtnisleistungen durch verschiedene Lernaufgaben das Schlaf-EEG und deren Mikroarchitektur verändern würde.

Folgende Hypothesen wurden geprüft:

- A) Der Vergleich zwischen Nächten zeigt in der Lernbedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung:
 - A1) vermehrt Tiefschlaf und/oder Schlafstadium 2,
 - A2) höhere Delta- und Sigmaaktivität und
 - A3) höhere Schlafspindelaktivität
- B) Die in A prognostizierten Unterschiede sind bei Gedächtnissportlern stärker ausgeprägt als bei Kontrollprobanden.
- C) Explorativ werden die Kontrollnächte zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden verglichen, um mögliche trait-bedingte Unterschiede in

konventionellen Schlafparametern, Spektraldaten und Schlafspindelaktivität aufzudecken.

Methoden

An der Studie nahmen 32 Probanden teil, darunter 16 Gedächtnissportler und 16 Kontrollprobanden. Die Kontrollprobanden wurden bezüglich Alter, Geschlecht und Intelligenz den Gedächtnissportlern gematcht. Die Probanden wurden randomisiert in 2 Subgruppen nach dem Crossover-Design eingeteilt und verbrachten jeweils 3 Studiennächte im Schlaflabor. Die eine Subgruppe durchlief die Reihenfolge Eingewöhnungsnacht – Studiennacht – Kontrollnacht, während die andere Subgruppe die Reihenfolge Eingewöhnungsnacht – Kontrollnacht – Studiennacht durchlief.

Vor der Eingewöhnungsnacht, die zur Gewöhnung an die Schlaflaborbedingungen dient, absolvierten die Probanden einige allgemeine kognitive Tests. Am Tag vor der Studiennacht führten sie insgesamt 7 Lerntests durch, die jeweils exzessive Datenmengen bzw. Informationen beinhalten. Zuerst bekamen die Probanden den *Directed Forgetting* Test und den *False Memories* Test. Danach durchliefen sie den *Binary Digits* Test, den n-Back Test und den *Stories/Numbers/Words* Test im MRT-Scanner. Als letztes sollten sie Personendaten und Spielkartenreihenfolgen auswendig lernen, bevor die EEG-Elektroden im Schlaflabor angebracht wurden. Danach erfolgte die Ableitung einer Polysomnographie von 23 bis 7 Uhr. Am nächsten Morgen erfolgten die Wiedertestung des *Directed Forgetting* Tests und des *False Memories* Tests, sowie die Wiedergabe der am Abend zuvor gelernten Spielkarten und Personendaten. Die Kontrollnacht mit einer weiteren Polysomnographie verlief genauso wie die Eingewöhnungsnacht ohne kognitive Tests.

Ergebnisse

Bei diesem Experiment zeigten Gedächtnissportler im Vergleich zu den Kontrollprobanden wie erwartet ein besseres Ergebnis bei den einzelnen Gedächtnistests. Es konnten aber keine signifikanten Unterschiede in der

Polysomnographie zwischen den Gedächtnissportlern und den Kontrollprobanden gefunden werden, und keine Unterschiede zwischen den Bedingungen, also nach intensiver Lernphase vs. Kontrollbedingung. Auch in der Mikroarchitektur der Polysomnographie, einschließlich der Delta-/Sigma- und Schlafspindelaktivität, wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Diskussion

Diese Studie konnte die bisher in einer Reihe von Untersuchungen beobachtete Korrelation zwischen Lernen und schlafabhängiger Gedächtniskonsolidierung nicht bestätigen, da die objektiven Schlafdaten zwischen der Kontrollnacht und Studiennacht keine signifikanten Unterschiede zeigten. Auch beim Vergleich der Schlafparameter zwischen Gedächtnissportlern und Kontrollprobanden ergab sich kein Unterschied.

Eine mögliche Erklärung für den Unterschiede zwischen den eigenen und früheren Ergebnissen wäre, dass das Gehirn durch die Lernaufgaben nicht genug sensibilisiert wurde. Dies würde bedeuten, dass Lernen vor dem Schlaf effizient genug sein müsste, um verbesserte Schlafspindelaktivität zu erzeugen: Während die Gedächtnissportler die Lernaufgabe durch die Mnemoniertechnik als zu einfach und zu wenig empfanden, war die geforderte Lernleistung für die Kontrollgruppe zu viel und zu kompliziert, so dass die normalen Prozesse der Gedächtniskonsolidierung bei beiden Gruppen nicht aktiviert wurden. Eine weitere mögliche Theorie wäre, dass die Schlafspindelaktivität unabhängig von Mnemoniertechnik erzeugt wird, oder dass die Schlafspindelaktivität durch andere komplizierte und eventuell noch unbekannte Prozesse erzeugt wurde.

Eine Limitation in der vorliegenden Studie ist die Rekrutierung einer hinreichend großen Stichprobe von Gedächtnissportlern, die mit der Teilnehmerzahl von $n = 16$ vs. $n = 16$ nur begrenzt war. Eine Folgestudie mit zahlreicheren Teilnehmern sollte deshalb in Zukunft angeregt werden, um eine belastbarere Konklusion und einen direkten Vergleich ziehen zu können.

Literaturverzeichnis

- Abercrombie, H. C., Speck, N. S. & Monticelli, R. M. (2006). Endogenous cortisol elevations are related to memory facilitation only in individuals who are emotionally aroused. *Psychoneuroendocrinology*, 31(2): 187-196.
- Adamczyk, M., Genzel, L., Dresler, M., Steiger, A. & Friess, E. (2015). Automatic Sleep Spindle Detection and Genetic Influence Estimation Using Continuous Wavelet Transform. *Front. Hum. Neurosci.*, 9: 624.
- Addison, P. S. (2002). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Adolphs, R., Cahill, L., Schul, R., Babinsky, R. (1997). Impaired declarative memory for emotional material following bilateral amygdala damage in humans. *Learn Mem.*, 4(3): 291-300.
- Anderer, P., Gruber, G., Parapatics, S., Woertz, M., Miazhynskaia, T., Klosch, G., Saletu, B., Zeitlhofer, J., Barbanoj, M. J., Danker-Hopfe, H., Himanen, S. L., Kemp, B., Penzel, T., Grozinger, M., Kunz, D., Rappelsberger, P., Schlogl, A. & Dorffner, G. (2005). An E-health solution for automatic sleep classification according to Rechtschaffen and Kales: validation study of the Somnolyzer 24 x 7 utilizing the Siesta database. *Neuropsychobiology*, 51(3): 115-133.
- Anderson, J. R. (2007). *Kognitive Psychologie*, 6. Auflage. Deutsche Ausgabe herausgegeben von Joachim Funke. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag (Orig.: *Cognitive psychology and its implications*. New York 2005).
- Anderson, M., Ochsner, K., Kuhl, B., Cooper, J., Robertson, E., Gabrieli, S., Glover, G. & Gabrieli, J. (2004). Neural systems underlying the suppression of unwanted memories. *Science*, 303, 232-235.
- Asanuma, H. & Pavlides, C. (1997). Neurobiological basis of motor learning in mammals. *Neuroreport*, 8(4): i-vi.
- Aston-Jones, G. & Bloom, F. E. (1981). Activity of norepinephrine-containing locus coeruleus neurons in behaving rats anticipates fluctuations in the sleep-waking cycle. *J. Neurosci.*, 1(8): 876-886.
- Backhaus, J. & Junghanns, K. (2006). Daytime naps improve procedural motor memory. *Sleep Med.*, 7(6): 508-512.

- Backhaus, J., Born J., Hoeckesfeld, R., Fokuhl, S., Hohagen, F. & Junghanns, K. (2007). Midlife decline in declarative memory consolidation is correlated with a decline in slow wave sleep. *Learn Mem.*, 14(5): 336-341.
- Barrett, T. R. & Ekstrand, B. R. (1972). Effect of sleep on memory. 3. Controlling for time-of-day effects. *J. Exp. Psychol.*, 96(2): 321-327.
- Bäumler, G. (1974). Lern- und Gedächtnistest LGT-3. Göttingen: Hogrefe.
- Beck, A. T., Ward, C. H., Mendelson, M., Mock, J. & Erbaugh, J. (1961). An inventory for measuring depression. *Arch. Gen. Psychiatry*, 4: 561-571.
- Beckner, V. E., Tucker, D. M., Delville, Y. & Mohr, D. C. (2006). Stress facilitates consolidation of verbal memory for a film but does not affect retrieval. *Behav. Neurosci.*, 120(3): 518-527.
- Bellezza, F. S., Six, L. S. & Phillips, D. S. (1992). A mnemonic for remembering long strings of digits. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 30: 271-274.
- Besser, R., Ebner, A., Hegerl, U., Korinthenberg, R., Noachtar, S., Steinhoff, B. J., Tergau, F. & Werhahn, K. J. (2012). Anhang: Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Klinische Neurophysiologie und Funktionelle Bildgebung (früher: Deutsche EEG-Gesellschaft). In: Zschocke, S. & Hansen, H.-C. (Hrsg.). *Klinische Elektroenzephalographie*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. S. 588.
- Bizzi, E. (2000). Introduction. In: Gazzaniga, M. S. (Hrsg.). *The New Cognitive Neuroscience, 2nd Edition*. Cambridge: MIT Press.
- Bless, H., Waenke, M., Bohner, G., Fellhauer, R. & Schwarz, N. (1994). Need for Cognition: Eine Skala zur Erfassung von Engagement und Freude bei Denkaufgaben. *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, 25: 147-154.
- Bliss, T. V. & Gardner-Medwin, A. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the unanaesthetized rabbit following stimulation of perforant path. *Journal of Physiology (London)*, 232: 357-371.
- Bliss, T. V. & Lømo, T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of perforant path. *Journal of Physiology (London)*, 232: 331-356.
- Bodizs, R., Kis, T., Lázár, A. S., Havrán, L., Rigó, P., Clemens, Z. & Halász, P. (2005). Prediction of general mental ability based on neural oscillation measures of sleep. *J. Sleep Res.*, 14(3): 285-292.
- Bonnet, M., Carley, D., Carskadon, M., Easton, P., Guilleminault, C., Harper, R., Hayes, B., Hirshkowitz, M., Ktonas, P., Keenan, S., Pressman, M., Roehrs, T., Smith, J., Walsh, J., Weber,

