

**Der Einfluss von Schlaf auf die prozedurale
Gedächtnisbildung bei Kindern:
Untersuchungen auf einen Langzeiteffekt**

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

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

vorgelegt von

Klein, Susanne Lilly

2016

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Professor Dr. J. Born

2. Berichterstatter: Professor Dr. I. Krägeloh-Mann

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis	6
1. Einleitung	7
1.1. Schlaf	7
1.1.1. Funktionen des Schlafs.....	7
1.1.2. Schlafstadien und Schlafzyklus.....	9
1.1.3. Die Entwicklung des Schlafs	11
Entwicklung der Gesamtschlafdauer in Abhängigkeit vom Alter	11
Altersabhängige Unterschiede des Schlafprofils.....	12
1.2. Gedächtnis.....	14
1.2.1. Gedächtnissysteme	14
Deklaratives Gedächtnis.....	16
Non-deklaratives Gedächtnis	16
Neuroanatomische Korrelate der Gedächtnissysteme	17
1.2.2. Gedächtnisbildung	17
Deklarative Gedächtnisbildung	18
Prozedurale Gedächtnisbildung	18
1.3. Der Einfluss von Schlaf auf das Gedächtnis	23
1.3.1. Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Gedächtnis.....	25
1.3.2. Der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis	26
Der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Erwachsenen	26
Der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern	28
1.3.3. Der Einfluss von Schlaf auf das sensomotorische Gedächtnis bei jungen Zebrafinken	32
1.4. Fragestellung und Hypothesen.....	34
1.4.1. Langzeiteffekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis.....	34
1.4.2. Korrelation zwischen prozeduraler Gedächtniskonsolidierung und Schlafstadium.....	35
1.4.3. Interaktion zwischen implizitem und explizitem Gedächtnis.....	36
1.4.4. <i>Goal-directed learning</i> und <i>movement-directed learning</i>	37
2. Material und Methoden.....	39
2.1. Versuchsdesign	39

2.2. Versuchspersonen	39
2.3. Methoden	40
2.3.1. Versuchsaufgabe	40
Prozedurale Gedächtnisaufgabe	40
Expliziter Wissenstest.....	41
Sequenzen	41
2.3.2. Kontrollvariablen.....	43
Fragebogen zur Befindlichkeit.....	43
PVT	43
2.3.3. Schlafaufzeichnung	44
2.4. Versuchsablauf	45
2.5. Datenauswertung	50
2.5.1. Auswertung der polysomnographischen Aufzeichnung.....	50
2.5.2. Statistische Auswertung	52
3. Ergebnisse	53
3.1. Stichprobe.....	53
3.2. Ergebnisse der Versuchsaufgabe.....	53
3.2.1. Testung des impliziten Wissens der Lernsequenz	53
Reaktionszeiten im Verlauf	53
Zusammenhang zwischen Verbesserung über die erste Nacht und	56
Endperformanz.....	56
3.2.2. Testung des expliziten Wissens der Lernsequenz	58
3.2.3. Ergebnisse der Transfer-Durchgänge	59
3.3. Schlafdaten	61
3.4. Zusammenhang zwischen Schlaf und Gedächtnisleistung	62
3.4.1. Zusammenhang zwischen Schlaf und implizitem Wissen	62
3.4.2. Zusammenhang zwischen Schlaf und explizitem Wissen.....	62
3.5. Kontrollvariablen	63
3.5.1. Befindlichkeitsfragebogen.....	63
3.5.2. PVT	64
4. Diskussion.....	65
4.1. Entwicklung des impliziten Wissens im Verlauf	65

4.2. Langfristiger Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis	66
4.3. Zusammenhang zwischen Schlaf und prozeduraler Gedächtniskonsolidierung über die erste Nacht 69	
4.4. Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung	69
4.5. Movement-directed und goal-directed learning	72
4.6. Kontrollvariablen	75
5. Zusammenfassung	76
Literaturverzeichnis	78
Erklärungen zum Eigenanteil	84
Danksagung.....	85

Abkürzungsverzeichnis

ADHS	Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
EEG	Elektroenzephalogramm
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
MT	Movement Time
MW	Mittelwert
PVT	Psychomotor Vigilance Test
RA	Nucleus robustus des Arcopalliums
REM-Schlaf	Rapid Eye Movement-Schlaf
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SDSC	Sleep Disturbance Scale for Children
SEM	Standard Error of the Mean (Standardfehler)
SRTT	Serial Reaction Time Task
SWS	Slow Wave Sleep

1. Einleitung

Manch ein Schüler wünscht sich, er könne im Schlaf lernen, indem er das Schulbuch unter das Kopfkissen legt. Ganz so einfach geht es natürlich nicht. Nachdem das Buch jedoch einmal aufgeschlagen und gelesen worden ist, spielt Schlaf für die Gedächtnisbildung eine ganz entscheidende Rolle. Es wird vermutet, dass Schlaf insbesondere bei Kindern wesentlich zur Gedächtnisbildung beiträgt. Kinder müssen nämlich zum einen Tag für Tag besonders viele neue Eindrücke verarbeiten und Informationen aufnehmen, zum anderen benötigen sie deutlich längeren und tieferen Schlaf als Erwachsene. Auch eine enorme Anzahl an motorischen Fertigkeiten wird im Kindesalter erlernt. Hierbei ist einerseits an ganz alltägliche Bewegungen wie beispielsweise Gehen, Greifen, Essen mit Besteck und Schreiben zu denken. Andererseits lernen viele Kinder zudem ein Musikinstrument oder eine Sportart, wobei sie sich weitere komplexe Bewegungsabläufe aneignen.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Bedeutung des Schlafs für die Gedächtnisbildung bei Schulkindern im Alter von 8 bis 11 Jahren. Dabei wird insbesondere auf den langfristigen Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis, das heißt das Erlernen und Automatisieren von Bewegungsabläufen, eingegangen.

In diesem Kapitel soll zunächst ein Überblick über die Themen Schlaf und Gedächtnis sowie deren Zusammenhang gegeben werden.

1.1. Schlaf

1.1.1. Funktionen des Schlafs

Während des Schlafs ist die Muskulatur entspannt, Puls- und Atemfrequenz nehmen ab, ebenso Körpertemperatur und Blutdruck. Das Bewusstsein ist während des Schlafs eingeschränkt und die Reaktionsschwelle auf externe Reize erhöht (Velluti 1997). Doch warum verbringen wir eigentlich zwei Drittel unseres Lebens in diesem Zustand? Diese Frage ist zwar noch nicht

ausreichend geklärt, es sind jedoch bereits verschiedene Funktionen des Schlafs bekannt. Nachfolgend werden nur einige Beispiele genannt.

Schlaf spielt unter anderem eine bedeutende Rolle für den Stoffwechsel und den Hormonhaushalt. So führt Schlafmangel bei gesunden Personen bereits nach weniger als einer Woche zu Veränderungen in Stoffwechsel und Hormonhaushalt, die auf Dauer ein erhöhtes Risiko für Diabetes mellitus und Herz-Kreislauf-Erkrankungen darstellen würden (Spiegel et al. 1999).

Auch auf die psychische Verfassung hat der Schlaf starke Auswirkungen.

Sarchiapone und Kollegen beobachteten, dass Jugendliche, die weniger schlafen, ängstlicher und anfälliger für psychische Probleme sind.

Beispielsweise treten Suizidgedanken häufiger unter Jugendlichen auf, die weniger schlafen (Sarchiapone et al. 2014).

Der Einfluss von Schlaf auf Emotionen ist im Wesentlichen dadurch bedingt, dass während des Schlafs vermindert Monoamine freigesetzt werden (Siegel 2005).

Des Weiteren wird die Bedeutung von Schlaf für das Immunsystem diskutiert (Irwin 2012). In mehreren Studien wurde der positive Einfluss von Schlaf auf die Antikörperbildung nach erfolgter Impfung belegt (Lange et al. 2003; Prather et al. 2012).

Dass Neugeborene deutlich mehr schlafen als Erwachsene, könnte unter anderem daran liegen, dass der Schlaf eine wesentliche Rolle für die Bildung und das Wachstum neuer Zellen spielt. Während des Schlafs wird verstärkt das Wachstumshormon Somatotropin ausgeschüttet (Morris et al. 2012). Auch für die Entwicklung des Gehirns ist der Schlaf unentbehrlich (Peirano und Algarín 2007; Siegel 2005; Frank et al. 2001).

Doch nicht nur in Bezug auf seine Entwicklung ist das menschliche Gehirn auf Schlaf angewiesen: Das Gedächtnis, das eine zentrale Funktion des Gehirns darstellt, wird maßgeblich durch Schlaf beeinflusst (Gais und Born 2004, Fischer et al. 2002).

Auch wenn die Gedächtnisbildung nur eine von vielen Funktionen des Schlafs ist, so kommt ihr doch eine besondere Bedeutung zu. Die Rolle des Schlafs für die Gedächtnisbildung scheint nämlich Erklärungsansätze dafür zu liefern,

weshalb das Bewusstsein während des Schlafs so stark eingeschränkt sein muss (Diekelmann et al. 2009; Diekelmann und Born 2010): Es wird angenommen, dass zur langfristigen Speicherung einer Information diejenigen neuronalen Netzwerke reaktiviert werden, die bereits an der Aufnahme dieser Information beteiligt waren. An der Aufnahme und der langfristigen Speicherung einer bestimmten Information sind also jeweils dieselben neuronalen Netzwerke beteiligt. Es wird jedoch vermutet, dass die beiden Prozesse (Aufnahme und langfristige Speicherung) nicht zeitgleich ablaufen können. Daraus könnte sich folgendes schließen lassen: Da unter Bewusstsein ständig neue Informationen aufgenommen werden, ist der Zustand des eingeschränkten Bewusstseins während des Schlafs unentbehrlich, um die im Wachzustand erworbenen Informationen auch langfristig speichern zu können (Diekelmann et al. 2009; Diekelmann und Born 2010; Rasch und Born 2013).

1.1.2. Schlafstadien und Schlafzyklus

Die Entwicklung des Elektroenzephalogramms (EEG) durch Hans Berger in den 1920er Jahren ebnete der Schlafforschung entscheidend den Weg. Nun war es erstmals möglich die Aktivität des Gehirns darzustellen. Um 1937 stellte Alfred Lee Loomis fest, dass sich der Schlaf anhand von Veränderungen in Amplitude und Frequenz der EEG-Wellen in mehrere Stadien einteilen lässt (Borbély 2004). Durch Eugene Aserinsky und Nathaniel Kleitman wurde 1953 ein weiteres Schlafstadium, der Rapid Eye Movement-Schlaf (REM-Schlaf), entdeckt und beschrieben (Aserinsky und Kleitman 1953, zitiert in Wagner et al. 2010). Allan Rechtschaffen und Anthony Kales stellten 1968 Kriterien zur Einteilung der Schlafstadien in einem Handbuch zusammen, die bis heute angewendet werden (Rechtschaffen und Kales 1968). Die Einteilung erfolgt anhand des EEGs sowie des Elektrookulogramms (EOG), welches die Augenbewegungen aufzeichnet, und des Elektromyogramms (EMG), das zur Aufzeichnung des Muskeltonus dient.

Laut Rechtschaffen und Kales wird der Schlaf in fünf Stadien unterteilt. Dabei wird zwischen Non-REM-Schlaf und REM-Schlaf unterschieden. Zum Non-REM-Schlaf werden die Stadien S1, S2, S3 und S4 zusammengefasst.

Der Wachzustand, auch als Stadium W bezeichnet, ist bei geöffneten Augen durch Beta-Aktivität, bei geschlossenen Augen durch Alpha-Aktivität im EEG gekennzeichnet. Alpha-Wellen haben eine Frequenz von 8-12 Hz, Beta-Wellen von 13-30 Hz.

Das Stadium S1 stellt die Phase des Einschlafens dar und dauert meist nur wenige Minuten. Die Alpha-Aktivität nimmt in diesem Stadium ab. Des Weiteren können im EEG Vertex-Wellen mit Amplituden von bis zu 200 μV vorkommen. Im EOG sind langsam rollende Augenbewegungen zu beobachten und die EMG-Amplitude ist meist etwas niedriger als im Wachzustand.