- S., Westbrook, P. & Jordan, B. (1992). EEG arousals: Scoring rules and examples. A preliminary report from the Sleep Disorders Atlas Task Force of the American Sleep Disorder Association. *Sleep*, 15: 173-184.
- Born, J. & Rasch, B. (2004). Schlaf und Gedächtnis. In: Schulz, H. (Hrsg.), *Kompendium Schlafmedizin* (Kapitel II – 9.1). Landsberg: Ecomed.
- Bower, G. H. (1970). Imagery as a relational organizer in associative learning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 9: 529 – 533.
- Briere, M., Forest, G., Lussier, I. & Godbout, R. (2000). Implicit verbal recall correlates positively with EEG sleep spindle activity. *Sleep*, 23: A211.
- Buchanan, T. W. & Lovallo, W. R. (2001). Enhanced memory for emotional material following stress-level cortisol treatment in humans. *Psychoneuroendocrinology*, 26(3): 307-317.
- Buchanan, T. W., Tranel, T. & Adolphs, R. (2006). Impaired memory retrieval correlates with individual differences in cortisol response but not autonomic response. *Learn. Mem.*, 13(3): 382-387.
- Burnham W.H. (1903). Retroactive amnesia illustrative cases and a tentative explanation. *Am. J. Psychol.* 14: 382-396.
- Butcher, J. (2000). Dominic O'Brien - master mnemonist. *Lancet*, 356(9232): 836.
- Buysse, D. J., Reynolds, C. F. 3rd, Monk, T. H., Berman, S. R. & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res*, 28(2): 193-213.
- Cacioppo, J. & Petty, R. (1982). The Need for Cognition. *Journal of Personality and Social Psychology*, 42: 116-131.
- Cahill, L., Babinsky, R., Markowitsch, H. J. & McGaugh, J. L. (1995). The amygdala and emotional memory. *Nature*, 377: 295–296.
- Cahill, L., Haier, R. J., Fallon, J., Alkire, M. T., Tang, C., Keator, D., Wu, J. & McGaugh, J. L. (1996). Amygdala activity at encoding correlated with long-term, free recall of emotional information. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93(15): 8016-8021.
- Chase, W. G. & Ericsson, K. A. (1981). Skilled memory. In: Anderson, J. R. (Hrsg.), *Cognitive skills and their acquisition* (S. 141-189). Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Chernik, D. A. (1972). Effect of REM sleep deprivation on learning and recall by humans. *Perceptual and Motor Skills*, 34(1): 283-294.
- Clemens, Z., Fabo, D. & Halász, P. (2005). Overnight verbal memory retention correlates with the number of sleep spindles. *Neuroscience*, 132(2): 529-535.

- Colrain, I. M. (2005). The K-complex: a 7-decade history. *Sleep*, 28(2): 255-273.
- Cote, K. A., Epps, T. M. & Campbell, K. B. (2000). The role of the spindle in human information processing of high-intensity stimuli during sleep. *J. Sleep Res.*, 9(1): 19-26.
- Cox, R., Hofman, W. F. & Talamini, L. M. (2012). Involvement of spindles in memory consolidation is slow wave sleep-specific. *Learn. Mem.*, 19(7): 264-267.
- Craik, F. I. M., Moroz, T. M., Moscovitch, M., Stuss, D., Winocur, G., Tulving, E. & Kapur, S. (1999). In Search of the Self: A Positron Emission Tomography Study. *Psychological Science*, 10(1): 26-34.
- Danker-Hopfe, H., Anderer, P., Zeitlhofer, J., Boeck, M., Dorn, H., Gruber, G., Heller, E., Loretz, E., Moser, D., Parapatics, S., Saletu, B., Schmidt, A. & Dorffner, G. (2009). Interrater reliability for sleep scoring according to the Rechtschaffen & Kales and the new AASM standard. *J. Sleep Res.*, 18(1): 74-84.
- De Gennaro, L. & Ferrara, M. (2003). Sleep spindles: an overview. *Sleep Med. Rev.*, 7(5): 423-440.
- De Quervain, D. J., Roozendaal B., Nitsch, R. M., McGaugh, J. L. & Hock, C. (2000). Acute cortisone administration impairs retrieval of long-term declarative memory in humans. *Nat Neurosci*, 3(4): 313-314.
- De Quervain, D. J., Henke, K., Aerni, A., Treyer, V., McGaugh, J. L., Berthold, T., Nitsch, R. M., Buck, A., Roozendaal, B. & Hock, C. (2003). Glucocorticoid-induced impairment of declarative memory retrieval is associated with reduced blood flow in the medial temporal lobe. *Eur. J. Neurosci.*, 17(6): 1296-1302.
- Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of particular verbal intrusions in immediate recall. *J. Exp. Psychol.*, 58(1): 17-22.
- DeLuca, J. & Diamond, B. (1995). Aneurysm of the anterior communicating artery: a review of neuroanatomical and neurophysiological sequelae. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 17: 100-121.
- Diekelmann, S. & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nat. Rev. Neurosci.*, 11(2): 114-126.
- Dijk, D. J. & Czeisler, C. A. (1995). Contribution of the circadian pacemaker and the sleep homeostat to sleep propensity, sleep structure, electroencephalographic slow waves, and sleep spindle activity in humans. *J. Neurosci.*, 15(5 Pt 1): 3526-3538.
- Dresler, M. & Konrad, B. N. (2013). Mnemonic expertise during wakefulness and sleep. *Behav. Brain Sci.*, 36(6): 616-617; discussion 634-659.
- Dresler, M., Kluge, M., Genzel, L., Schüssler, P. & Steiger, A. (2010). Impaired off-line memory consolidation in depression. *Eur. Neuropsychopharmacol.*, 20(8): 553-561.

- Dresler, M., Shirer, W. R., Konrad, B. N., Müller, N. C. J., Wagner, I. C., Fernández, G., Czisch, M. & Greicius, M. D. (2017). Mnemonic Training Reshapes Brain Networks to Support Superior Memory. *Neuron*, 93(5): 1227-1235.
- Driver, H. S. (1996). Sleep in women. *J. Psychosom. Res.*, 40(3): 227-230.
- Dunsmoor, J. E., Murty, V. P., Davachi, L., Phelps, E. A. (2015). Emotional learning selectively and retroactively strengthens memories for related events. *Nature*, 520(7547): 345-348.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis*. Leipzig: Duncker & Humboldt.
- Eccles, J. (1992). Neurobiology of cognitive learning. Opladen: Westdeutscher Verlag. S. 8.
- Eichenbaum, H. (2004). Hippocampus: Cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory. *Neuron*, 44(1): 109-120.
- Eichenbaum, H. & Cohen, N. J. (2001). From Conditioning to Conscious Recollection: Memory Systems of the Brain. New York: Oxford University Press.
- Empson, J. A. & Clarke, P. R. (1970). Rapid eye movements and remembering. *Nature*, 227(5255): 287-288.
- Ericsson, K. A. (2003). Exceptional memorizers: made, not born. *Trends in Cognitive Science*, 7(6): 233-235.
- Ericsson, K. A. & Chase, W. G. (1982). Exceptional memory. *Am. Sci.*, 70(6): 607-615.
- Ericsson, K. A., Chase, W. G. & Faloon, S. (1980). Acquisition of a memory skill. *Science*, 208(4448): 1181-1182.
- Farage, M. A., Osborn, T. W. & MacLean, A. B. (2008). Cognitive, sensory, and emotional changes associated with the menstrual cycle: a review. *Arch Gynecol Obstet*, 278(4): 299-307.
- Feld, G. B., Weis, P. P. & Born, J. (2016). The Limited Capacity of Sleep-Dependent Memory Consolidation. *Front. Psychol.*, 7: 1368.
- Ferini-Strambi, L., Ortelli, P., Castronovo, V. & Cappa, S. (2004). Increased periodic arousal fluctuations during non-REM sleep are associated to superior memory. *Brain Res. Bull.*, 63(6): 439-442.
- Fischer, S., Hallschmid, M., Elsner, A. L. & Born, J. (2002). Sleep forms memory for finger skills. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 99(18): 11987-11991.
- Fogel, S. M. & Smith, C. T. (2006). Learning-dependent changes in sleep spindles and Stage 2 sleep. *J. Sleep Res.*, 15(3): 250-255.

- Fogel, S. M. & Smith, C. T. (2011). The function of the sleep spindle: a physiological index of intelligence and a mechanism for sleep-dependent memory consolidation. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 35(5): 1154-1165.
- Fogel, S. M., Smith, C. T. & Beninger, R. J. (2009). Evidence for 2-stage models of sleep and memory: Learning-dependent changes in spindles and theta in rats. *Brain Research Bulletin*, 79(6): 445-451.
- 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. *Behav. Brain. Res.*, 180(1): 48-61.
- Fogel, S. M., Nader, R., Cote, K. A. & Smith, C. T. (2007). Sleep spindles and learning potential. *Behav. Neurosci.*, 121(1): 1-10.
- Fornal, C., Auerbach, S. & Jacobs, B. L. (1985). Activity of serotonin-containing neurons in nucleus raphe magnus in freely moving cats. *Exp. Neurol.*, 88(3): 590-608.
- Fowler, M. J., Fowler, M. J., Sullivan, M. J. & Ekstrand, B. R. (1973). Sleep and memory. *Science*, 179(4070): 302-304.
- Friese, A., Heil, H. & Puck, M. (2010). Gedächtnistraining mit Kindern und Jugendlichen. In: Schloffer H., Prang E. and Prick-Salzman, A. (Hrsg.). *Gedächtnistraining: Theoretische und praktische Grundlagen*. Heidelberg: Springer. S. 163 – 172.
- Gais, S. & Born, J. (2004). Low acetylcholine during slow-wave sleep is critical for declarative memory consolidation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 101(7): 2140-2144.
- Gais, S., Molle, M., Helms, K. & Born, J. (2002). Learning-dependent increases in sleep spindle density. *J. Neurosci.*, 22(15): 6830-6834.
- Gaus, S. E., Strecker, R. E., Tate, B. A., Parker, R. A. & Saper, C. B. (2002). Ventrolateral preoptic nucleus contains sleep-active, galaninergic neurons in multiple mammalian species. *Neuroscience*, 115(1): 285-294.
- 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 Neurosci.*, 37(1): 10-19.
- Genzel, L., Dresler, M., Wehrle, R., Grözinger, M. & Steiger, A. (2009). Slow wave sleep and REM sleep awakenings do not affect sleep dependent memory consolidation. *Sleep*, 32(3): 302-310.
- Genzel, L., Kiefer, T., Renner, L., Wehrle, R., Kluge, M., Grözinger, M., Steiger, A. & Dresler, M. (2012). Sex and modulatory menstrual cycle effects on sleep related memory consolidation. *Psychoneuroendocrinology*, 37(7): 987-998.

- Genzel, L., Spoomaker, V.I., Konrad, B. N. & Dresler, M. (2015). The role of rapid eye movement sleep for amygdala-related memory processing. *Neurobiol. Learn. Mem.*, 122: 110-121.
- Gibbs, E. L. & Gibbs, F. A. (1962). Extreme spindles: correlation of electroencephalographic sleep pattern with mental retardation. *Science*, 138(3545): 1106-1107.
- Gluck, M. A., Mercado, E. & Myers, C. E. (2010). Lernen und Gedächtnis: Vom Gehirn zum Verhalten. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, S. 93-107. (Orig.: Learning and Memory: From Brain to Behavior. Basingstoke, England 2008).
- Gottselig, J. M., Bassetti, C. L. & Achermann, P. (2002). Power and coherence of sleep spindle frequency activity following hemispheric stroke. *Brain*, 125(Pt 2): 373-383.
- Griefahn, B., Künemund, C., Bröde, P. & Mehnert, P. (2001). Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. *Sleep*, 5: 71-80.
- Grigg-Damberger, M. M. (2012). The AASM Scoring Manual four years later. *J. Clin. Sleep Med.*, 8(3): 323-332.
- Gui, W. J., Li, H. J., Guo, Y. H., Peng, P., Lei, X. & Yu, J. (2017). Age-related differences in sleep-based memory consolidation: A meta-analysis. *Neuropsychologia*, 97: 46-55.
- Halász, P., Pál, I. & Rajna, P. (1985). K-complex formation of the EEG in sleep. A survey and new examinations. *Acta Physiol. Hung.*, 65(1): 3-35.
- Hampson, E. (1990). Variations in sex-related cognitive abilities across the menstrual cycle. *Brain Cogn*, 14(1): 26-43.
- Hautzinger, M., Bailer, M., Worrall, H. & Keller, F. (2000). Beck-Depressions-Inventar (BDI). Testhandbuch. 3. Auflage. Bern: Huber.
- Hebb, D. O. (1949). The Organization of Behavior. New York: Wiley & Sons. S.61.
- Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K. & Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30(5): 425-447.
- Hellmann, W. (1965). Wörterbuch der Psychologie. 4. Auflage mit 33 Abbildungen. Stuttgart: Alfred Kröner. S. 170.
- Hikosaka, O., Sakai, K., Nakahara, H., Lu, X., Miyachi, S., Nakamura, K. & Rand, M. K. (2000). Neural Mechanisms for Learning of Sequential Procedures. In: Gazzaniga, M. S. (Hrsg.). *The New Cognitive Neuroscience*. Cambridge: MIT Press.
- Himmer, L., Müller, E., Gais, S. & Schönauer, M. (2017). Sleep-mediated memory consolidation depends on the level of integration at encoding. *Neurobiol. Learn. Mem.*, 137: 101-106.
- Hobson, J. A. (1990). Schlaf. Gehirnaktivität im Ruhezustand. Heidelberg: Spektrum.

- Hobson, J. A., McCarley, R. W. & Wyzinski, P. W. (1975). Sleep cycle oscillation: reciprocal discharge by two brainstem neuronal groups. *Science*, 189(4196): 55-8.
- Holz, J., Piosczyk, H., Landmann, N., Feige, B., Spiegelhalder, K., Riemann, D., Nissen, C. & Voderholzer, U. (2012). The Timing of Learning before Night-Time Sleep Differentially Affects Declarative and Procedural Long-Term Memory Consolidation in Adolescents. *PLoS One*, 7(7): e40963.
- Hoppe M. (2011). Normales EEG der Erwachsenen und Kinder. In: Ebner, A. and Deuschl, G. (Hrsg.). *EEG, 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Thieme. S. 42 – 47.
- Horne, J. A. & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int. J. Chronobiol.*, 4(2): 97-110.
- Huang, S., Deshpande, A., Yeo, S. C., Lo, J. C., Chee, M. W. & Gooley, J. J. (2016). Sleep Restriction Impairs Vocabulary Learning when Adolescents Cram for Exams: The Need for Sleep Study. *Sleep*, 39(9): 1681-1690.
- Iber, C., Ancoli-Israel, S., Chesson Jr., A. L. & Quan, S. F. (2007). *Das AASM-Manual zum Scoring von Schlaf und assoziierten Ereignissen (1. Edition)*. Westchester, IL: American Academy of Sleep Medicine.
- Ishizuka, Y., Pollak, C. P., Shirakawa, S., Kakuma, T., Azumi, K., Usui, A., Shiraishi, K., Fukuzawa, H. & Kariya, T. (1994). Sleep spindle frequency changes during the menstrual cycle. *J. Sleep Res.*, 3(1): 26-29.
- Jackson, D. N. (1998). *Multidimensional Aptitude Battery II: Manual*. Port Huron, MI: Sigma Assessment Systems.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. In: *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 10(2): 371–375.
- Jones, B. E. (2000). Basic mechanisms of sleep-wake states. In: Kryger, M. H., Roth T. & Dement, W. (Hrsg.). *Principles and practice of sleep medicine*. Philadelphia: WB Saunders. S. 134–154.
- Jones, B. E. (2003). Arousal systems. *Front. Biosci.*, 8: 438-451.
- Kapur, N. & Brooks, D. J. (1999). Temporally-specific retrograde amnesia in two cases of discrete bilateral hippocampal pathology. *Hippocampus*, 9(3): 247-54.
- Kapur, S., Craik, F. I., Tulving, E., Wilson, A. A., Houle, S. & Brown, G. M. (1994). Neuroanatomical correlates of encoding in episodic memory: levels of processing effect. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 91 (6): 2008-2011.
- Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J. J. & Sagi, D. (1994). Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, 265(5172): 679-682.

- Karsten, G. (2002). *Erfolgsgedächtnis: Wie Sie sich Zahlen, Namen, Fakten, Vokabeln einfach besser merken*. München: Goldmann.
- Karsten, G. (2011). Mnemotechniken – Strategien für außergewöhnliche Gedächtnisleistungen. In: Dresler, M. (Hrsg.). *Kognitive Leistungen*. Heidelberg: Spektrum. S. 57 – 76.
- King, B. R., Hoedlmoser, K., Hirschauer, F., Dolfen, N. & Albouy, G. (2017). Sleeping on the motor engram: The multifaceted nature of sleep-related motor memory consolidation. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 80: 1-22.
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *J. Exp. Psychol.*, 55(4): 352-358.
- Kirschbaum, C., Pirke, K. M. & Hellhammer, D. H. (1993). The 'Trier Social Stress Test'--a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*, 28(1-2): 76-81.
- Kirschbaum, C., Wolf, O.T., May, M., Wippich, W. & Hellhammer, D.H. (1996). Stress- and treatment-induced elevations of cortisol levels associated with impaired declarative memory in healthy adults. *Life Sci.*, 58(17): 1475-1483.
- Knoblauch, V., Martens, W. L., Wirz-Justice, A. & Cajochen, C. (2003a). Human sleep spindle characteristics after sleep deprivation. *Clin. Neurophysiol.*, 114(12): 2258-2267.
- Knoblauch, V., Martens, W., Wirz-Justice, A., Kräuchi, K. & Cajochen, C. (2003b). Regional differences in the circadian modulation of human sleep spindle characteristics. *Eur. J. Neurosci.*, 18(1): 155-163.
- Konrad, B. N. (2011). *Das perfekte Namensgedächtnis – Namen merken mit der 5-Sterne-Methode*. Offenbach/Main: Gabal Audio.
- Konrad, B. N. (2016). *Alles nur in meinem Kopf: Die Geheimnisse unseres Gehirns*. Munich: Ariston.
- Konrad, B. N. & Dresler, M. (2010). Grenzen menschlicher Gedächtnisleistungen. In: Baudson, T. G., Seemüller, A., Dresler, M. (Hrsg.). *Grenzen unseres Geistes*. Stuttgart: Hirzel.
- Kopelman, M. (1995). The Korsakoff syndrome. *British Journal of Psychiatry*, 166: 154-173.
- Kuhlmann, S., Piel, M. & Wolf, O. T. (2005). Impaired memory retrieval after psychosocial stress in healthy young men. *J. Neurosci.*, 25(11): 2977-2982.
- Kumar, V. M. (2010). Sleep is neither a passive nor an active phenomenon. *Sleep and Biological Rhythms*, 8: 163-169.
- Latka, M., Kozik, A., Jernajczyk, J., West, B. J., & Jernajczyk, W. (2005). Wavelet mapping of sleep spindles in young patients with epilepsy. *J. Physiol. Pharmacol.*, 56(4): 15-20.