Dem Stadium S1 folgt das Stadium S2, welches in der Regel etwa 50 % der gesamten Schlafdauer ausmacht. In diesem Stadium treten im EEG typischerweise Schlafspindeln mit einer Frequenz von 12-14 Hz sowie K-Komplexe auf. Ein K-Komplex besteht aus einer steilen positiven Auslenkung, der eine negative Welle folgt.

Die Stadien S3 und S4 werden als sogenannter Slow Wave Sleep (SWS) bezeichnet. In diesen beiden Stadien kommen überwiegend Delta-Wellen vor. Diese haben eine Frequenz von 0.5-2 Hz und eine Amplitude von mindestens 75 μV . Das EEG besteht in S3 mindestens zu 20 % und in S4 mindestens zu 50 % der jeweiligen Epoche aus Delta-Wellen.

Der REM-Schlaf ist durch die typischen schnellen Augenbewegungen und ein niedriges EMG charakterisiert. Das EEG hat gemischte Frequenzen zwischen 5 und 13 Hz. Zu Beginn des Stadiums können Sägezahnwellen auftreten.

Im Laufe einer Nacht werden mehrere Zyklen aus diesen fünf Schlafstadien durchlaufen. In der Regel beginnt ein Zyklus mit S1 oder S2, woraufhin der Schlaf immer tiefer wird. Nach einer Tiefschlafphase (S3/S4) wird ein Zyklus typischerweise durch eine REM-Schlaf-Phase abgeschlossen. (Es sind jedoch auch schnelle Wechsel zwischen den Stadien möglich, welche nicht immer exakt in der beschriebenen Reihenfolge ablaufen.) Ein Zyklus dauert circa (ca.) 90 Minuten. Die Tiefschlafphasen werden meist von Zyklus zu Zyklus kürzer, die REM-Schlafphasen werden dagegen im Laufe der Nacht immer länger. Gegen Ende der Nacht werden die Stadien S3 und S4 kaum noch erreicht.

1.1.3. Die Entwicklung des Schlafs

Von der Geburt bis ins hohe Erwachsenenalter unterliegt der menschliche Schlaf ständig Veränderungen. Diese Veränderungen betreffen sowohl die Schlafdauer als auch das Schlafprofil, also die Abfolge und Dauer der einzelnen Schlafstadien.

Entwicklung der Gesamtschlafdauer in Abhängigkeit vom Alter

Vergleicht man verschiedene Altersgruppen bezüglich der Gesamtschlafdauer miteinander, so fällt auf, dass die Gesamtschlafdauer im Laufe des Lebens abnimmt (Ohayon et al. 2004). Neugeborene verbringen insgesamt etwa 16 Stunden am Tag schlafend (de Weerd und van den Bossche 2003). Dabei schlafen sie nicht am Stück, sondern gleichmäßig über Tag und Nacht verteilt. Ein sogenannter zirkadianer Rhythmus mit längeren Schlafphasen während der Nacht und kontinuierlicheren Phasen des Wachseins tagsüber entwickelt sich erst im Alter von etwa 3 Monaten (de Weerd und van den Bossche 2003). Im Laufe des ersten Lebensjahres macht sich bereits eine deutliche Abnahme der Gesamtschlafdauer bemerkbar. So schläft ein Säugling im Alter von 6 Monaten mit etwa 13 Stunden bereits deutlich weniger als ein Neugeborenes (Galland et al. 2012; de Weerd und van den Bossche 2003). Kleinkinder schlafen knapp 12 Stunden am Tag (Galland et al. 2012), Schulkinder und Jugendliche etwa 7,5 bis 8 Stunden (Ohayon et al. 2004). Bei Schulkindern und Jugendlichen wurde an Schultagen eine negative Korrelation zwischen Alter und Gesamtschlafdauer beobachtet. Am Wochenende zeigt sich diese Korrelation jedoch nicht (Ohayon et al. 2004). Dies deutet darauf hin, dass bei Schulkindern und Jugendlichen das Schlafbedürfnis zwar kaum abnimmt, sie jedoch aufgrund sozialer Faktoren, beispielsweise abendlichem Fernsehen/Computerspielen und frühem Schulbeginn am Morgen, mit zunehmendem Alter weniger Schlaf erhalten. Im Erwachsenenalter nimmt die Gesamtschlafdauer kontinuierlich um ca. 10 Minuten je Dekade ab (Ohayon et al. 2004). Mit zunehmendem Alter wacht man zudem nachts vermehrt auf (Ohayon et al. 2004).

Altersabhängige Unterschiede des Schlafprofils

Nicht nur die Gesamtschlafdauer, sondern auch die Abfolge der einzelnen Schlafphasen ändert sich in Abhängigkeit vom Alter.

Im Gegensatz zu Erwachsenen beginnt bei Neugeborenen ein Schlafzyklus mit REM-Schlaf. Dies ändert sich im 3. bis 4. Lebensmonat. Ab diesem Alter entwickelt sich ein Schlafzyklus, der wie beim Erwachsenen mit Non-REM-Schlaf beginnt. Außerdem überwiegt ab diesem Alter dann auch der Non-REM-Schlaf im ersten Drittel der Nacht, der REM-Schlaf dagegen im letzten Drittel der Nacht (Peirano und Algarín 2007).

Es lassen sich altersabhängige Unterschiede in Bezug auf den Anteil der einzelnen Schlafphasen an der Gesamtschlafdauer feststellen.

Der SWS-Anteil nimmt mit zunehmendem Alter ab (Ohayon et al. 2004; Gaudreau et al. 2001) und der S2-Anteil zu (Ohayon et al. 2004; Gaudreau et al. 2001). Kinder verbringen mit ca. 34 % einen besonders großen Anteil ihres Schlafs im SWS (Gaudreau et al. 2001). Im Erwachsenenalter kann dieser Anteil bis zu unter 10 % der Gesamtschlafdauer sinken (Gaudreau et al. 2001). Darüber hinaus weisen Kinder während des SWS deutlich mehr Delta-Wellen im EEG auf als Erwachsene. Die Delta-Wellen von Kindern haben eine steilere und höhere Amplitude als die von Erwachsenen. Dabei steigt die Amplitude bis zu Beginn der Pubertät an und nimmt dann während der Adoleszenz wieder deutlich ab (Kurth et al. 2010). Da auch die Synapsendichte der grauen Substanz bis zur Pubertät zunimmt und dann wieder abnimmt, wird ein Zusammenhang zwischen den Delta-Wellen beziehungsweise (bzw.) dem SWS und der Reifung der grauen Substanz während der Pubertät diskutiert (Buchmann et al. 2011; Kurth et al. 2010; Campbell und Feinberg 2009).

Auch der Anteil des REM-Schlafs an der Gesamtschlafdauer ändert sich altersabhängig. Neugeborene verbringen etwa gleich viel Zeit im REM-Schlaf wie im Non-REM-Schlaf. Verglichen mit anderen Altersgruppen macht der REM-Schlaf bei ihnen somit einen besonders großen Anteil an der Gesamtschlafdauer aus (ca. 50 %). Als Grund für den hohen REM-Schlaf-Anteil in diesem Alter wird unter anderem die Bedeutung des REM-Schlafs für die Reifung des Gehirns von Neugeborenen diskutiert (Dang-Vu et al. 2006).

Bereits in den ersten Lebenswochen nimmt der REM-Schlaf-Anteil jedoch deutlich ab. Im Kindesalter liegt er nur noch bei 18 bis 20 % (Gaudreau et al. 2001). Junge Erwachsene (19-29 Jahre) verbringen mit ca. 22 % nochmals einen etwas größeren Anteil ihres Schlafes im REM-Schlaf (Gaudreau et al. 2001). Im Erwachsenenalter bleibt der Anteil des REM-Schlafs lange Zeit nahezu unverändert, bis er ab dem 60. Lebensjahr wieder leicht abnimmt (Ohayon et al. 2004).

Die REM-Schlaf-Latenz, die Dauer bis zum Eintreten der ersten REM-Schlaf-Phase nach dem Einschlafen, ist ebenfalls altersabhängig. Sie nimmt bei Kindern und Jugendlichen langsam ab. In diesen Altersgruppen tritt die erste REM-Schlaf-Phase erst deutlich später ein als bei jungen Erwachsenen (Gaudreau et al. 2001).

In **Abbildung 1** wird das Hypnogramm eines Schulkindes gezeigt, das im Rahmen der vorliegenden Studie bei einem Probanden aufgezeichnet wurde. Wie für Kinder typisch, lässt sich ein großer Anteil an SWS (54.8 %), ein deutlich geringerer Anteil an REM-Schlaf (20.0 %) und eine verhältnismäßig lange REM-Schlaf-Latenz (186.5 Minuten) erkennen. Es zeigt sich ein Überwiegen des Non-REM-Schlafs im ersten Drittel der Nacht und ein Überwiegen des REM-Schlafs im letzten Drittel der Nacht. Diese Verteilung ist sowohl für Kinder als auch für Erwachsene typisch.

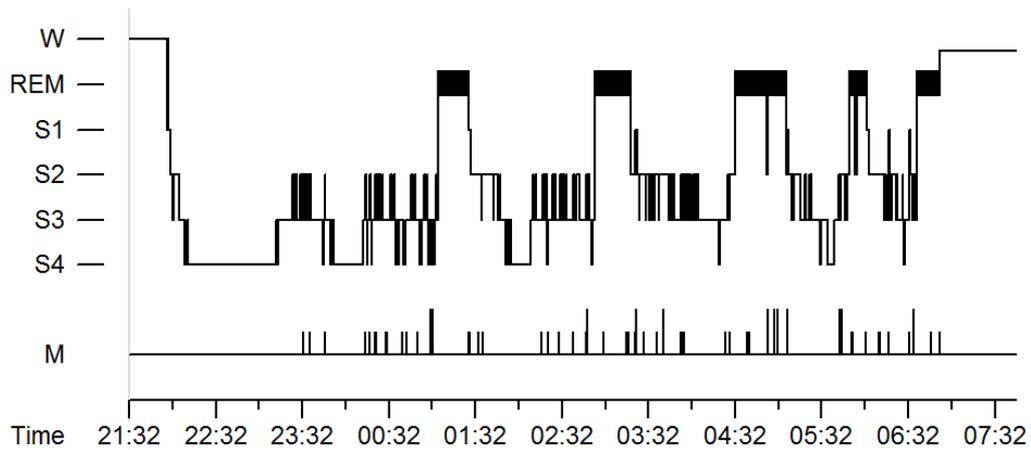


Abbildung 1: Hypnogramm eines Schulkindes. Das dargestellte Hypnogramm wurde im Rahmen der Studie aufgezeichnet. Wie für Kinder typisch, ist der Anteil an Tiefschlaf (S3 und S4) insbesondere in der ersten Nachthälfte sehr groß (hier 54.5 %). Der Anteil an Rapid Eye Movement-Schlaf (REM-Schlaf) ist bei Kindern geringer als bei Erwachsenen (hier 20.0 %). Außerdem ist die REM-Schlaf-Latenz bei Kindern länger als bei Erwachsenen (hier 186.5 Minuten). (W = wach; REM = REM-Schlaf; S1-S4 = Schlafstadium 1-4; M = Bewegung.)

1.2. Gedächtnis

Die menschlichen Gedächtnisleistungen können in Bezug auf Inhalt der gespeicherten Informationen und Dauer der Informationsspeicherung unterteilt werden. An der Gedächtnisbildung sind verschiedene Prozesse beteiligt.

1.2.1. Gedächtnissysteme

Nach der Dauer der Informationsspeicherung wird das menschliche Gedächtnis in drei Systeme unterteilt: Sensorisches Gedächtnis, Kurzzeitgedächtnis und Langzeitgedächtnis (Atkinson et al. 1968, zitiert in Gruber 2011).