- Lavie, P., Pratt, H., Scharf, B., Peled, R. & Brown, J. (1984). Localized pontine lesion: Nearly total absence of REM sleep. *Neurology*, 34(1): 118-120.
- Lechner, H. A., Squire, L. R. & Byrne, J. H. (1999). 100 years of consolidation -remembering Muller and Pilzecker. *Learn. Mem.*, 6(2): 77-87.
- LeDoux, J. E. (1989). Cognitive-Emotional Interactions in the Brain. *Cognition and Emotion*, 3(4): 267-289.
- Lee, M. G., Hassani, O. K. & Jones, B. E. (2005). Discharge of identified orexin/hypocretin neurons across the sleep-waking cycle. *J. Neurosci.*, 25(28): 6716-6720.
- Lehrl, S. (1977). *Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest-B (MWT-B)*. Erlangen: Perimed.
- Lewin, C., Wolgers, G. & Herlitz, A. (2001). Sex differences favoring women in verbal but not in visuospatial episodic memory. *Neuropsychology*, 15(2): 165-173.
- Lewin, I. & Glaubman, H. (1975). The effect of REM deprivation: Is it detrimental, beneficial, or neutral? *Psychophysiology*, 12(3): 349-353.
- Lo, J. C., Bennion, K. A. & Chee, M. W. (2016). Sleep restriction can attenuate prioritization benefits on declarative memory consolidation. *J. Sleep Res.*, 25(6): 664-672.
- Loftus, E. F. (1997). Creating false memories. *Sci. Am.*, 277(3): 70-75.
- Lømo, T. (1966). Frequency potentiation of excitatory synaptic activity in the dentate area of the hippocampal area. *Acta Physiologica Scandinavica*, 68(277): 28.
- Lupien, S. J., Gillin, C. J. & Hauger, R. L. (1999). Working memory is more sensitive than declarative memory to the acute effects of corticosteroids: a dose-response study in humans. *Behav. Neurosci.*, 113(3): 420-430.
- Lupien, S. J., Wilkinson, C. W., Brière, S., Ménard, C., Ng Ying Kin, N. M. & Nair, N. P. (2002). The modulatory effects of corticosteroids on cognition: studies in young human populations. *Psychoneuroendocrinology*, 27(3): 401-416.
- Lupien, S. J., Gaudreau, S., Tchiteya, B. M., Maheu, F., Sharma, S., Nair, N. P., Hauger, R. L., McEwen, B. S. & Meaney, M. J. (1997). Stress-induced declarative memory impairment in healthy elderly subjects: relationship to cortisol reactivity. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 82(7): 2070-2075.
- Luria, A. R. (1968). *The mind of a mnemonist*. New York: Basic Books.
- MacLeod, C.M. (1998). Directed Forgetting. In: Golding, J. M. and MacLeod, C. M. (Hrsg.). *Intentional Forgetting: Interdisciplinary approaches*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

- Maguire, E. A., Valentine, E. R., Wilding, J. M. & Kapur, N. (2003). Routes to remembering: the brains behind superior memory. *Nat. Neurosci.*, 6(1): 90-95.
- Maheu, F. S., Joobor, R. & Lupien, S. J. (2005). Declarative memory after stress in humans: differential involvement of the beta-adrenergic and corticosteroid systems. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 90(3): 1697-1704.
- Maki, P. M., Rich, J. B. & Rosenbaum, R. S. (2002). Implicit memory varies across the menstrual cycle: estrogen effects in young women. *Neuropsychologia*, 40(5): 518-529.
- Manns, J. R. & Squire, L. R. (2002). The medial temporal lobe and memory for facts and events. In: Baddeley, A., Kopelman, M., Wilson, B. (Hrsg.). *Handbook of Memory Disorders*. New York: John Wiley and Sons. S. 81–99.
- Maquet, P. (2001). The role of sleep in learning and memory. *Science*, 294(5544): 1048-1052.
- Marks, D. F. (1973). Visual imagery differences in the recall of pictures. *Br. J. Psychol.*, 64(1): 17-24.
- Massen, C. & Vaterrodt-Plunnecke, B. (2006). The role of proactive interference in mnemonic techniques. *Memory*, 14(2): 189-196.
- Mayer, G. (2011). Schlaf und Schlafstörungen im EEG. In: Ebner, A. and Deuschl, G. (Hrsg.). *EEG, 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage*. Stuttgart: Thieme. S. 147 – 152.
- Mayes, A. R. & Roberts, N. (2001). Theories of episodic memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 356(1413): 1395-1408.
- McCarley, R. W. & Hobson, J. A. (1975). Neuronal excitability modulation over the sleep cycle: a structural and mathematical model. *Science*, 189(4196): 58-60.
- McGaugh, J. L. & Herz, M. J. (1972). *Memory Consolidation*. San Francisco: Albion.
- Meier-Koll, A., Bussmann, B., Schmidt, C. & Neuschwander, D. (1999). Walking through a maze alters the architecture of sleep. *Percept. Mot. Skills*, 88(3 Pt 2): 1141-1159.
- Mesulam, M.-M. (2000). *Principles of behavioral and cognitive neurology, 2nd Edition*. New York: Oxford University Press.
- Mishkin, M. (1982). A memory system in the monkey. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 298: 85-95.
- Moè, A. & De Beni, R. (2004). Studying passages with the loci method: Are subject-generated more effective than experimenter-supplied loci?. *Journal of Mental Imagery*, 28(3-4): 75-86.
- Monfils, M. H., Plautz, E. J. & Kleim, J. A. (2005). In search of the motor engram: motor map plasticity as a mechanism for encoding motor experience. *Neuroscientist*, 11(5): 471-483.

- Monk, C. S. & Nelson, C. A. (2002). The effects of hydrocortisone on cognitive and neural function: a behavioral and event-related potential investigation. *Neuropsychopharmacology*, 26(4): 505-519.
- Morin, A., Doyon, J., Dostie, V., Barakat, M., Hadj Tahar, A., Korman, M., Benali, H., Karni, A., Ungerleider, L. G. & Carrier, J. (2008). Motor sequence learning increases sleep spindles and fast frequencies in post-training sleep. *Sleep*, 31(8): 1149-1156.
- Morris, P. E. & Greer, P. J. (1983). The effectiveness of the phonetic mnemonic system. *Human Learning: Journal of Practical Research & Applications*, 3: 137-142.
- Moruzzi, G. & Magoun, H. W. (1949). Brain stem reticular formation and activation of the EEG. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1(4): 455-473.
- Moscovitch, M. (1992). Memory and Working-with-Memory: A Component Process Model Based on Modules and Central Systems. *J. Cogn. Neurosci.*, 4(3): 257-67.
- Müller, G. E. & Pilzecker, A. (1900). Experimentelle Beiträge zur Lehre von Gedächtnis. *Z. Psychol.* 1: 1-300.
- Müller, N. C. J., Konrad, B. N., Kohn, N., Muñoz-López, M., Czisch, M., Fernández, G. & Dresler, M. (2018). Hippocampal-caudate nucleus interactions support exceptional memory performance. *Brain Struct. Funct.*, 223(3): 1379-1389.
- Myers, D. G. & Wilson, J. (2014). Gedächtnis. In: Myers, D. G. (Hrsg.), *Psychologie*, 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer. S. 327-362.
- Nader, R. & Smith, C. (2001). The relationship between stage 2 sleep spindles and intelligence. *Sleep*, 24: A160.
- Nader, R. & Smith, C. (2003). A role for stage 2 sleep in memory processing. In: Maquet, P., Smith, C. and Stickgold, R. (Hrsg.). *Sleep and Brain Plasticity*. New York: Oxford University Press. S. 87–98.
- Nater, U. M., Moor, C., Okere, U., Stallkamp, R., Martin, M., Ehlert, U. & Kliegel, M. (2007). Performance on a declarative memory task is better in high than low cortisol responders to psychosocial stress. *Psychoneuroendocrinology*, 32(6): 758-763.
- Nauta, W. J. H. & Kuypers, H. G. J. M. (1958). Some ascending pathways in the brain stem reticular formation. In: Jasper, H. H., Proctor, L. D., Knighton, R. S., Noshay, W. C. & Costello, R. T. (Hrsg.). *Reticular formation of the brain*. Boston: Little, Brown and Co. S. 3–30.
- Nicolas, A., Petit, D., Rompré, S. & Montplaisir, J. (2001). Sleep spindle characteristics in healthy subjects of different age groups. *Clin. Neurophysiol.*, 112(3): 521-527.

- Novelli, L., Ferri, R. & Bruni, O. (2010). Sleep classification according to AASM and Rechtschaffen and Kales: effects on sleep scoring parameters of children and adolescents. *J. Sleep Res.*, 19(1 Pt 2): 238-247.
- Nyberg, L., Cabeza, R. & Tulving, E. (1996). PET studies of encoding and retrieval: The HERA model. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3: 135–148.
- Nyberg, L., Habib, R., McIntosh, A. R. & Tulving, E. (2000). Reactivation of encoding-related brain activity during memory retrieval. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(20): 11120-4.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1): 97-113.
- Oswald, W. D. & Roth, E. (1987). *Der Zahlen-Verbindungs-Test, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Göttingen: Hogrefe.
- Paivio A. (1965). Abstractness, imagery, and meaningfulness in paired-associate learning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 4(1): 32-38.
- Pape, H.-C. (2010a). Integrative Funktionen des Gehirns. In: Klinke, R., Pape, H.-C., Kurtz, A. und Silbernagl, S. (Hrsg.). *Physiologie, 6. Auflage*. Stuttgart: Thieme. S. 815-848.
- Pape, H.-C. (2010b). Wachheit und Schlaf: Rhythmen des Gehirns im Muster des Elektrozephalogramms. In: Klinke, R., Pape, H.-C., Kurtz, A. und Silbernagl, S. (Hrsg.). *Physiologie, 6. Auflage*. Stuttgart: Thieme. S. 849 – 864.
- Parsons, O. & Nixon, S. (1993). Neurobehavioral sequelae of alcoholism. *Neurologic Clinics*, 11: 205-218.
- Patton, G. W. (1986). The effect of the phonetic mnemonic system on memory for numeric material. *Human Learning: Journal of Practical Research & Applications*, 5: 21-28.
- Patton, G. W. & Lantzy, P. D. (1987). Testing the limits of the phonetic mnemonic system. *Appl. Cognit. Psychol.*, 1: 263–271.
- Patton, G. W., D'agaro, W. R. & Gaudette, M. D. (1991). The effect of subject-generated and experimentersupplied code words on the phonetic mnemonic system. *Appl. Cognit. Psychol.*, 5: 135–148.
- Peigneux, P., Laureys, S., Delbeuck, X. and Maquet, P. (2001). Sleeping brain, learning brain. The role of sleep for memory systems. *Neuroreport*, 12(18): A111-124.
- Peters, K. R., Ray, L., Smith, V. & Smith, C. (2008). Changes in the density of stage 2 sleep spindles following motor learning in young and older adults. *J. Sleep Res.*, 17(1): 23-33.