Über die Sinnesorgane wahrgenommene Reize werden im Sensorischen Gedächtnis für wenige Sekunden, teils auch nur für Millisekunden, gespeichert. Nur ein Teil dieser Informationen gelangt in das Kurzzeitgedächtnis, wo diese für wenige Minuten zur Verfügung stehen. Das Kurzzeitgedächtnis hat eine begrenzte Kapazität von etwa sieben Informationseinheiten (Miller 1956, zitiert in Gruber 2011). Im Langzeitgedächtnis, dessen Kapazität vermutlich

unbegrenzt ist, werden die Informationen schließlich über mehrere Jahre hinweg gespeichert.

Das Langzeitgedächtnis setzt sich aus zwei Subsystemen zusammen: dem deklarativen und dem non-deklarativen Gedächtnis (Squire et al. 1993; Squire und Zola 1996). Eine Übersicht über die Subsysteme des Langzeitgedächtnisses wird in **Abbildung 2** gegeben.

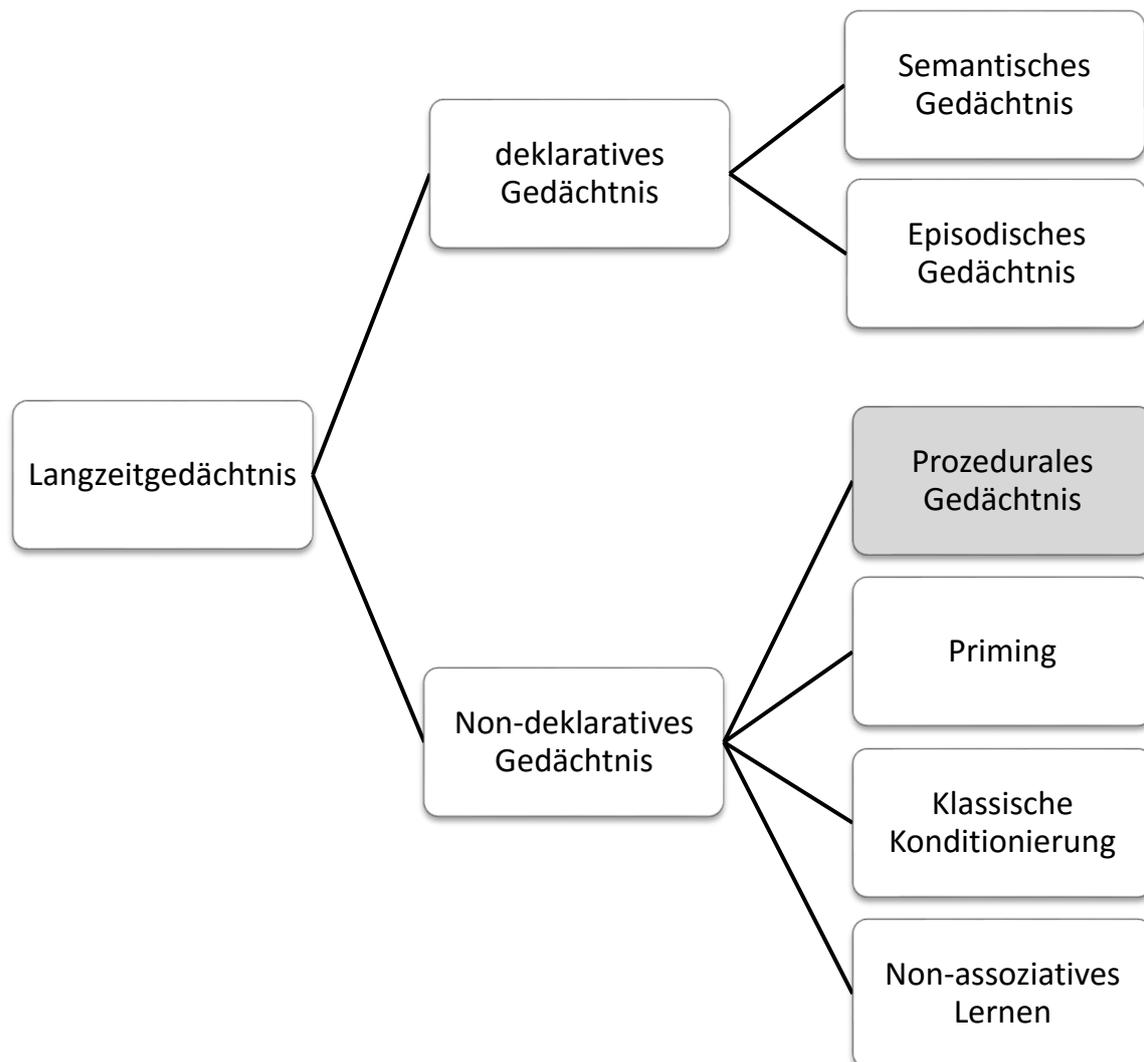


Abbildung 2: Systeme des Langzeitgedächtnisses. (Modifiziert nach Squire und Zola 1996). Die Abbildung gibt einen Überblick über die Subsysteme des Langzeitgedächtnisses. Farblich hervorgehoben wird das prozedurale Gedächtnis. Auf den Einfluss des Schlafs auf dieses Subsystem wird in der vorliegenden Studie der Schwerpunkt gelegt.

Deklaratives Gedächtnis

Für die Speicherung von Fakten und Ereignissen ist das deklarative Gedächtnis zuständig. Dabei wird weiter zwischen dem semantischen und dem episodischen Gedächtnis unterschieden. Das semantische Gedächtnis speichert Faktenwissen wie Geographiekennnisse, Jahreszahlen oder gelernte Vokabeln. Autobiographische Ereignisse, zum Beispiel die Erinnerung an die letzte Geburtstagsfeier, werden dagegen im episodischen Gedächtnis gespeichert. Dabei werden verschiedene Informationen, beispielsweise zu Zeit, Ort und beteiligten Personen eines Ereignisses, miteinander verknüpft. Das episodische Gedächtnis ist meist mit emotionalen Empfindungen verbunden. Lernvorgang und Abruf geschehen im Falle des deklarativen Gedächtnisses meist willkürlich und bewusst. Dies wird auch als explizites Lernen bezeichnet.

Non-deklaratives Gedächtnis

Bestandteile des non-deklarativen Gedächtnissystems sind das prozedurale Gedächtnis, das Priming, die klassische Konditionierung sowie non-assoziatives Lernen (Squire und Zola 1996; Squire 2009). Im Gegensatz zum deklarativen Gedächtnis ist für das non-deklarative Gedächtnis charakteristisch, dass Lernen und Abruf überwiegend unbewusst stattfinden. Man spricht in diesem Fall auch von implizitem Lernen. Das non-deklarative Gedächtnis prägt unser Verhalten und unser Empfinden in bestimmten Situationen (Squire 2009). Das prozedurale Gedächtnis speichert Handlungsabläufe und motorische Fertigkeiten (*skills*) wie beispielsweise das Spielen von Musikinstrumenten, das Lernen von Sportarten oder Autofahren (Jäncke 2013). Die Bewegungsabläufe werden durch wiederholtes Üben gelernt und können schließlich ohne bewusstes Nachdenken ausgeführt werden.

Während bereits einige Forschungsergebnisse recht eindeutig für einen positiven Effekt von Schlaf auf das deklarative Gedächtnis bei Kindern sprechen, ist dagegen die Rolle des Schlafs für das prozedurale Gedächtnis bei Kindern bisher nicht ausreichend geklärt. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt auf das prozedurale Gedächtnis gelegt.

Neuroanatomische Korrelate der Gedächtnissysteme

Als neuroanatomisches Korrelat des deklarativen Gedächtnisses gelten der Hippocampus und daran angrenzende Regionen des medialen Temporallappens sowie der Neokortex (Squire und Zola 1996; Squire et al. 1993; Eichenbaum 2006). An der Bildung des episodischen Gedächtnisses ist außerdem das limbische System beteiligt (Jäncke 2013).

Das prozedurale Gedächtnis wird im Wesentlichen durch die Basalganglien, das Kleinhirn, den motorischen Kortex und den prämotorischen Kortex bestimmt (Ungerleider et al. 2002; Jäncke 2013).

Die beiden Gedächtnissysteme arbeiten aber nicht völlig unabhängig voneinander, sondern interagieren miteinander. Immer mehr Studien sprechen dafür, dass der Hippocampus auch für das prozedurale Gedächtnis eine maßgebliche Rolle spielen könnte (Albouy et al. 2008; Schendan et al. 2003).

1.2.2. Gedächtnisbildung

An der Gedächtnisbildung sind im Wesentlichen drei Prozesse beteiligt. Die Aufnahme neuer Informationen wird als Enkodierung bezeichnet, die Aufbewahrung und Verfestigung des Gedächtnisinhalts wird als Konsolidierung bezeichnet und unter Abruf (*Retrieval*) versteht man die Erinnerung an das Gelernte bzw. die Anwendung des Gelernten (Dudai 2004).

Während der Enkodierung neuer Informationen bildet das Gehirn auf neuronaler Ebene eine Gedächtnisspur, auch Engramm genannt. Die Enkodierung kann explizit oder implizit stattfinden. Neu gebildete Gedächtnisspuren sind zunächst sehr anfällig für Störfaktoren wie Toxine, Läsionen oder das Eintreffen weiterer Reize, die mit der bereits vorhandenen Information bzw. Spur interferieren. Im Laufe der Zeit verfestigt sich die Gedächtnisspur und wird mit bereits vorhandenen Gedächtnisinhalten verknüpft, was man als Konsolidierung bezeichnet. Dadurch wird sie stabiler und weniger anfällig gegenüber Störfaktoren. Konsolidierung lässt sich als Unterschied in der Performanz zwischen dem Lernen und einer später stattfindenden Testung erfassen. Von Offline-Konsolidierung spricht man, wenn eine Verfestigung und Verbesserung des Gelernten auch dann stattfindet, wenn

man sich nicht aktiv mit den Inhalten auseinandersetzt. Offline-Konsolidierung findet sowohl für deklarative (Gais und Born 2004) als auch für prozedurale Gedächtnisinhalte (Brashers-Krug et al. 1996) statt und kann im Wachzustand (Song et al. 2007) oder während des Schlafs (Born et al. 2006; Korman et al. 2007; Doyon et al. 2009) ablaufen.

Neurophysiologisch unterscheidet man zwischen synaptischer und systemischer Konsolidierung (Dudai 2004). Die synaptische Konsolidierung erfolgt in den ersten Minuten und Stunden nach dem Lernen. Dabei finden Veränderungen auf synaptischer Ebene, beispielsweise die Ausbildung von *dendritic spines*, statt. Dagegen dauert die systemische Konsolidierung mehrere Wochen und Monate, wobei eine Umstrukturierung neuronaler Verschaltungen im Gehirn stattfindet. Eine Gedächtnisspur kann im Rahmen der systemischen Konsolidierung auch in andere Gehirnregionen übertragen werden und sogar von derjenigen Lokalisation, die für die Enkodierung zuständig war, unabhängig werden (Dudai 2004).

Nachfolgend wird jeweils auf die deklarative und die prozedurale Gedächtnisbildung eingegangen. Dabei wird der Schwerpunkt auf die prozedurale Gedächtnisbildung gelegt, da sich die vorliegende Studie überwiegend mit der Rolle des Schlafs für die prozedurale Gedächtnisbildung beschäftigt.

Deklarative Gedächtnisbildung

Im Hippocampus erfolgt eine vorübergehende Speicherung deklarativer Gedächtnisinhalte. Diese werden schließlich in den Neokortex übertragen und dort langfristig gespeichert (Squire und Zola 1996). Für diesen Prozess spielt vermutlich der SWS eine entscheidende Rolle. In 1.3.1. *Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Gedächtnis* wird genauer auf den Mechanismus eingegangen.

Prozedurale Gedächtnisbildung

Wie bereits erwähnt, ist das prozedurale Gedächtnis für das Lernen motorischer Fertigkeiten zuständig. Das Lernen einer motorischen Fertigkeit kann in drei

Stadien eingeteilt werden (Fitts 1954, zitiert in Jäncke 2013): in das kognitive Stadium, das assoziative Stadium und das automatische Stadium.

Während des kognitiven Stadiums ist man sich über die zu lernenden Bewegungsabläufe bewusst. Ein Sportlehrer erklärt beispielsweise, welche Bewegungen der Reihe nach durchzuführen sind, um den Basketball in den Korb zu werfen. Während der Ausführung werden diese Regeln bewusst abgerufen. Durch Training wird das assoziative Stadium erreicht. Die Bewegungen gelingen nun schneller und besser. Gleichzeitig ist die explizite Beschreibung der Bewegungsabläufe dem Lernenden noch präsent. Durch weiteres Training wird schließlich das automatische Stadium erreicht. Nun laufen die Bewegungen völlig automatisiert ab, können aber kaum mehr explizit erklärt werden.

Im kognitiven und assoziativen Stadium sind am motorischen Lernen der primäre motorische Kortex, der prämotorische Kortex, der Parietallappen und der präfrontale Kortex beteiligt (Jäncke 2013). Sobald das automatische Stadium erreicht wird, spielen vor allem das supplementärmotorische Areal, das Kleinhirn und die Basalganglien eine entscheidende Rolle (Jäncke 2013). Der motorische und der prämotorische Kortex sind aber auch in diesem Stadium weiterhin am Lernen der motorischen Fertigkeit beteiligt (Jäncke 2013).

In Bezug auf das prozedurale Gedächtnis kann zwischen dem kortikostriatalen und dem kortikozerebellären System unterschieden werden (Doyon et al. 2003). An der Automatisierung seriell-motorischer Aufgaben ist überwiegend das Striatum beteiligt. Für die Automatisierung motorischer Anpassungsprozesse ist dagegen das Kleinhirn von wesentlicher Bedeutung. Allerdings interagieren beide Systeme miteinander und können das jeweils andere kompensieren, falls eines der beiden ausfällt.

Beim Erlernen einer motorischen Fertigkeit werden gleichzeitig eine bestimmte Bewegung und das (räumliche) Ziel dieser Bewegung gelernt. Deswegen wird zwischen zwei verschiedenen Lern-Komponenten unterschieden (Robertson 2009; Cohen et al. 2005). Das sogenannte *movement-directed learning* bezieht sich auf die Bewegung an sich. Dagegen bezieht sich das sogenannte *goal-*

directed learning auf das räumliche Ziel, das durch die Bewegung erreicht werden soll. Beim Klavierspielen trägt beispielsweise das *movement-directed learning* dazu bei, dass die Finger die entsprechenden Bewegungsabläufe automatisieren. Das *goal-directed learning* fördert dagegen das Verinnerlichen der Lokalisation der zu drückenden Tasten. (Die Tasten stellen das räumliche Ziel dar.)

Am *goal-directed learning* sind der dorsolaterale präfrontale Kortex und der inferiore Parietallappen beteiligt (Robertson 2009; Hikosaka et al. 2002). Für das *movement-directed learning* sind dagegen der motorische Kortex und subkortikale Strukturen wie das Striatum von wesentlicher Bedeutung (Robertson 2009; Hikosaka et al. 2002).

Während des Übens finden *goal-directed learning* und *movement-directed learning* gleichzeitig statt (Cohen et al. 2005). Ob bei der Konsolidierung beide Komponenten (Bewegung und Ziel) gleichzeitig gefördert werden oder nicht, ist bisher nicht ausreichend geklärt. Einige Autoren gehen davon aus, dass nur im Wachzustand *movement-directed learning* stattfindet und nur während des Schlafs *goal-directed learning* (Robertson 2009; Cohen et al. 2005). Auch Witt und Kollegen beobachteten eine positive Auswirkung des Schlafs auf das *goal-directed learning* (2010).

Außerdem wird vermutet, dass die Länge des Trainings ausschlaggebend dafür ist, welche der beiden Komponenten (Ziel oder Bewegung) stärker gefördert wird (Boutin et al. 2012), und ob die Konsolidierung überwiegend während des Schlafs oder im Wachzustand stattfindet (Robertson 2009). Kurze Trainingseinheiten führen dazu, dass überwiegend *goal-directed learning* stattfindet (Robertson 2009; Boutin et al. 2012) und die Konsolidierung verstärkt während des Schlafs abläuft (Robertson 2009). Lange Trainingseinheiten fördern dagegen das *movement-directed learning* in stärkerem Ausmaß (Boutin et al. 2012; Robertson 2009) und führen zu einer vermehrten Konsolidierung im Wachzustand (Robertson 2009).

Movement-directed learning und *goal-directed learning* können untersucht werden, indem eine prozedurale Aufgabe mit einer Hand trainiert und später mit der anderen Hand getestet wird (Cohen et al. 2005). Hierzu bietet sich

beispielsweise ein *Serial Reaction Time Task (SRTT)* an, wie er in der Studie von Cohen und Kollegen angewendet wurde (2005). Bei dieser Aufgabe platziert der Proband Ringfinger, Mittelfinger, Zeigefinger und den kleinen Finger einer Hand auf einer Reihe von vier Knöpfen. Nun bekommt er auf dem Bildschirm eine Reihe von vier Kästchen präsentiert. Jedem Kästchen ist einer der Knöpfe zugeordnet. Sobald in einem der Kästchen ein Stern auftaucht, muss der Proband mit dem entsprechenden Finger den zugeordneten Knopf drücken. Nach einem Pausenintervall erscheint der Stern in einem anderen Kästchen. Beim *SRTT* liegt dem Erscheinen des Sterns in den verschiedenen Kästchen eine sich wiederholende Sequenz zugrunde.

Lernt ein Proband mit der linken Hand eine *SRTT*-Sequenz und ist später in der Lage, dieselbe Sequenz genauso korrekt und schnell mit der rechten Hand zu tippen, so hat *goal-directed learning* stattgefunden. Die räumlichen Zielpunkte bleiben nämlich dieselben; um die Sequenz tippen zu können, muss jedoch die rechte Hand andere Bewegungen durchführen (bzw. die Finger in einer anderen Reihenfolge bewegen) als die linke. Lernt ein Proband eine Sequenz mit der linken Hand und kann später mit der rechten Hand die (an einer vertikalen Mittelachse) gespiegelte Version der gelernten Sequenz tippen, so hat *movement-directed learning* stattgefunden. Aufgrund der Spiegelung führt die rechte Hand nämlich genau dieselben Bewegungen durch wie zuvor die linke beim Tippen der ursprünglichen Sequenz; die zu tippenden räumlichen Zielpunkte haben sich jedoch durch die Spiegelung geändert.

Der Unterschied zwischen *goal-directed learning* und *movement-directed learning* wird in **Abbildung 3** beispielhaft anhand einer *SRTT*-Sequenz veranschaulicht.

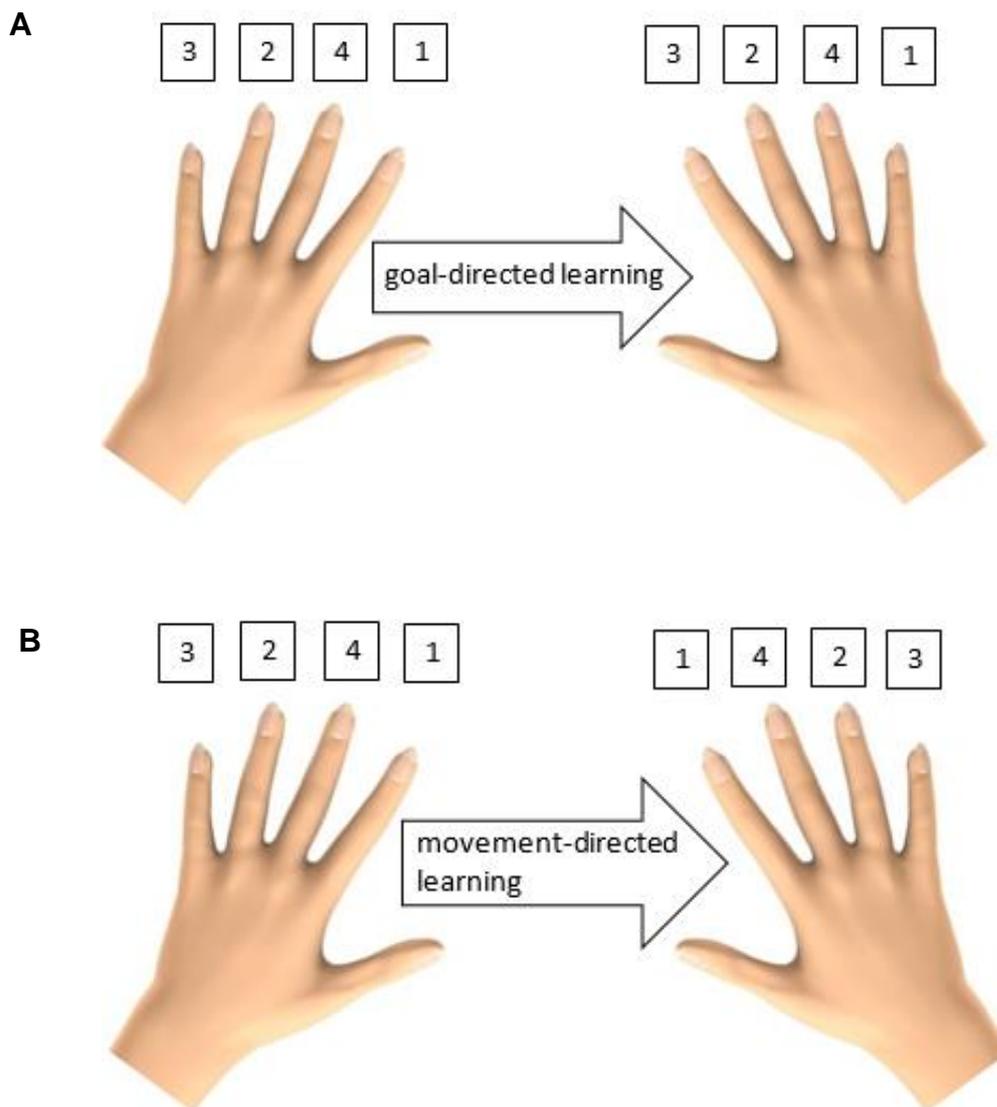


Abbildung 3: Goal-directed learning und movement-directed learning. Anhand einer Sequenz eines *Serial Reaction Time Task* wird in dieser Abbildung der Unterschied zwischen *goal-directed learning* (A) und *movement-directed learning* (B) veranschaulicht.

In A und B wird jeweils mit der linken Hand eine Sequenz gelernt. *Goal-directed learning* (A) führt nun dazu, dass dieselbe Sequenz später genauso gut mit der rechten Hand durchgeführt werden kann. *Movement-directed learning* (B) bewirkt dagegen, dass später mit der rechten Hand die Spiegelung dieser Sequenz durchgeführt werden kann. Beim *goal-directed learning* bleiben die räumlichen Zielpunkte dieselben. Taste 1 befindet sich immer ganz rechts. Von der rechten und der linken Hand müssen jedoch jeweils unterschiedliche Bewegungen durchgeführt werden, um das selbe räumliche Ziel zu erreichen. Beispielsweise tippt die linke Hand die Taste 1 mit dem Zeigefinger, während die rechte Hand hierzu den kleinen Finger nutzt.

Beim *movement-directed learning* ändern sich durch die Spiegelung die räumlichen Zielpunkte, jedoch werden von beiden Händen genau dieselben Bewegungen durchgeführt. Taste 1 befindet sich beispielsweise einmal ganz rechts, einmal ganz links, wird jedoch von beiden Händen mit dem Zeigefinger getippt.