- Petit, D., Gagnon, J. F., Fantini, M. L., Ferini-Strambi, L. & Montplaisir, J. (2004). Sleep and quantitative EEG in neurodegenerative disorders. *J. Psychosom. Res.*, 56(5): 487-496.
- Peyron, C., Faraco, J., Rogers, W., Ripley, B., Overeem, S., Charnay, Y., Nevšimalová, S., Aldrich, M.S., Reynolds, D.F., Albin, R., Li, R., Hungs, M., Pedrazzoli, M., Padigaru, M., Kucherlapati, M., Fan, J., Maki, R., Lammers, G.J., Bouras, C., Kucherlapati, R.S., Nishino, S., & Mignot, E. (2000). A mutation in a case of early onset narcolepsy and a generalized absence of hypocretin peptides in human narcoleptic brains. *Nature Medicine*, 6: 991-997.
- Plihal, W. & Born, J. (1997). Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *J. Cogn. Neurosci.*, 9(4): 534-547.
- Plihal, W. & Born, J. (1999a). Effects of early and late nocturnal sleep on priming and spatial memory. *Psychophysiology*, 36(5): 571-582.
- Plihal, W. & Born, J. (1999b). Memory consolidation in human sleep depends on inhibition of glucocorticoid release. *Neuroreport*, 10(13): 2741-2747.
- Postma, A., Winkel, J., Tuiten, A. & van Honk, J. (1999). Sex differences and menstrual cycle effects in human spatial memory. *Psychoneuroendocrinology*, 24(2): 175-192.
- Potkin, K. T. & Bunney Jr., W. E. (2012). Sleep improves memory: the effect of sleep on long term memory in early adolescence. *PLoS One*, 7(8).
- Puck, M. & Schloffer, H. (2010). Erwachsenenbildung. In: Schloffer, H., Prang, E. and Prick-Salzman, A. (Hrsg.). *Gedächtnistraining: Theoretische und praktische Grundlagen*. Heidelberg: Springer. S. 141 – 143.
- Radvansky, G. A. & Tamplin, A. K. (2012). Memory. In: Ramachandran, V. S. (Hrsg.). *Encyclopedia of Human Behavior (second edition)*. USA: Elsevier. S. 585 – 592.
- Rasch, B. & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiol. Rev.*, 93(2): 681-766.
- Rasch, B., Pommer, J., Diekelmann, S. & Born, J. (2009). Pharmacological REM sleep suppression paradoxically improves rather than impairs skill memory. *Nat. Neurosci.*, 12(4): 396-397.
- Rauchs, G., Schabus, M., Parapatics, S., Bertran, F., Clochon, P., Hot, P., Denise, P., Desgranges, B., Eustache, F., Gruber, G. & Anderer, P. (2008). Is there a link between sleep changes and memory in Alzheimer's disease?. *Neuroreport*, 19(11): 1159-1162.
- Raven, J. C., Court, J. H., & Raven, J. (1976). *Manual for Raven's Progressive Matrices*. London: Lewis.
- Rechtschaffen, A. & Kales, A. (1968). *A manual standardized terminology, techniques and scoring system for sleep states of human subjects*. Washington DC: Public Health Service, US Government Printing Office.

- Reed, J. M. & Squire, L. R. (1998). Retrograde amnesia for facts and events: Findings from four new cases. *Journal of Neuroscience*, 18(10): 3943-3954.
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A. & Press, D. Z. (2004). Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep. *Curr. Biol.*, 14(3): 208-212.
- Roediger, H. L. & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories: Remembering words not presented in lists. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 24(4): 803-814.
- Roth, M., Shaw, J. & Green, J. (1956). The form, voltage distribution and physiological significance of the K-complex. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 8(3): 385-402.
- Ruch, S., Markes, O., Duss, S. B., Oppliger, D., Reber, T. P., Koenig, T., Mathis, J., Roth, C. & Henke, K. (2012). Sleep stage II contributes to the consolidation of declarative memories. *Neuropsychologia*, 50(10): 2389-2396.
- Ruehland, W. R., O'Donoghue, F. J., Pierce, R. J., Thornton, A. T., Singh, P., Copland, J. M., Stevens, B. & Rochford, P. D. (2011). The 2007 AASM recommendations for EEG electrode placement in polysomnography: impact on sleep and cortical arousal scoring. *Sleep*, 34(1): 73-81.
- Ruehland, W. R., Rochford, P. D., O'Donoghue, F. J., Pierce, R. J., Singh, P. & Thornton, A. T. (2009). The new AASM criteria for scoring hypopneas: impact on the apnea hypopnea index. *Sleep*, 32(2): 150-157.
- Sakamoto, T., Porter, L. L. & Asanuma, H. (1987). Long-lasting potentiation of synaptic potentials in the motor cortex produced by stimulation of the sensory cortex in the cat: a basis of motor learning. *Brain Res.*, 413(2): 360-4.
- Saper, C. B. (1985). Organization of cerebral cortical afferent systems in the rat. II. Hypothalamocortical projections. *J. Comp. Neurol.*, 237(1): 21-46.
- Saper, C. B., Chou, T. C. & Scammell, T. E. (2001). The sleep switch: hypothalamic control of sleep and wakefulness. *Trends Neurosci.*, 24(12): 726-31.
- Saper, C. B., Scammell, T. E. & Lu, J. (2005). Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms. *Nature*, 437(7063): 1257-1263.
- Saper, C. B., Sherin, J. E. & Elmquist, J. K. (1997). Role of the ventrolateral preoptic area in sleep induction. In: Hayaishi, O. & Inou, S. (Hrsg.). *Sleep and arousal disorders: from molecule to behavior*. Tokyo: Academic Press. S. 281–294.
- Schabus, M., Gruber, G., Parapatics, S., Sauter, C., Klösch, G., Anderer, P., Klimesch, W., Saletu, B. & Zeitlhofer, J. (2004). Sleep spindles and their significance for declarative memory consolidation. *Sleep*, 27(8): 1479-1485.

- Schabus, M., Hödlmoser, K., Pecherstorfer, T. & Klösch, G. (2005). Influence of Midday Naps on Declarative Memory Performance and Motivation. *Somnologie*, 9(3): 148-153.
- Schabus, M., Hödlmoser, K., Gruber, G., Sauter, C., Anderer, P., Klösch, G., Parapatics, S., Saletu, B., Klimesch, W. & Zeitlhofer, J. (2006). Sleep spindle-related activity in the human EEG and its relation to general cognitive and learning abilities. *Eur. J. Neurosci.*, 23(7): 1738-1746.
- Schabus, M., Hödlmoser, K., Pecherstorfer, T. & Anderer, P. (2008). Interindividual sleep spindle differences and their relation to learning-related enhancements. *Brain Res.*, 1191: 127-135.
- Schandry, R. (2011). *Biologische Psychologie, 3. Auflage*. Basel: Beltz. S. 374 – 382.
- Schieber, M. H. (1990). How might the motor cortex individuate movements? *Trends Neurosci.*, 13(11): 440-5.
- Schloffer, H., Friese, A., Auer, S., Gamsjäger, M., Donabauer, Y. & Span, E. (2010). Gedächtnistraining bei Demenz. In: Schloffer, H., Prang, E., Prick-Salzman, A. (Hrsg.). *Gedächtnistraining: Theoretische und praktische Grundlagen*. Heidelberg: Springer. S. 173 – 187.
- Schmidt, C., Peigneux, P., Muto, V., Schenkel, M., Knoblauch, V., Münch, M., de Quervain, D. J., Wirz-Justice, A. & Cajochen, C. (2006). Encoding difficulty promotes postlearning changes in sleep spindle activity during napping. *J. Neurosci.*, 26(35): 8976-8982.
- Seeck-Hirschner, M., Baier, P. C., Weinhold, S. L., Dittmar, M., Heiermann, S., Aldenhoff, J. B. & Göder, R. (2012). Declarative memory performance is associated with the number of sleep spindles in elderly women. *Am. J. Geriatr. Psychiatry*, 20(9): 782-788.
- Shallice, T., Fletcher, P., Frith, C. D., Grasby, P., Frackowiak, R. S. J. & Dolan, R. J. (1994). Brain regions associated with acquisition and retrieval of verbal episodic memory. *Nature*, 368(6472): 633–635.
- Sherin, J. E., Elmquist, J. K., Torrealba, F. & Saper, C. B. (1998). Innervation of histaminergic tuberomammillary neurons by GABAergic and galaninergic neurons in the ventrolateral preoptic nucleus of the rat. *J. Neurosci.*, 18(12): 4705-4721.
- Shibagaki, M. & Kiyono, S. (1983). Duration of spindle bursts during nocturnal sleep in mentally retarded children. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 55(6): 645-651.
- Siegel, J. (2004). Brain mechanisms that control sleep and waking. *Naturwissenschaften*, 91(8): 355-365.
- Smith, C. & MacNeill, C. (1994). Impaired motor memory for a pursuit rotor task following Stage 2 sleep loss in college students. *J. Sleep Res.*, 3(4): 206-213.

- Smith, C. & Wong, P. T. (1991). Paradoxical sleep increases predict successful learning in a complex operant task. *Behav. Neurosci.*, 105(2): 282-288.
- Smith, A. P., Henson, R. N., Dolan, R. J., Rugg, M.D. (2004). fMRI correlates of the episodic retrieval of emotional contexts. *Neuroimage*, 22(2): 868-878.
- Späth-Schwalbe, E., Uthgenannt, D., Voget, G., Kern, W., Born, J. & Fehm, H. L. (1993). Corticotropin-releasing hormone-induced adrenocorticotropin and cortisol secretion depends on sleep and wakefulness. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 77(5): 1170-1173.
- Squire, L. R. (1992). Memory and the hippocampus: a synthesis from findings with rats, monkeys, and humans. *Psychol. Rev.*, 99(2): 195-231.
- Squire, L. R., Genzel, L., Wixted, J. T. & Morris, R. G. (2015). Memory Consolidation. *Cold Spring Harb Perspect Biol.*, 7(8): a021766.
- Squire, L. R. & Zola, S. M. (1991). The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253(5026): 1380-1386.
- Standing, L. (1973). Learning 10,000 pictures. *Q. J. Exp. Psychol.*, 25(2): 207-222.
- Starzl, T. E., Taylor, C. W. & Magoun, H. W. (1951). Ascending conduction in reticular activating system, with special reference to the diencephalon. *J. Neurophysiol.*, 14(6): 461-477.
- Stenger, C. (2004). *Warum fällt das Schaf vom Baum? Gedächtnistraining mit der Jugendweltmeisterin*. Frankfurt/Main: Campus.
- Steriade, M. (2005). Brain Electrical Activity and Sensory Processing During Waking and Sleep States. *Principles and Practice of Sleep Medicine* (S. 101-119).
- Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, 437(7063): 1272-1278.
- Suzuki, W. A. (2003). Declarative versus episodic: two theories put to the test. *Neuron*, 38: 5-7.
- Szymusiak, R., Alam, N., Steininger, T. L. & McGinty, D. (1998). Sleep-waking discharge patterns of ventrolateral preoptic/anterior hypothalamic neurons in rats. *Brain Res.*, 803(1-2): 178-88.
- Teyler, T. J., DiScenna, P. (1986). The hippocampal memory indexing theory. *Behav. Neurosci.*, 100(2): 147-54.
- Thannickal, T.C., Moore, R.Y., Nienhuis, R., Ramanathan, L., Gulyani, S., Aldrich, M.S., Cornford, M., & Siegel, J.M. (2000). Reduced Number of Hypocretin Neurons in Human Narcolepsy. *Neuron*, 27: 469-474.
- Tilley, A. J. & Empson, J. A. C. (1978). REM sleep and memory consolidation. *Biol. Psychol.*, 6(4): 293-300.

- Tops, M., van der Pompe, G., Baas, D., Mulder, L. J., Den Boer, J. A., Meijman, T. F. & Korf, J. (2003). Acute cortisol effects on immediate free recall and recognition of nouns depend on stimulus valence. *Psychophysiology*, 40(2): 167-173.
- Tranel, D. & Damasio, A. R. (1995). Neurobiological foundations of human memory. In: Baddeley, A. D., Wilson, B. A. and Watts, F. N. (Hrsg.), *Handbook of memory disorders*. Oxford, England: John Wiley & Sons. S. 27-50.
- Tse, D., Langston, R. F., Kakeyama, M., Bethus, I., Spooner, P. A., Wood, E. R., Witter, M. P., Morris, R. G. (2007). Schemas and memory consolidation. *Science*, 316(5821): 76-82.
- Tse, D., Takeuchi, T., Kakeyama, M., Kajii, Y., Okuno, H., Tohyama, C., Bitto, H., Morris, R. G. (2011). Schema-dependent gene activation and memory encoding in neocortex. *Science*, 333(6044): 891-895.
- Tucker, M. A. & Fishbein, W. (2008). Enhancement of declarative memory performance following a daytime nap is contingent on strength of initial task acquisition. *Sleep*, 31(2): 197-203.
- Tucker, M. A., Hirota, Y., Wamsley, E. J., Lau, H., Chaklader, A. & Fishbein, W. (2006). A daytime nap containing solely non-REM sleep enhances declarative but not procedural memory. *Neurobiol. Learn Mem.*, 86(2): 241-247.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In: Tulving, E. and Donaldson, W. (Hrsg.). *Organization of memory*. New York: Academic Press. S. 381-403.
- Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology*, 26(1): 1-12.
- Tulving, E., Kapur, S., Markowitsch, H. J., Craik, F. I., Habib, R. & Houle, S. (1994). Neuroanatomical correlates of retrieval in episodic memory: auditory sentence recognition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 91(6): 2012-2015.
- Ujma, P. P. (2018). Sleep spindles and general cognitive ability – A meta-analysis. *Sleep Spindles & Cortical Up States*, 1-17.
- Ujma, P. P., Konrad, B. N., Genzel, L., Bleifuss, A., Simor, P., Pótári, A., Körmendi, J., Gombos, F., Steiger, A., Bódizs, R. & Dresler, M. (2014). Sleep spindles and intelligence: evidence for a sexual dimorphism. *J. Neurosci.*, 34(49): 16358-16368.
- Ukrainitseva, Y. V. & Dorokhov, V. B. (2011). [Effect of daytime nap on consolidation of declarative memory in humans]. *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I P Pavlova*, 61(2): 161-169.
- Van der Helm, E., Gujar, N., Nishida, M. & Walker, M. P. (2011). Sleep-dependent facilitation of episodic memory details. *PLoS One*, 6(11): e27421.

- Vargha-Khadem, F., Gadian, D. G., Watkins, K. E., Connelly, A., Van Paesschen, W. & Mishkin, M. (1997). Differential effects of early hippocampal pathology on episodic and semantic memory. *Science*, 277(5324): 376-80.
- 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.
- Wamsley, E. J., Tucker, M. A., Shinn, A. K., Ono, K. E., McKinley, S. K., Ely, A. V., Goff, D. C., Stickgold, R. & Manoach, D. S. (2012). Reduced sleep spindles and spindle coherence in schizophrenia: mechanisms of impaired memory consolidation?. *Biol. Psychiatry*, 71(2): 154-161.
- Wang, A. Y. & Thomas, M. H. (2000). Looking for long-term mnemonic effects on serial recall: the legacy of Simonides. *Am. J. Psychol.*, 113(3): 331-340.
- Wechsler, D. (1997). *The Wechsler Adult Intelligence Scale (3rd ed.)*. San Antonio: The Psychological Corporation.
- Weikel, J. (2005). Untersuchungen zum Einfluss von Ghrelin auf das Schlaf-EEG und die assoziierte nächtliche Hormonaktivität bei gesunden Probanden. Doktorarbeit an der Medizinische Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Weiß, R. H. (2006). *CFT 20-R mit WS/ZF-R. Grundintelligenztest Skala 2 - Revision (CFT 20-R) mit Wortschatztest und Zahlenfolgentest - Revision (WS/ZF-R)*. Göttingen: Hogrefe.
- Wiltgen, B. J., Brown, R. A., Talton, L. E. & Silva, A. J. (2004). New Circuits for Old Memories: The Role of the Neocortex in Consolidation. *Neuron*, 44(1): 101-108.
- Wolf, O. T., Convit, A., McHugh, P. F., Kandil, E., Thorn, E. L., De Santi, S., McEwen, B. S. & de Leon, M. J. (2001). Cortisol differentially affects memory in young and elderly men. *Behav. Neurosci.*, 115(5): 1002-1011.
- Wolf, O. T., Schommer, N. C., Hellhammer, D. H., McEwen, B. S. & Kirschbaum, C. (2001). The relationship between stress induced cortisol levels and memory differs between men and women. *Psychoneuroendocrinology*, 26(7): 711-720.
- Worthen, J. B. & Hunt, R. R. (2011). *Mnemonology: Mnemonics for the 21st Century*. New York: Psychology Pres.
- Yamadori A. (1971). Role of the spindles in the onset of sleep. *Kobe J. Med Sci.*, 17(3): 97-111.
- Yaroush, R., Sullivan, M. J. & Ekstrand, B. R. (1971). Effect of sleep on memory: II. Differential effect of the first and second half of the night. *J. Exp. Psychol.*, 88(3): 361-366.
- Zygierewicz, J., Blinowska, K. J., Durka, P. J., Szelenberger, W., Niemcewicz, S. & Androsiuk, W. (1999). High resolution study of sleep spindles. *Clin. Neurophysiol.*, 110(12): 2136-2147.

Anhang

Anhang 1: Lernaufgaben

1.1. Directed Forgetting

Erinnern / Vergessen

Name:

Bitte schreibe alle(!) Worte auf, die gestern im Test vorkamen – also auch (!) die „Vergessen“-Worte.
Bitte versuche Dich für beide Arten von Worten so gut es geht zu erinnern. Falls Du Dich erinnern
kannst, kennzeichne jeweils durch ein (E) oder (V) um welche Wortart es sich handelt.

Abbildung 18. Auflistung von erinnerten und vergessenen Wörter.

Im Folgenden siehst Du eine Liste mit Wörtern, von denen nicht alle in der Lernphase vorkam. Bitte kreuze an, ob das Wort vorkam oder nicht. Beurteile außerdem, ob Du Dich genau an das Vorkommen erinnern kannst oder ob Du lediglich das unbestimmte Gefühl hast, das Wort gesehen zu haben. Zuletzt versuche Dich zu erinnern, ob das Wort ein „Erinnern!“- oder „Vergessen!“-Wort war.

	Ja, das Wort kam vor	Nein, das Wort kam nicht vor	Ich erinnere mich bewusst	Keine bewusste Erinnerung ans Lernen	Es war ein „Erinnern!“-Wort	Es war ein „Vergessen!“-Wort
Eisenbahn	J	N	!	~	E!	V!
Frosch	J	N	!	~	E!	V!
Landschaft	J	N	!	~	E!	V!
Stadt	J	N	!	~	E!	V!
Meer	J	N	!	~	E!	V!
Regal	J	N	!	~	E!	V!
Kleidung	J	N	!	~	E!	V!
Museum	J	N	!	~	E!	V!
Flasche	J	N	!	~	E!	V!
Wabe	J	N	!	~	E!	V!
Bett	J	N	!	~	E!	V!
Buch	J	N	!	~	E!	V!
Gefahr	J	N	!	~	E!	V!
Plage	J	N	!	~	E!	V!
Rauch	J	N	!	~	E!	V!
Schiedsrichter	J	N	!	~	E!	V!
Petersilie	J	N	!	~	E!	V!
Alphabet	J	N	!	~	E!	V!
Kurier	J	N	!	~	E!	V!
Lineal	J	N	!	~	E!	V!
Schule	J	N	!	~	E!	V!
Verrat	J	N	!	~	E!	V!
Vogel	J	N	!	~	E!	V!
Abitur	J	N	!	~	E!	V!
Bohnen	J	N	!	~	E!	V!
Drama	J	N	!	~	E!	V!
Ritter	J	N	!	~	E!	V!
Prinz	J	N	!	~	E!	V!
Wende	J	N	!	~	E!	V!
Monster	J	N	!	~	E!	V!
Popcorn	J	N	!	~	E!	V!
Brief	J	N	!	~	E!	V!
Cowboy	J	N	!	~	E!	V!
Gold	J	N	!	~	E!	V!
Hafer	J	N	!	~	E!	V!
Orkan	J	N	!	~	E!	V!
Gemälde	J	N	!	~	E!	V!
Zollstock	J	N	!	~	E!	V!
Zusage	J	N	!	~	E!	V!
Küche	J	N	!	~	E!	V!
Kino	J	N	!	~	E!	V!
Lappen	J	N	!	~	E!	V!
Familie	J	N	!	~	E!	V!
Hammer	J	N	!	~	E!	V!
Mauer	J	N	!	~	E!	V!
Industrie	J	N	!	~	E!	V!
Fisch	J	N	!	~	E!	V!
Roller	J	N	!	~	E!	V!
Turm	J	N	!	~	E!	V!
Blut	J	N	!	~	E!	V!
Gewei	J	N	!	~	E!	V!
Holz	J	N	!	~	E!	V!
Mappe	J	N	!	~	E!	V!
Füller	J	N	!	~	E!	V!
Handschuh	J	N	!	~	E!	V!
Komplexität	J	N	!	~	E!	V!
Laterne	J	N	!	~	E!	V!
Nest	J	N	!	~	E!	V!
Sonate	J	N	!	~	E!	V!
Schlaf	J	N	!	~	E!	V!
Würfel	J	N	!	~	E!	V!
Kaffee	J	N	!	~	E!	V!