Wenn eine Fertigkeit mit der einen Hand trainiert wird, langfristig jedoch von beiden Händen ausgeführt werden kann, so spricht man von Effektor-Unabhängigkeit (Wiestler et al. 2014) oder von Generalisierung (Witt et al. 2010). Extrinsische Transformation bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine mit der einen Hand trainierte Handbewegung durch *goal-directed learning* auf die andere Hand übertragen wird. Beispielsweise kann dann eine mit einer Hand gelernte Sequenz mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand getippt werden (Boutin et al. 2012; Witt et al. 2010). Intrinsische Transformation wird dagegen durch *movement-directed learning* vermittelt und bedeutet beispielsweise, dass mit der nicht-trainierten Hand die Spiegelung der Originalsequenz getippt werden kann (Boutin et al. 2012; Witt et al. 2010).

1.3. Der Einfluss von Schlaf auf das Gedächtnis

Dass sich Schlaf positiv auf die Gedächtnisbildung auswirkt, ist bereits lange bekannt. Zunächst wurde angenommen, dass Schlaf dabei vor allem eine protektive Rolle spielt. Es wurde vermutet, dass im Wachzustand die Konsolidierung neu erworbener Gedächtnisinhalte durch die Enkodierung weiterer neuer Informationen gestört würde. Während des Schlafs bestünde diese Interferenz jedoch nicht, sodass die Konsolidierung im Schlaf ungestört ablaufen könnte. Neuere Erkenntnisse sprechen jedoch eher dafür, dass sich Schlaf nicht nur protektiv auf die Gedächtniskonsolidierung auswirkt, sondern die Gedächtniskonsolidierung aktiv fördert (Gais und Born 2004; Ellenbogen et al. 2006b; Marshall und Born 2007; Born et al. 2006).

Studien zeigen, dass Schlaf im Vergleich zu einem gleich langen Intervall des Wachseins sowohl zu besseren Ergebnissen in der Wiedergabe deklarativer Gedächtnisinhalte (Plihal und Born 1997; Rasch et al. 2007; Tucker et al. 2006) als auch zu Verbesserungen in prozeduralen Gedächtnisleistungen führt (Plihal und Born 1997; Fischer et al. 2002; Korman et al. 2007).

Die Auswirkung des Schlafs auf die Gedächtnisbildung hängt von vielen Faktoren ab. Bei Informationen, die schwieriger zu enkodieren sind, ist der positive Effekt des Schlafs auf die Konsolidierung vermutlich stärker ausgeprägt

als bei Informationen, die leichter zu enkodieren sind (Kuriyama et al. 2004). Auch die Motivation, etwas zu lernen, beispielsweise die Erwartung einer Belohnung, wirkt sich auf den Beitrag des Schlafs zur Konsolidierung aus (Fischer und Born 2009). Des Weiteren spielt die Ausgangsperformanz vor dem Schlaf eine entscheidende Rolle (Wilhelm et al. 2012b; Yordanova et al. 2008). In welchem Ausmaß Schlaf die Gedächtnisbildung beeinflusst, hängt außerdem stark davon ab, ob die Enkodierung implizit oder explizit stattfindet. Es wurde beobachtet, dass die Konsolidierung explizit enkodierter Gedächtnisinhalte deutlich mehr vom Schlaf profitiert als die Konsolidierung ausschließlich implizit enkodierter Inhalte (Robertson et al. 2004).

Es gibt zwei Hypothesen dazu, durch welchen Mechanismus Schlaf die Gedächtniskonsolidierung fördert (Diekelmann und Born 2010; Rasch et al. 2007). Laut der *Synaptic Homeostasis Hypothesis* werden im Schlaf überflüssige Synapsen geschwächt oder abgebaut (Tononi und Cirelli 2014). Dadurch können zum einen die wichtigen Synapsen, die das Gehirn während des Wachzustands oft genutzt hat, besser mit Energie versorgt werden. Zum anderen treten die Signale der wichtigen Synapsen mehr in den Vordergrund, da sie weniger durch die Signale überflüssiger Synapsen gestört werden. Die *Active System Consolidation Hypothesis* besagt dagegen, dass Schlaf zur Reaktivierung und Neuverteilung der am Tag aufgenommenen Gedächtnisinhalte führt, wodurch diese in bereits bestehende neuronale Netzwerke des Langzeitgedächtnisses integriert werden (Rasch und Born 2007; Rasch et al. 2007). SWS bewirkt vor allem eine Reaktivierung Hippocampus-abhängiger deklarativer Gedächtnisinhalte (Rasch et al. 2007). Dagegen kommt es während des REM-Schlafs wahrscheinlich eher zur Reaktivierung prozeduraler Gedächtnisinhalte (Peigneux et al. 2003).

Zum Einfluss der einzelnen Schlafphasen auf das Gedächtnis gibt es ebenfalls zwei Hypothesen. Die *Dual Process Hypothesis* geht davon aus, dass der SWS sich positiv auf die vom Hippocampus abhängige Konsolidierung deklarativer Gedächtnisinhalte auswirkt (Marshall und Born 2007; Gais und Born 2004; Plihal und Born 1997), der REM-Schlaf dagegen vor allem einen Effekt auf das non-deklarative Gedächtnis hat (Plihal und Born 1997; Marshall und Born

2007). Im Gegensatz dazu besagt die *Sequential Hypothesis*, dass sowohl prozedurales als auch deklaratives Gedächtnis von der wechselnden Abfolge von SWS und REM-Schlaf profitieren (Ambrosini und Giuditta 2001; Giuditta 2014). Nach dieser Hypothese werden während des SWS Gedächtnisspuren, die behalten werden sollen, von irrelevanten Gedächtnisspuren getrennt. Im REM-Schlaf werden die relevanten Informationen dann in bevorstehende Gedächtnisinhalte integriert.

In den zwei nachfolgenden Kapiteln wird jeweils näher auf den Einfluss von Schlaf auf das deklarative und das prozedurale Gedächtnis eingegangen.

1.3.1. Der Einfluss von Schlaf auf das deklarative Gedächtnis

Mehrfach wurde gezeigt, dass Schlaf einen positiven Einfluss auf das deklarative Gedächtnis hat (Plihal und Born 1997; Rasch et al. 2007; Tucker et al. 2006; Ellenbogen et al. 2006a).

Dies wurde beispielsweise durch Studien belegt, bei denen Probanden Wortpaare auswendig lernen mussten. Probanden, die zwischen Lernen und Abfrage geschlafen hatten, konnten die Wortpaare besser wiedergeben als Probanden, die zwischen Lernen und Abfrage wach gewesen waren. Zum einen wussten die Probanden der Schlafgruppe bei der Abfrage mehr Wortpaare als die Probanden der Wachgruppe, zum anderen war bei der Schlafgruppe die Erinnerung an die Wortpaare zusätzlich auch stabiler gegenüber Interferenzen. Dies zeigten beispielsweise die Ergebnisse einer Studie von Ellenbogen und Kollegen (2006a). In dieser Studie wurde zunächst eine Wortpaarliste A-B (zum Beispiel Haus - Schloss) gelernt. Vor der Testung dieser Wortpaarliste nach einem Retentionsintervall von 12 Stunden, das die Probanden entweder schlafend oder wach verbracht hatten, wurde noch eine zweite Wortpaarliste A-C gelernt, bei der dieselben Worte der ersten Liste mit anderen Worten gepaart wurden (zum Beispiel Haus - Schlüssel). Bei der Wachgruppe nahm die Fähigkeit, sich an die zuerst gelernten Wortpaare A-B zu erinnern durch die Interferenz mit den zwischenzeitlich gelernten Wortpaaren A-C stark ab. Die Schlafgruppe konnte sich dagegen nach wie vor gut an die zuerst gelernte Wortliste A-B erinnern (Ellenbogen et al. 2006a).

Es wurde festgestellt, dass Schlaf in Bezug auf das deklarative Gedächtnis bei Kindern einen ähnlichen Effekt hat wie bei Erwachsenen. Bei Kindern wurde ebenfalls das Lernen von Wortpaaren getestet. Auch in dieser Altersgruppe erreichten die Probanden, die zwischen Lernen und Abfrage geschlafen hatten, bessere Ergebnisse als diejenigen, die während des Retentionsintervalls wach gewesen waren (Wilhelm et al. 2008; Backhaus et al. 2008).

Es wird vermutet, dass dem positiven Einfluss von Schlaf auf das deklarative Gedächtnis die Reaktivierung von zunächst instabilen Gedächtnisspuren im Hippocampus zugrunde liegt. Diese Reaktivierung wiederum bewirkt den Transfer der Gedächtnisinhalte in neokortikale Regionen. Dort werden die Inhalte langfristig gespeichert (Born et al. 2006; Gais und Born 2004). Für die Reaktivierung und den Transfer spielen langsame Oszillationen (~ 0.75 Hz), die vor allem während des SWS auftreten und überwiegend im frontalen Kortex entstehen, eine wichtige Rolle (Wilhelm et al. 2012a). Außerdem wird angenommen, dass der Transfer vom Hippocampus in den Neokortex nur während des SWS möglich ist, da ein hoher Acetylcholin-Spiegel tagsüber und während des REM-Schlafs den Transfer verhindert. Während des SWS sinkt jedoch der Acetylcholin-Spiegel. Somit kann in dieser Phase der Transfer in den Neokortex stattfinden (Gais und Born 2004; Hasselmo 1999).

1.3.2. Der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis

Der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Erwachsenen

Ein positiver Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis wurde mehrfach beobachtet (Walker et al. 2003; Walker et al. 2002; Fischer et al. 2002; Fischer et al. 2007; Wilhelm et al. 2008; Stickgold 2005). Beispielsweise war bei der Durchführung eines sogenannten *Finger to Thumb Opposition Task*, bei dem Probanden ihre Finger in einer bestimmten Reihenfolge zusammenführen mussten, zu beobachten, dass sich Probanden, die während des Retentionsintervalls geschlafen hatten, stärker in ihrer prozeduralen Leistung verbesserten als Probanden, die während eines gleich langen Retentionsintervalls wach gewesen waren (Fischer et al. 2002). Dies äußerte

sich sowohl in einer Zunahme der Geschwindigkeit als auch in einer Abnahme der Fehler. Wie beim deklarativen Gedächtnis bewirkt Schlaf auch beim prozeduralen Gedächtnis sowohl eine Verbesserung in der Performanz, die sich beispielsweise in Form einer Abnahme der Reaktionszeiten zeigt, als auch eine Stabilisierung der Gedächtnisspur gegenüber Interferenzen (Korman et al. 2007).

Allerdings gibt es auch Studien, in denen nicht beobachtet werden konnte, dass sich Schlaf im Vergleich zum Wachzustand stärker positiv auf die prozedurale Gedächtniskonsolidierung auswirkt (Al-Sharman und Siengsukon 2014; Song et al. 2007). Deswegen kann gemutmaßt werden, dass Schlaf sich nicht unter allen Umständen positiv auf das prozedurale Gedächtnis auswirkt. Ob und wie stark sich Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis auswirkt, hängt von mehreren Faktoren ab, beispielsweise von der Art der Aufgabe (Debas et al. 2010) oder von der Ausgangsperformanz (Wilhelm et al. 2012b). Außerdem ist für die prozedurale Gedächtnisbildung im Schlaf von Bedeutung, ob das Lernen ausschließlich implizit oder auch explizit stattfindet (Robertson et al. 2004; Song und Cohen 2014). Robertson und Kollegen stellten zum Beispiel fest, dass beim Lernen eines *SRTT* Offline-Konsolidierung sowohl im Schlaf als auch im Wachzustand stattfindet, wenn sich die Probanden nicht über das Vorliegen einer bestimmten Sequenz bewusst waren (implizites Lernen). Wussten die Probanden jedoch über das Vorliegen einer Sequenz Bescheid (explizites Lernen), so fand Offline-Konsolidierung nur im Schlaf statt.