Abbildung 19. Fragebogen von erinnerten und vergessenen Wörter.
Teil 1 von 2.

Beruf	J	N	!	~	E!	VI
Eimer	J	N	!	~	E!	VI
Buchstabe	J	N	!	~	E!	VI
Angst	J	N	!	~	E!	VI
Fuchs	J	N	!	~	E!	VI
Fahne	J	N	!	~	E!	VI
Dudelsack	J	N	!	~	E!	VI
Bienenstock	J	N	!	~	E!	VI
Wissenschaft	J	N	!	~	E!	VI
Hirsch	J	N	!	~	E!	VI
Semester	J	N	!	~	E!	VI
Lawine	J	N	!	~	E!	VI
Nagel	J	N	!	~	E!	VI
Anstand	J	N	!	~	E!	VI
Hahn	J	N	!	~	E!	VI
Dose	J	N	!	~	E!	VI
Ring	J	N	!	~	E!	VI
Fluss	J	N	!	~	E!	VI
Berlin	J	N	!	~	E!	VI
Porto	J	N	!	~	E!	VI
Wolle	J	N	!	~	E!	VI
Gruppe	J	N	!	~	E!	VI
Mist	J	N	!	~	E!	VI
Deckel	J	N	!	~	E!	VI
Pferd	J	N	!	~	E!	VI
Italien	J	N	!	~	E!	VI
Hafen	J	N	!	~	E!	VI
Drache	J	N	!	~	E!	VI
Zeitung	J	N	!	~	E!	VI
Balkon	J	N	!	~	E!	VI
Gerte	J	N	!	~	E!	VI
Diebstahl	J	N	!	~	E!	VI
Küste	J	N	!	~	E!	VI
Tulpe	J	N	!	~	E!	VI
Keule	J	N	!	~	E!	VI
Blume	J	N	!	~	E!	VI
Wanne	J	N	!	~	E!	VI
Bakterien	J	N	!	~	E!	VI
Wut	J	N	!	~	E!	VI
Not	J	N	!	~	E!	VI
Wein	J	N	!	~	E!	VI
Wohnung	J	N	!	~	E!	VI
Schmerz	J	N	!	~	E!	VI
Himmelreich	J	N	!	~	E!	VI
Protest	J	N	!	~	E!	VI
Wiese	J	N	!	~	E!	VI
Zigarette	J	N	!	~	E!	VI
Futter	J	N	!	~	E!	VI
Diamant	J	N	!	~	E!	VI
Morgen	J	N	!	~	E!	VI
Späne	J	N	!	~	E!	VI
Rathaus	J	N	!	~	E!	VI
Schal	J	N	!	~	E!	VI
Chaos	J	N	!	~	E!	VI
Brasilien	J	N	!	~	E!	VI
Nadel	J	N	!	~	E!	VI
Elefant	J	N	!	~	E!	VI
Allee	J	N	!	~	E!	VI
Millimeter	J	N	!	~	E!	VI
Sekretärin	J	N	!	~	E!	VI
Hefter	J	N	!	~	E!	VI
Lama	J	N	!	~	E!	VI
Retter	J	N	!	~	E!	VI
Ergebnis	J	N	!	~	E!	VI
Griff	J	N	!	~	E!	VI
Schirm	J	N	!	~	E!	VI
Tendenz	J	N	!	~	E!	VI
Stall	J	N	!	~	E!	VI
Diktat	J	N	!	~	E!	VI
See	J	N	!	~	E!	VI
Holland	J	N	!	~	E!	VI
Karte	J	N	!	~	E!	VI
Storch	J	N	!	~	E!	VI
Zweifel	J	N	!	~	E!	VI
Angel	J	N	!	~	E!	VI
Meister	J	N	!	~	E!	VI
Diskette	J	N	!	~	E!	VI
Blatt	J	N	!	~	E!	VI
Frühstück	J	N	!	~	E!	VI
Garten	J	N	!	~	E!	VI
Einladung	J	N	!	~	E!	VI
Gebäude	J	N	!	~	E!	VI
Schmied	J	N	!	~	E!	VI
Schachtel	J	N	!	~	E!	VI
Palast	J	N	!	~	E!	VI
Steckdose	J	N	!	~	E!	VI
Fußball	J	N	!	~	E!	VI
Zaun	J	N	!	~	E!	VI

Abbildung 20. Fragebogen von erinnerten und vergessenen Wörter.
Teil 2 von 2.

1.2. False Memories

Name: _____

	Ja, das Wort kam vor	Nein, das Wort kam nicht vor	Ich bin absolut sicher	Ich bin eher sicher	Ich bin eher unsicher	Ich musste raten	Ich erinnere mich bewusst	Keine bewusste Erinnerung ans Lernen
Teig	J	N						
steil	J	N						
Bart	J	N						
schön	J	N						
Schnecke	J	N						
Stuhl	J	N						
Musik	J	N						
Höhle	J	N						
Apfel	J	N						
glücklich	J	N						
Vorhang	J	N						
Himmel	J	N						
schwarz	J	N						
Plüsch	J	N						
Abfall	J	N						
Oberhaupt	J	N						
Gesundheit	J	N						
Dieb	J	N						
Müll	J	N						
naschen	J	N						
Schlüssel	J	N						
Mädchen	J	N						
Staat	J	N						

	Ja, das Wort kam vor	Nein, das Wort kam nicht vor	Ich bin absolut sicher	Ich bin eher sicher	Ich bin eher unsicher	Ich musste raten	Ich erinnere mich bewusst	Keine bewusste Erinnerung ans Lernen
Stille	J	N						
schnell	J	N						
Sattel	J	N						
Nacht	J	N						
sauer	J	N						
Handtasche	J	N						
Raubkatze	J	N						
Fliege	J	N						
Flagge	J	N						
Wasser	J	N						
Schnarchen	J	N						
Vehikel	J	N						
Pyramide	J	N						
Eis	J	N						
stabil	J	N						
Armee	J	N						
Junge	J	N						
U-Bahn	J	N						
Nase	J	N						
gemein	J	N						
Temperament	J	N						
Tiger	J	N						
Tür	J	N						

Abbildung 21. Fragebogen zur falschen Erinnerung. Seite 1 von 2.

Knopf	J	N												
Lkw	J	N												
Obst	J	N												
Biss	J	N												
Wetter	J	N												
riechen	J	N												
Instrument	J	N												
Sand	J	N												
offen	J	N												
Auto	J	N												
stehlen	J	N												
Netz	J	N												
schnuppern	J	N												
langsam	J	N												
Brot	J	N												
Doktor	J	N												
Zitrone	J	N												
hören	J	N												
Infanterie	J	N												
Löwe	J	N												
Roggen	J	N												
Kirsche	J	N												
Hemd	J	N												
Luftwaffe	J	N												
Dorf	J	N												
robust	J	N												
Weste	J	N												
Tod	J	N												
Abwasser	J	N												
Schach	J	N												
heiß	J	N												
Emblem	J	N												
zeichnen	J	N												
Wolke	J	N												
Maus	J	N												
Note	J	N												
Patient	J	N												
Mann	J	N												
Klebstoff	J	N												
Spinne	J	N												
kalt	J	N												
Knöchel	J	N												
wehen	J	N												
Kleidchen	J	N												
Limonade	J	N												
Krankenschwester	J	N												
Bluse	J	N												
zögernd	J	N												
Butter	J	N												
Frau	J	N												
Strecke	J	N												
süß	J	N												
niedrig	J	N												
Nähgarn	J	N												
Pause	J	N												
Schrott	J	N												
Geld	J	N												
Suppe	J	N												
groß	J	N												
weiß	J	N												
Marine	J	N												
Radio	J	N												

Abbildung 22. Fragebogen zur falschen Erinnerung. Seite 2 von 2.

1.3. Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter

Maria Müller

Viele Menschen beobachteten die Feuerwehr,

Ein des Mordes Verdächtiger

Abbildung 23. Fragebogen zur Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter. Teil 1 von 3:
Kurzgeschichten.

	Zahlenfolge 1	Zahlenfolge 2	Zahlenfolge 3
1	3	4	1
2			
3			
4			
5			
6	7	5	1
7			
8			
9			
10			
11	8	5	4
12			
13			
14			
15			
16	9	9	0
17			
18			
19			
20			
21	1	3	2
22			
23			
24			
25			
26	7	4	4
27			
28			
29			
30			

Abbildung 24. Fragebogen zur Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter. Teil 2 von 3: Zahlen.

	Wortliste 1	Wortliste 2	Wortliste 3
1	aber	zudem	allein
2			
3			
4			
5			
6	überhaupt	vielleicht	kein
7			
8			
9			
10			
11	vielfach	häufig	dann
12			
13			
14			
15			
16	um	einfach	einige
17			
18			
19			
20			
21	gar	voll	selbst
22			
23			
24			
25			
26	immer	immerhin	immer
27			
28			
29			
30			

Abbildung 25. Fragebogen zur Kurzgeschichten/Zahlen/Wörter. Teil 3 von 3: Wörter.

Anhang 2: Andere Tests

2.1. Lern- und Gedächtnistest (LGT-3 Form B).

Dieser Test erfasst die Merkfähigkeit sowie die Feststellung eines allgemeinen Gedächtnisquotienten, insbesondere von Personen mit überdurchschnittlicher Intelligenz, das heißt $IQ \geq 110$. Der Test besteht aus 6 Subtests, in denen das Erlernen und Behalten von figuralem, verbalem und numerischem Material gemessen wird. Die Wiedergabe erfolgt nach der Methode der freien Reproduktion oder des Wiedererkennens. Die Testuntersuchung gliedert sich in eine Lernphase und eine Reproduktionsphase (Bäumler, 1974).