Sind beim Lernen einer prozeduralen Gedächtnisaufgabe sowohl implizite als auch explizite Lernprozesse beteiligt, so könnten diese beiden Prozesse möglicherweise im Schlaf miteinander interferieren. Es wird vermutet, dass dabei der positive Effekt von Schlaf auf die expliziten Anteile der prozeduralen Gedächtnisaufgabe zu Ungunsten der impliziten Anteile der Aufgabe dominiert (Wagner et al. 2004; Fischer et al. 2006). Zudem wurde beobachtet, dass Schlaf dazu beiträgt, dass explizites Wissen über implizit gelernte Inhalte gewonnen werden kann. In einer Studie von Fischer und Kollegen (Fischer et al. 2006) wurde eine *SRTT*-Sequenz implizit gelernt. Probanden, die während des darauffolgenden Retentionsintervalls geschlafen hatten, konnten bei der

Abfrage die Sequenz auch explizit wiedergeben. Während des Schlafs gewannen die Probanden also explizites Wissen über die implizit gelernte Sequenz. Bei denjenigen, die während des Retentionsintervalls wach gewesen waren, entsprach die explizite Erinnerung an die implizit gelernte Sequenz dagegen einer Zufallswahrscheinlichkeit. Die Wachgruppe gewann im Gegensatz zur Schlafgruppe also kein explizites Wissen über die implizit gelernte Sequenz. Dafür verbesserte sich die Wachgruppe in der impliziten Leistung (Reaktionszeit), was bei der Schlafgruppe nicht der Fall war (Fischer et al. 2006).

Der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern

Bei Kindern läuft die prozedurale Gedächtniskonsolidierung im Wachzustand schneller ab als bei Erwachsenen (Ashtamker und Karni 2013). Inwiefern Schlaf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern fördert ist hingegen noch nicht zufriedenstellend geklärt. Die Datenlage in Bezug auf den Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern ist bisher wenig eindeutig. Zum einen gibt es durchaus Studien, die für einen positiven Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis sprechen (Astill et al. 2014; Wilhelm et al. 2012b). Zum anderen gibt es jedoch auch zahlreiche Studien, die im Vergleich zum Wachzustand keinen überlegenen Effekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern feststellen konnten (Wilhelm et al. 2008; Prehn-Kristensen et al. 2011) oder in denen sogar eine Verschlechterung in der prozeduralen Gedächtnisleistung über ein Schlaf-Retentionsintervall beobachtet wurde (Fischer et al. 2007).

In einer Studie von Wilhelm und Kollegen (2008) führten Kinder und Erwachsene einen *Finger Sequence Tapping Task* durch. Hierbei musste eine Sequenz aus fünf Elementen mit der nicht-dominanten Hand auf einer Tastatur so schnell wie möglich getippt werden. Die Sequenz wurde den Probanden auf einem Bildschirm vermittelt, indem in vier horizontal angeordneten Kästchen, die jeweils einer Taste entsprachen, abwechselnd ein weißer Stern auftauchte. Bei den Erwachsenen führte Schlaf während des Retentionsintervalls zu einer starken Verbesserung in der Durchführung dieser motorischen Aufgabe,

während Wachsein nur zu einer minimalen Verbesserung führte. Dagegen stellte man bei den Kindern fest, dass sich diejenigen, die während des Retentionsintervalls geschlafen haben, weniger verbesserten als diejenigen, die während des Retentionsintervalls wach waren.

Eine Studie von Fischer und Kollegen, bei der ein *SRTT* durchgeführt wurde, führte zu ähnlichen Ergebnissen (2007). In dieser Studie zeigte sich bei den Kindern, die während des Retentionsintervalls geschlafen haben, sogar eine Abnahme der prozeduralen Leistung. Die Kinder, die während eines gleich langen Retentionsintervalls wach geblieben waren, verbesserten sich dagegen. Bei Kindern kann im Gegensatz zu Erwachsenen also nicht von einem positiven Effekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis ausgegangen werden, zumindest nicht über die dem Lernen unmittelbar folgende Nacht.

Es wird jedoch angenommen, dass nach dem Erreichen einer bestimmten Ausgangsperformanz auch bei Kindern ein positiver Effekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis beobachtet werden kann (Wilhelm et al. 2012b). Wilhelm und Kollegen vermuteten, dass der Effekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern genauso hoch sein könnte wie bei Erwachsenen, wenn die Kinder vor dem Schlafen durch Training ein Leistungsniveau in einer prozeduralen Aufgabe erreicht hätten, das in etwa dem Leistungsniveau der Erwachsenen entspricht (2012b). Deswegen testeten sie vier Gruppen (zwei Erwachsenen-Gruppen und zwei Kinder-Gruppen) in einer prozeduralen Aufgabe (Button-Box) und ließen die Gruppen vor dem Retentionsintervall jeweils ein unterschiedlich umfangreiches Training durchführen: Eine Gruppe von Kindern und eine Gruppe von Erwachsenen führten vor dem Retentionsintervall jeweils ein Standard-Training (10 Blöcke) durch; eine Gruppe von Kindern führte ein erweitertes Training (30 Blöcke) durch; und eine Gruppe von Erwachsenen führte ein reduziertes Training (2 Blöcke) durch (Wilhelm et al. 2012b). Kinder, die das Standard-Training durchgeführt hatten, erreichten vor dem Retentionsintervall das niedrigste Leistungsniveau in der Versuchsaufgabe. Ein mittleres Leistungsniveau wurde von Erwachsenen, die das reduzierte Training durchgeführt hatten, und

Kindern, die das erweiterte Training durchgeführt hatten, erreicht. Das höchste Leistungsniveau erreichten die Erwachsenen, die das Standard-Training durchgeführt hatten. Eine durch Schlaf bedingte Verbesserung in der Aufgabe konnte nur dann festgestellt werden, wenn vor dem Retentionsintervall ein mittleres Leistungsniveau erreicht worden war. Dies war bei Kindern mit erweitertem Training und Erwachsenen mit reduziertem Training der Fall. Bei den anderen beiden Gruppen konnte kein durch Schlaf bedingter Verbesserungseffekt beobachtet werden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern vermutlich ebenso wie bei Erwachsenen von der Ausgangsperformanz abhängt.

Neben der Abhängigkeit von der Ausgangsperformanz werden weitere Ursachen für den fehlenden unmittelbaren positiven Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern diskutiert. Unter anderem wäre eine kompetitive Interaktion zwischen expliziter und impliziter Gedächtnisbildung im Schlaf zu Gunsten der expliziten Gedächtnisbildung denkbar. Die zurzeit vorliegenden Beobachtungen bezüglich des Einflusses von Schlaf auf das Gedächtnis bei Kindern würden mit dieser Annahme in Einklang stehen: Auf das prozedurale Gedächtnis konnte bisher kein bzw. nur ein geringer positiver Effekt von Schlaf beobachtet werden, während das deklarative Gedächtnis dagegen stark vom Schlaf profitiert.

Zudem stellten Wilhelm und Kollegen (2013) fest, dass Schlaf bei Kindern das Erlangen expliziten Wissens über implizit Gelerntes sogar noch stärker fördert als bei Erwachsenen. Dies weist ebenfalls darauf hin, dass Schlaf bei Kindern bevorzugt die explizite Gedächtnisbildung stärkt. Dass die Verfestigung deklarativer Gedächtnisinhalte bei Kindern so stark ausgeprägt ist, hängt höchstwahrscheinlich mit dem bei Kindern besonders langen und tiefen SWS zusammen. Wie bereits erwähnt, spielt dieser eine wichtige Rolle für die Konsolidierung des deklarativen Gedächtnisses. Der bei Kindern hohe Anteil an SWS am Gesamtschlaf bedingt vermutlich eine bevorzugte Stärkung des deklarativen Gedächtnisses, welche mit einer verminderten Stärkung des prozeduralen Gedächtnisses einhergehen könnte.

In diesem Zusammenhang sind Beobachtungen bei Kindern mit Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS) besonders interessant (Wilhelm et al. 2012a). Prehn-Kristensen und Kollegen konnten bei Kindern mit ADHS im Gegensatz zu gesunden Kindern eine positive Wirkung von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis beobachten (2011). Dafür ist bei Kindern mit ADHS die Förderung des deklarativen Gedächtnisses durch Schlaf weniger stark ausgeprägt als bei gesunden Kindern. Prehn-Kristensen und Kollegen vermuten, dass die geringere deklarative Konsolidierung während des Schlafs durch die für ADHS typische Hypoaktivität des präfrontalen Kortex bedingt ist. Der präfrontale Kortex spielt eine wichtige Rolle für die Konsolidierung des deklarativen Gedächtnisses. Hier entstehen nämlich die langsamen Oszillationen, die überwiegend während des SWS auftreten und für den deklarativen Konsolidierungsprozess von großer Bedeutung sind. Weiter schlussfolgern Prehn-Kristensen und Kollegen, dass bei Kindern mit ADHS aufgrund der verminderten deklarativen Konsolidierung eine stärkere prozedurale Konsolidierung möglich ist. Die deklarative Konsolidierung interferiert bei ihnen nämlich in geringerem Ausmaß mit der prozeduralen Konsolidierung als bei gesunden Kindern. Diese Erkenntnisse aus Studien mit Kindern mit ADHS unterstützen die Vermutung, dass bei Kindern während des Schlafs möglicherweise eine kompetitive Interaktion zwischen explizitem und implizitem Gedächtnis stattfindet, und dass der bei Kindern hohe SWS-Anteil dazu führt, dass das explizite Gedächtnis stärker durch Schlaf gefördert wird als das prozedurale Gedächtnis.

Dass bei Kindern über die dem Lernen unmittelbar folgende Nacht keine Verbesserung in prozeduralen Gedächtnisleistungen zu beobachten ist, muss nicht heißen, dass sich das prozedurale Gedächtnis bei Kindern völlig unabhängig von Schlaf bildet. Denkbar ist, dass Schlaf auch bei Kindern eine wichtige Rolle für das prozedurale Gedächtnis spielt, dies jedoch auf eine andere Weise geschieht als bei Erwachsenen (Fischer et al. 2007). Viele der Studien, die sich mit dem Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern auseinandersetzten, untersuchten lediglich einen Effekt

über die erste dem Lernen folgende Nacht. Möglicherweise beeinflusst der Schlaf bei Kindern das prozedurale Gedächtnis jedoch langfristig, ohne dass sich bereits in der ersten dem Lernen folgenden Nacht ein positiver Effekt zeigt. Solch eine langfristige Auswirkung des Schlafs auf das Gedächtnis trotz fehlenden unmittelbaren Effekts wurde bei jungen Zebrafinken beobachtet (Derégnaucourt et al. 2005; Margoliash und Schmidt 2010). Ein Ziel der vorliegenden Studie war daher unter anderem, zu untersuchen, ob ein ähnlicher Zusammenhang auch bei Kindern bestehen könnte. Deswegen wird im nachfolgenden Kapitel näher auf die bisherigen Kenntnisse über den Einfluss von Schlaf auf das sensomotorische Gedächtnis bei jungen Zebrafinken eingegangen.

1.3.3. Der Einfluss von Schlaf auf das sensomotorische Gedächtnis bei jungen Zebrafinken

Zebrafinken lernen im Alter von etwa 30 bis 90 Tagen singen indem sie die Melodien erwachsener Vögel imitieren. Die Melodie, die der erwachsene Vogel (Tutor) vorsingt, dient dem jungen Vogel als Vorlage. Zunächst gibt der junge Vogel nur unstrukturierte Laute von sich, versucht diese jedoch immer mehr der vom Tutor gegebenen Vorlage anzugleichen. Derégnaucourt und Kollegen beobachteten, dass die jungen Zebrafinken dabei morgens nach dem Schlafen die Melodien der erwachsenen Vögel schlechter imitieren können als abends vor dem Schlafen (2005). Je größer am Anfang der Lernphase die Verschlechterung der Melodiestructur über Nacht ist, desto exakter stimmt die eingeübte Melodie jedoch am Ende der Lernphase mit der Vorlage-Melodie des Tutors überein (Derégnaucourt et al. 2005). Der während des Schlafs stattfindende Prozess, der kurzfristig zu einem Leistungsrückgang führt, scheint sich langfristig also positiv auf das Erlernen der Melodie auszuwirken.

Um das Singen zu erlernen werden auditorische und motorische neuronale Schaltkreise beansprucht. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Systems ist der Nucleus robustus des Arcopalliums (RA), der als Schnittstelle zwischen auditorischem und motorischem System gilt. Er erhält Informationen vom auditorischen System und leitet diese an das motorische System weiter

(Margoliash und Schmidt 2010). Bei erwachsenen Zebrafinken kommt es während des Schlafs zur Reaktivierung von Neuronen im RA, die bereits während des Singens am Tag aktiviert waren. Im Schlaf wird die am Tag gesungene Melodie quasi wiederholt abgespielt (Margoliash und Schmidt 2010). Es wurde bemerkt, dass bei juvenilen Zebrafinken dagegen die Neurone des RA kaum Aktivität aufweisen, bevor die Vögel mit dem Lernen der Melodie beginnen. Hören sie jedoch zum allerersten Mal die zu lernende Melodie, so zeigt sich in der unmittelbar darauffolgenden Nacht eine hochfrequente Aktivität dieser Neurone. Die RA-Aktivität während des Schlafs wird bei juvenilen Zebrafinken also wesentlich durch die sensorische Repräsentation der zu lernenden Melodie beeinflusst (Margoliash und Schmidt 2010). Außerdem wird die RA-Aktivität bei den jungen Vögeln vom auditorischen Feedback, also dem Hören des selbst Gesungenen, gesteuert (Shank und Margoliash 2009). Diese beiden sensorischen bzw. sensomotorischen Inputs (Vorlage-Melodie vom Tutor und auditorisches Feedback der selbst gesungenen Melodie) sollen durch die RA-Aktivität während des Schlafs wahrscheinlich in das motorische bzw. prämotorische System integriert werden. Problematisch ist hierbei, dass sich die beiden zu integrierenden Inputs zu Beginn der Lernphase stark voneinander unterscheiden. Das, was der lernende Vogel zu Beginn der Lernphase von sich selbst hört (auditorisches Feedback), unterscheidet sich nämlich noch stark von dem, was der Tutor vorsingt (Vorlage-Melodie). Es wird vermutet, dass deswegen der Versuch, die beiden komplexen sensorischen bzw. sensomotorischen Informationen in das motorische bzw. prämotorische System zu integrieren, zunächst nicht gelingt und es so zum Leistungsrückgang während des Schlafs kommt (Wilhelm et al. 2012a). Möglicherweise ist auch der fehlende positive Einfluss von Schlaf auf das implizite Gedächtnis bei Kindern dadurch bedingt, dass diese Schwierigkeiten haben, komplexe sensomotorische Informationen in prämotorische und motorische Systeme einzubinden (Wilhelm et al. 2012a).

1.4. Fragestellung und Hypothesen

Nachfolgend werden die der Studie zugrundeliegenden Fragestellungen dargestellt.

1.4.1. Langzeiteffekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis

Eine fördernde Wirkung des Schlafs auf das prozedurale Gedächtnis konnte bei Kindern bisher nicht eindeutig belegt werden (Wilhelm et al. 2008; Prehn-Kristensen et al. 2011). In einer Studie von Fischer und Kollegen wurde sogar beobachtet, dass Schlaf bei Kindern im Vergleich zum Wachzustand zu einer Verschlechterung in einer prozeduralen Fertigkeit führen kann (2007). Auch bei juvenilen Zebrafinken wurde beobachtet, dass Schlaf zunächst zu einer Verschlechterung in der sensomotorischen Gedächtnisleistung führt, wenn sie Singen lernen (Derégnaucourt et al. 2005; Margoliash und Schmidt 2010). Diese kurzfristige Verschlechterung über Nacht geht jedoch mit einer langfristigen Verbesserung einher. Die Endperformanz ist bei den jungen Vögeln umso besser je stärker die nächtliche Verschlechterung zu Beginn der Lernphase ist. Diese Beobachtungen führten zu der Vermutung, dass Schlaf auch bei Kindern langfristig eine positive Auswirkung auf das prozedurale Gedächtnis haben könnte, obwohl über die erste Nacht, die dem Lernen unmittelbar folgt, kein positiver Effekt des Schlafs zu beobachten ist. In der vorliegenden Studie wurde deswegen untersucht, ob auch bei Kindern ein positiver Langzeiteffekt des Schlafs auf die Performanz einer regelmäßig trainierten prozeduralen Gedächtnisaufgabe zu beobachten ist. Dazu wurde von Kindern im Alter von 8 bis 11 Jahren eine prozedurale Gedächtnisaufgabe an einem Abend gelernt, am nächsten Morgen getestet und anschließend eine Woche lang täglich vor dem Schlafengehen trainiert. Am Ende der Trainingswoche wurde eine erneute Testung am Morgen durchgeführt. Basierend auf den dargestellten Befunden und Vermutungen wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 1: Es wird vermutet, dass sich Schlaf bei Kindern langfristig positiv auf das Lernen einer über einen bestimmten Zeitraum trainierten prozeduralen

Fertigkeit auswirkt, und dass dabei eine Verschlechterung bzw. geringere Verbesserung über die erste Nacht mit einer besseren Endperformanz am Ende der Trainingsphase einhergeht. Folgendes wird angenommen: Kinder die sich in der Versuchsaufgabe über die erste Nacht weniger stark verbessern, verbessern sich im Laufe der Trainingswoche umso stärker und bieten am Ende der Trainingswoche eine umso bessere Endperformanz.

1.4.2. Korrelation zwischen prozeduraler Gedächtniskonsolidierung und Schlafstadium

Es wird vermutet, dass die deklarative und die prozedurale Gedächtniskonsolidierung jeweils von unterschiedlichen Schlafstadien stärker profitieren. Man geht davon aus, dass der SWS vor allem die Konsolidierung deklarativer Gedächtnisinhalte unterstützt, indem er zur Reaktivierung dieser Hippocampus-abhängigen Gedächtnisinhalte führt (Rasch et al. 2007; Marshall und Born 2007; Gais und Born 2004; Plihal und Born 1997). Dagegen nimmt man an, dass es während des REM-Schlafs zur Reaktivierung prozeduraler Gedächtnisinhalte kommt (Peigneux et al. 2003) und REM-Schlaf somit eher einen fördernden Effekt auf das non-deklarative Gedächtnis hat (Plihal und Born 1997; Marshall und Born 2007).

Um zu untersuchen, ob sich auch bei Kindern ein Zusammenhang zwischen prozeduraler Gedächtnisleistung und REM-Schlaf zeigt, wurde in der Nacht, die dem Lernen unmittelbar folgte, der Schlaf der Probanden mittels Polysomnographie aufgezeichnet.

Folgende Hypothese wurde aufgestellt:

Hypothese 2: Es wird vermutet, dass sich in der vorliegenden Studie eine Korrelation zwischen dem REM-Schlaf-Anteil an der Gesamtschlafdauer und der Verbesserung (Reaktionszeitabnahme) in der durchzuführenden prozeduralen Aufgabe über Nacht zeigt.

1.4.3. Interaktion zwischen implizitem und explizitem Gedächtnis

Als eine mögliche Ursache für den fehlenden unmittelbar nach einer Nacht auftretenden positiven Effekt des Schlafs auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern wird die Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung während des Schlafs diskutiert. Aufbauend auf einer Studie von Wilhelm und Kollegen (2013) soll deswegen auch in der vorliegenden Studie auf diesen Aspekt eingegangen werden. Wilhelm und Kollegen untersuchten bei Erwachsenen und Kindern, ob Schlaf dazu beiträgt, dass explizites Wissen über eine implizit gelernte Sequenz erlangt werden kann. Dabei stellte sich heraus, dass Schlaf sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen diesen Prozess fördert. Kinder waren nach dem Schlafen in der expliziten Wiedergabe der Sequenz sogar besser als Erwachsene. Dagegen wirkte sich in dieser Studie der Schlaf bei Erwachsenen stärker positiv auf die implizite Performanz der Versuchsaufgabe aus als bei Kindern (Wilhelm et al. 2013). Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass bei Kindern im Schlaf eine Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung zu Gunsten der expliziten Gedächtnisbildung und zu Ungunsten der impliziten Gedächtnisbildung stattfindet. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass Kinder im Vergleich zu Erwachsenen nachts besonders viel Zeit im SWS verbringen, welcher für die Konsolidierung des deklarativen Gedächtnisses von großer Bedeutung ist (Wilhelm et al. 2013; Wilhelm et al. 2012a; Prehn-Kristensen et al. 2011).

Um die Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung weiter zu untersuchen, wurde in der vorliegenden Studie am Morgen nach der ersten Nacht das explizite Wissen über die am Vorabend implizit gelernte Sequenz abgefragt.

Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

Hypothese 3a): Es wird damit gerechnet, dass die Probanden die am ersten Abend implizit gelernte Sequenz der Versuchsaufgabe am nächsten Morgen explizit wiedergeben können.

Hypothese 3b): Es wird vermutet, dass eine bessere explizite Wiedergabe der Sequenz mit einer schlechteren impliziten Performanz der Versuchsaufgabe, das heißt langsameren Reaktionszeiten, einhergeht.

Hypothese 3c): Weiter wird vermutet, dass eine bessere explizite Wiedergabe der Sequenz mit einem höheren absoluten oder relativen SWS-Anteil an der Gesamtschlafdauer einhergeht.

1.4.4. Goal-directed learning und movement-directed learning

Bei Erwachsenen stellte sich heraus, dass Schlaf überwiegend das *goal-directed learning* fördert, sich jedoch nicht auf das *movement-directed learning* auswirkt (Witt et al. 2010; Robertson 2009; Cohen et al. 2005). In der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, ob sich dies bei Kindern ähnlich verhält. Dazu wurde von den Probanden eine motorische Sequenz eine Woche lang täglich vor dem Schlafengehen mit einer Hand trainiert. Am Ende der Trainingswoche wurden drei Transfer-Testungen mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchgeführt. Um zu überprüfen, ob *goal-directed learning* stattgefunden hat, wurde die trainierte Sequenz mit der nicht-trainierten Hand getestet. Um feststellen zu können, ob *movement-directed learning* stattgefunden hat, wurde die Spiegelung der trainierten Sequenz mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand getestet. Eine weitere dem Probanden unbekannte Sequenz, die ebenfalls mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand getestet wurde, diente als Kontrolle.

Basierend auf den Beobachtungen bei Erwachsenen wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 4: Schlaf fördert auch bei Kindern das *goal-directed learning*, nicht jedoch das *movement-directed learning*.

In Bezug auf die Transfer-Testungen, die mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchgeführt werden, wird deswegen erwartet, dass die mittleren Reaktionszeiten bei Testung der trainierten Sequenz (Transfer

‚Lernsequenz‘) kleiner sind als bei Testung der Spiegelung der trainierten Sequenz (Transfer ‚Spiegelung‘) und der unbekanntes Kontrollsequenz (Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘).

2. Material und Methoden

2.1. Versuchsdesign

In dieser Studie führte eine Gruppe von Kindern eine prozedurale Gedächtnisaufgabe durch. Die Aufgabe wurde zunächst an einem Abend gelernt, am nächsten Morgen getestet, dann über eine Woche hinweg täglich abends vor dem Schlafengehen trainiert und schließlich nach dem letzten abendlichen Training morgens erneut getestet. In der auf das Lernen folgenden Nacht wurde der Schlaf des Probanden mittels Polysomnographie aufgezeichnet. Das Hauptziel dieser Arbeit ist, den Schlaf der ersten Nacht sowie die Veränderung der Gedächtnisleistung über die erste Nacht mit der Endperformanz in Beziehung zu setzen.

Die Studie wurde durch die Ethikkommission der Universität Tübingen genehmigt (Projektnummer 027/2013BO1).

2.2. Versuchspersonen

Als Probanden wurden Kinder im Alter von 8 bis 11 Jahren rekrutiert. Hierzu wurden Informationsbriefe in Schulen, Vereinen und Kirchengemeinden verteilt. Kinder mit chronischen Erkrankungen, insbesondere der Atemwege, und Schlafstörungen wurden nicht in die Studie aufgenommen. Weitere Ausschlusskriterien waren Frühgeburtlichkeit (Geburt vor Vollendung der 37. Schwangerschaftswoche), Rechen- bzw. Lese-Rechtschreib-Schwäche und dauerhafte Medikamenteneinnahme. Voraussetzung für die Studienteilnahme war Rechtshändigkeit.