2.2. Zahlenverbindungstest (ZVT).

Der Test dient der Erfassung der basalen, allen Intelligenzleistungen zugrundeliegenden, weitgehend milieu-unabhängigen und genetisch bedingten kognitiven Leistungsgeschwindigkeit. Dabei wurde ein Blatt mit willkürlich angeordneten Zahlen vorgelegt und die Probanden sollten die Zahlen in ihrer numerischen Reihenfolge miteinander verbinden. Die Bearbeitungszeit der einzelnen Aufgaben wurde protokolliert (Oswald und Roth, 1987).

2.3. Grundintelligenztest (CFT 20-R, engl. Culture Fair Test 20 Revision).

Dabei geht es darum, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen verschiedenen flächigen und räumlichen Mustern wahrzunehmen. Innerhalb der vorgegebenen Zeit sollten die Probanden die vierteilige Aufgabe lösen. Daraus lässt sich die IQ-Punktzahl der Probanden bestimmen (Weiß, 2006).

2.4. Mehrfachwahl-Wortschatz-Test.

Dieser Test ist ein Leistungstest zur Messung des allgemeinen Intelligenzniveaus, speziell des Niveaus der kristallisierten Intelligenz. Insbesondere wurde Wert daraufgelegt, dass situative Belastungen und Störeinflüsse innerhalb bestimmter Grenzen das Testergebnis nicht beeinflussen. Bei dem Test sollten die Probanden herausfinden, ob es eines der auf dem Testbogen präsentierten Wörter existiert. In jeder Zeile standen

ein bekanntes Wort und vier fiktive neue Wörter. Zum Beispiel von diesen 5 Wörtern: Oher – Ohr – Ehr – Ereh – Hor würde man Ohr als die richtige Antwort ankreuzen (Lehrl, 1977).

2.5. Beck Depression Inventory (BDI).

BDI ist ein Instrument, um die eventuell vorhandene Depression und deren Schwere mittels auszufüllenden Fragebogens zu beurteilen. In dem Fragebogen mit 21 Fragen durften die Probanden ohne Zeitvorgabe bestimmen, welche der 4 Aussagen in den vergangenen beiden Wochen am zutreffendsten ist. Zur Auswertung wurden alle Werte der einzelnen angekreuzten Aussagen addiert und es ließ sich daraus ein BDI-Score bestimmen, wobei die Werte 0 – 9 auf keine bzw. minimale, 10 – 18 auf milde, 19 – 29 auf mäßige, 30 – 63 auf schwere Depression hinweisen (Beck, Ward et al. 1961; Hautzinger et al. 2000).

2.6. Pittsburgher Schlafqualitätsindex (PSQI).

PSQI ist ein Fragebogen zur Erfassung der Schlafqualität bzw. Tagesmüdigkeit in den letzten 4 Wochen. Der Fragebogen besteht aus 18 Fragen, die 7 Komponenten zugeordnet werden. Jede Komponente hat einen Wertebereich von 0 – 3, sodass der Gesamtscore einen Wertebereich zwischen 0 bis 21 umfasst, wobei eine höherer Gesamtscore einer verringerten Schlafqualität entspricht (Buysse, Reynolds et al. 1989).

2.7. Morningness-Eveningness-Questionnaire (D-MEQ).

D-MEQ wird genutzt, um den Verlauf der Tagesschläfrigkeit auch vor dem Hintergrund der verschiedenen zirkadianen Phasenlage betrachten zu können. Der Fragebogen besteht aus 19 Multiple-Choice-Fragen, bei denen man bei jeder Frage 4 bis 5 Auswahlmöglichkeiten hat. Den Antworten sind jeweils bestimmte Ziffern zugeordnet, sodass sich eine Gesamtpunktzahl zwischen 14 und 86 ergibt. Bei niedrigen Werten liegt eher ein Abendtyp, bei höheren eher ein Morgentyp vor. Die Validität und die Reliabilität der deutschen Übersetzung wurde in einer Studie überprüft (Griefahn et al., 2001; Horne und Ostberg 1976).

2.8. Vividness of Visual Imagery Questionnaire (VVIQ).

VVIQ wird genutzt, um die Lebhaftigkeit von visuellen Vorstellungen einer Person zu bestimmen. Dabei sollten die Probanden sich in Gedanken 4 bestimmten Szene bzw. Situation bildlich vorstellen. Zu jeder Szene gab es jeweils 4 Aussagen, die auf einer Skala zwischen 1 bis 5 bewertet werden sollten. Die Skala 1 steht für eine lebhafte visuelle Vorstellung, während die Skala 5 hingegen gar keine visuelle Vorstellung bzw. nur den Gedanken an das Objekt beschreibt. Zur Auswertung wurden die Summenwerte der einzelnen angekreuzten Antworten addiert. Eine hohe VVIQ-Score weist dabei auf eine gute Leistung in kognitiven, motorischen und kreativen Aufgaben hin (Marks 1973).

2.9. Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD).

SBSOD ist ein Selbsttest in Form von einem Fragebogen, mit dem die eigenen raumkognitiven Fähigkeiten anhand eines Scores bzw. einer Skala gemessen werden können. Die Skala 1 steht für die größte Zustimmung der Aussage ("Ja"), während die Skala 7 für die größte Ablehnung der Aussage ("Nein") steht. Die SBSOD korreliert grundsätzlich mit Umgebungswissen, das durch direkte Erfahrung, d.h. eigenständige Bewegung im Raum, erworben wurde (Hegarty et al. 2002).

2.10. Need For Cognition (NFC).

NFC ist ein Instrument, um ein Persönlichkeitsmerkmal mittels eines Fragebogens zu identifizieren. Dieser ermittelt das Kognitionsbedürfnis bzw. Wissensbedürfnis einer Person. Darunter versteht man zum einen die stabile, individuelle Disposition, sich für kognitiv komplexe Inhalte zu interessieren, sich damit zu beschäftigen und Spaß daran zu haben, zum anderen die positive Selbsteinschätzung der eigenen kognitiven Fähigkeiten. Der Fragebogen besteht aus 16 Aussagen, die man auf einer siebenstufigen Skala (Skala -3 für "keine Übereinstimmung" und Skala 3 für "völlige Übereinstimmung") einordnen soll. Personen, die eine hohe NFC-Skala besitzen, denken intensiver über Informationen, Ereignisse, Argumente oder auch das Verhalten anderer Menschen nach. Personen mit niedriger NFC-

Skala sind im Allgemeinen hingegen wenig motiviert, lassen sich leicht durch periphere Signale ablenken bzw. beeinflussen und besitzen keine ausreichenden Fähigkeiten, sich einer kognitiven Anstrengung zu unterziehen (Bless et al. 1994 nach Cacioppo und Petty 1982).

2.11. Edinburgh Handedness Inventory (EHI).

EHI wird genutzt, um die bevorzugte Hand bei verschiedenen Tätigkeiten zu bestimmen. Der Test erfolgte mit Hilfe eines Fragebogens mit 2 Antwortspalten. Setzten die Probanden ein "+"-Zeichen in die linke Spalte, so bedeutete dies, dass sie für die jeweilige Fragestellung die linke Hand bevorzugt benutzen. Analog dazu bedeutete ein "+"-Zeichen in der rechten Spalte das bevorzugte Benutzen der rechten Hand. Wenn die Probanden niemals die andere Hand verwenden würden, sollten sie ein "++"-Zeichen in diese Spalte eintragen. Sollten Sie in irgendeinem Fall unschlüssig sein, wurden Sie gebeten, ein "+"-Zeichen in beiden Spalten einzutragen. Wenn die Probanden mit der genannten Tätigkeit keinerlei Erfahrung hatten, durften sie die Felder leer lassen. In dieser Studie wurde die verkürzte Form des EHIs mit 10 Fragen, anstatt wie ursprünglichen 20 Fragen, angewendet. Zur Auswertung wurden jeweils das "+"-Zeichen der linken (L) und rechten (R) Spalte zusammengezählt und darauf wurde nach folgender Formel der Lateralitätsquotient (LQ) gebildet.

$$3. \quad LQ = [(R) - (L) \div (R) + (L)] \times 100$$

Ein LQ von -100 steht für extreme Linkshändigkeit, während ein LQ von 100 hingegen für einen absoluten Rechtshänder steht (Oldfield 1971).

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. mult. Florian Holsboer für die Bereitstellung der technischen Einrichtungen des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie, die die Durchführung des experimentellen Teiles dieser Arbeit ermöglichten.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. Axel Steiger für die Ermöglichung dieser Promotion und Betreuung dieser Arbeit. Er gab mir immer schnell und zuverlässig Rat und Tat.

An dieser Stelle möchte ich auch bei Assist. Prof. Dr. rer. nat. Martin Dresler für die Überlassung dieses wissenschaftlich spannenden Themas sowie für die Datenerhebung bedanken. Er stand mir immer mit Rat und konstruktiven Anregungen beiseite. Zudem hat er mir sehr viele Möglichkeiten eröffnet und war immer bereit Hilfe zu leisten. Dafür und für vieles mehr bedanke ich mich vom ganzen Herzen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinen Kollegen für die maßgebliche Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Daten, den Mitarbeitern des Schlaflabors für ihre zuverlässige nächtliche Arbeit.

Natürlich bedanke ich mich auch bei all meinen Probanden, v.a. Dr. Boris Nikolai Konrad als Weltrekordhalter für Namenmerken, Kollegen und Probanden für die reibungslose Kontaktaufnahme mit den anderen weltklassigen Gedächtnissportlern, die immer zuverlässig waren.

Mein herzlicher und ganz besonderer Dank gilt meiner Eltern Dr. med. Hendra Trisnadi Halimsetiawan und Bonita Juniati Tjahjonugroho, die mir durch eine mehr als großzügige Unterstützung mein Studium und diese Arbeit ermöglicht hat. Meiner Frau Novy Tanjung möchte ich dafür danken, dass sie immer mich motiviert hat. Ein weiteres Dankeschön gilt Herrn Max Horng für die Bereitschaft, mich bei sprachlichen Problemen an ihn wenden zu dürfen.

Eidesstattliche Versicherung

Halimsetiawan, Laurentius

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,
dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Effekte einer intensiven Lernphase auf das Schlaf-EEG von Gedächtnissportlern und normalen Probanden

selbstständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorliegende Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Braunschweig, 28.03.2021

Ort, Datum

Laurentius Halimsetiawan

Unterschrift Doktorandin/Doktorand