Diese Kriterien wurden in Telefongesprächen und mittels Fragebögen abgefragt. Hierzu wurden ein allgemeiner Fragebogen zum Gesundheitszustand des Probanden sowie die *Sleep Disturbance Scale for Children* (SDSC), ein Fragebogen der zur Untersuchung auf das Vorliegen von Schlafstörungen bei Kindern dient, genutzt.

Die Probanden sowie deren Eltern wurden im persönlichen Gespräch und mittels eines Informationsschreibens über den Ablauf der Studie aufgeklärt. Die Einwilligung zur Teilnahme erfolgte schriftlich durch die Erziehungsberechtigten. Die Teilnehmer erhielten eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 80 €.

2.3. Methoden

2.3.1. Versuchsaufgabe

Prozedurale Gedächtnisaufgabe

Die in dieser Studie durchgeführte prozedurale Gedächtnisaufgabe wurde bereits in einigen anderen Studien angewendet (Wilhelm et al. 2013; Prehn-Kristensen et al. 2011). Die Aufgabe wurde mit einer sogenannten Button-Box durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine 50 cm x 22 cm x 7 cm große Kiste, auf der sich acht bunte Knöpfe befinden, die in zwei Reihen à vier Knöpfen angeordnet sind. Die Button-Box wurde zur Durchführung der Aufgabe an einen Computer angeschlossen. Startete man das entsprechende Programm, so leuchteten die Knöpfe auf der Button-Box in bestimmten Reihenfolgen auf, die zuvor programmiert worden waren.

Die Aufgabe bestand darin, dass die auf der Button-Box aufleuchtenden Knöpfe so schnell wie möglich vom Probanden gedrückt werden mussten: Sobald ein Knopf leuchtete, musste dieser gedrückt werden, woraufhin das Licht ausging und sofort der nächste Knopf aufleuchtete. Das Aufleuchten der Knöpfe erfolgte nach einer sich wiederholenden Sequenz, was dem Probanden vor Durchführung der Aufgabe jedoch nicht mitgeteilt wurde. Eine Sequenz bestand aus acht Elementen, wobei jeder der acht Button-Box-Knöpfe genau einmal pro Sequenz vorkam. Die fünfmalige Wiederholung einer Sequenz bildete einen Block. Auf jeden Block folgte eine 30 Sekunden lange Pause, während der dem Probanden auf dem Bildschirm seine durchschnittliche Reaktionszeit und die Anzahl der Fehler, also der nicht richtig gedrückten Knöpfe, angezeigt wurden.

Den Probanden wurde bei jedem Durchgang mitgeteilt, mit welcher Hand sie die Aufgabe durchführen sollten. Die andere Hand musste hinter dem Rücken gehalten werden. Die Aufgabe wurde im Stehen und in einem möglichst ruhigen Raum bei den Probanden zu Hause durchgeführt.

Während der Durchführung der Button-Box-Aufgabe wurden durch den angeschlossenen Computer für jeden Knopfdruck die Reaktionszeit in ms sowie die Exaktheit in binärer Weise (1 für das richtige Drücken des aufleuchtenden Knopfes, 0 für das Drücken eines anderen Knopfes) aufgezeichnet.

Zur Erfassung des impliziten Wissens diente bei der Button-Box-Aufgabe die Reaktionszeit.

Expliziter Wissenstest

Um das explizite Wissen einer Sequenz zu testen, wurden die Probanden aufgefordert, an der Button-Box zu zeigen, in welcher Reihenfolge sie die Knöpfe zuvor bei Durchführung der prozeduralen Gedächtnisaufgabe gedrückt hatten. Konnten sie sich nicht daran erinnern, sollten sie raten. Es wurden keine weiteren Hinweise wie beispielsweise der Startknopf oder die Anzahl der zu nennenden Knöpfe gegeben (vgl. Wilhelm et al. 2013).

Das explizite Wissen wird anhand der Anzahl der richtig genannten Übergänge innerhalb der abgefragten Sequenz bewertet (vgl. Wilhelm et al. 2013).

Sequenzen

Zur Beschreibung der in der Studie verwendeten Button-Box-Sequenzen werden die Button-Box-Knöpfe, wie in **Abbildung 4** dargestellt, von rechts nach links nummeriert. Dabei entsprechen die Zahlen 1 bis 4 den vier Knöpfen in der unteren Knopfreihe der Box, die Zahlen 5 bis 8 den vier Knöpfen in der oberen Reihe.

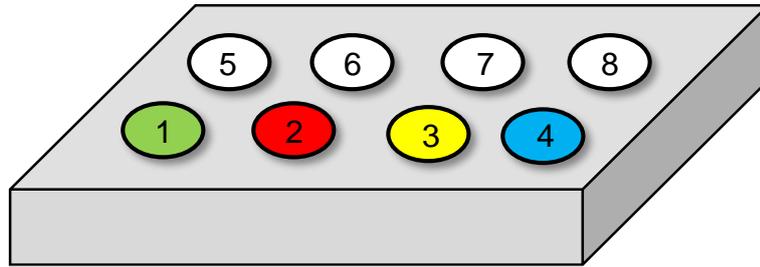


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Button-Box. Zur Durchführung der Versuchsaufgabe diente eine 50 cm x 22 cm x 7 cm große Box, auf der sich acht in zwei Reihen angeordnete Knöpfe befanden. Für die Beschreibung der Sequenzen wurden die Knöpfe wie abgebildet durchnummeriert. Bei der Durchführung der Aufgabe gab es keine Nummern auf den Knöpfen.

Folgende Sequenzen wurden in der Studie verwendet:

A: 8 – 6 – 1 – 3 – 2 – 7 – 5 – 4 A Spiegelung: 5 – 7 – 4 – 2 – 3 – 6 – 8 – 1
 B: 7 – 8 – 1 – 6 – 4 – 3 – 5 – 2 B Spiegelung: 6 – 5 – 4 – 7 – 1 – 2 – 8 – 3
 C: 1 – 4 – 2 – 8 – 3 – 5 – 7 – 6 C Spiegelung: 4 – 1 – 3 – 5 – 2 – 8 – 6 – 7
 D: 3 – 7 – 1 – 8 – 2 – 4 – 6 – 5 D Spiegelung: 2 – 6 – 4 – 5 – 3 – 1 – 7 – 8

Jedem Probanden wurden während des Versuchs insgesamt fünf verschiedene Button-Box-Sequenzen dargeboten:

- eine Lernsequenz
- eine Baseline-Sequenz_(Transfer)
- eine Kontrollsequenz_(Trainingshand)
- eine Kontrollsequenz_(andere Hand)
- die Spiegelung der Lernsequenz.

Die Sequenzen A bis D wurden den vier Sequenz-Funktionen Lernsequenz, Kontrollsequenz_(Trainingshand), Kontrollsequenz_(andere Hand) und Baseline-Sequenz_(Transfer) ausbalanciert zugeordnet. So diente beispielsweise die Sequenz A bei einigen Probanden als Lernsequenz, bei anderen dagegen als Kontrollsequenz_(Trainingshand), Kontrollsequenz_(andere Hand) oder Baseline-Sequenz_(Transfer). Durch die Ausbalancierung diente jede der Sequenzen A bis D

ungefähr gleich häufig als Lernsequenz, Kontrollsequenz_(Trainingshand), Kontrollsequenz_(andere Hand) und Baseline-Sequenz_(Transfer). Die Spiegelungssequenz konnte selbstverständlich nicht zugeteilt werden, sondern hing von der jeweiligen Lernsequenz ab.

2.3.2. Kontrollvariablen

In der Lern- und in den beiden Abrufphasen sowie bei Erhebung der Baseline_(Transfer) wurde von den Probanden vor Ausführung der Versuchsaufgabe jeweils ein Fragebogen zur Befindlichkeit ausgefüllt und der sogenannte *Psychomotor Vigilance Test* (PVT) durchgeführt.

Fragebogen zur Befindlichkeit

Der Fragebogen zur Befindlichkeit fragte Stimmung, Müdigkeit und Motivation ab. Dabei gab es jeweils drei Antwortmöglichkeiten, denen im Nachhinein zur Auswertung Werte von 1 bis 3 zugeteilt wurden. Die Antwortmöglichkeiten sowie die zugeteilten Werte sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Fragebogen zur Befindlichkeit.

	Antwortmöglichkeiten		
Stimmung	„gar nicht gut“	„es geht so“	„sehr gut“
Müdigkeit	„sehr müde“	„etwas müde“	„gar nicht müde“
Motivation	„gar keine Lust“	„ein bisschen“	„große Lust“
Wert	1	2	3

Abgefragt wurden Stimmung, Müdigkeit und Motivation. Die Tabelle stellt die Antwortmöglichkeiten dar. Zur Auswertung wurden den Antworten Werte von 1 bis 3 zugeteilt.

PVT

Der PVT ist ein Test, der an einem Computer durchgeführt wird und bei dem der Proband schnellstmöglich die Leertaste drücken muss, sobald auf dem

Bildschirm ein roter Kreis erscheint. Der Test dauert 5 Minuten. In diesen 5 Minuten erscheint der Kreis mehrmals in zufälligen Zeitabständen auf dem Bildschirm. Die Reaktionszeiten des Probanden dienen als Maß für dessen Aufmerksamkeit und Konzentration zum Zeitpunkt der Durchführung.

2.3.3. Schlafaufzeichnung

Die polysomnographische Aufzeichnung erfolgte mittels eines kleinen mobilen Gerätes (Firma: SOMNOmedics, Model: SOMNOscreen™ plus Neuro) und beinhaltete die Erfassung von EEG, EOG und EMG. Die Aufzeichnung erfolgte mit einer Samplingrate von 256 Hz. Für EOG und EEG wurden Frequenzen im Bereich von 0.2 bis 70 Hz aufgezeichnet, für das EMG im Bereich von 0.2 bis 150 Hz.

Zur Aufzeichnung des EEGs wurden die Elektrodenpositionen Cz, C3, C4, F3, F4, P3 und P4 nach dem 10-20-System gewählt. Als Referenz dienten zwei Elektroden, die auf dem linken (M1) und dem rechten Mastoid (M2) angebracht wurden. Für das EOG wurde eine Elektrode seitlich unterhalb des linken Auges angebracht (EOG1), eine zweite seitlich oberhalb des rechten Auges (EOG2). Zur Registrierung des EMGs dienten zwei submental angebrachte Elektroden (EMG+ und EMG_{ref}). Die Erdungselektrode (G) befand sich auf der Stirn. Die Elektrodenpositionen werden in **Abbildung 5** schematisch dargestellt. Die Positionen wurden mithilfe einer Haube ermittelt und markiert. Um die Haube korrekt aufzusetzen, wurde zuvor mit einem Maßband Cz ermittelt (halbe Strecke Nasion - Inion) und markiert.

Vor Anbringung der Elektroden wurde die Kopfhaut bzw. Haut an der entsprechenden Stelle mit einem abrasiven Hautvorbereitungsgel (Spes medica, Everi) und Desinfektionsmittel gereinigt, um die Impedanz zu mindern. Die Elektroden auf dem Kopf wurden mit einer leitenden und haftenden Elektrodencreme (EC2® Genuine Grass Electrode Cream) auf der Kopfhaut angebracht. Zur Anbringung der Elektroden im Gesicht wurden doppelseitig haftende Kleberinge und ein Elektrodengel verwendet. Zudem wurden alle Elektroden nochmals mit zwei ca. 5 cm langen Pflasterklebestreifen fixiert.

Beim Anbringen der Elektroden wurde mittels eines kleinen Impedanz-Messgerätes sichergestellt, dass die Impedanzen der Elektroden auf dem Kopf bei maximal 5 k Ω und die der Elektroden am Gesicht bei maximal 10 k Ω lagen.

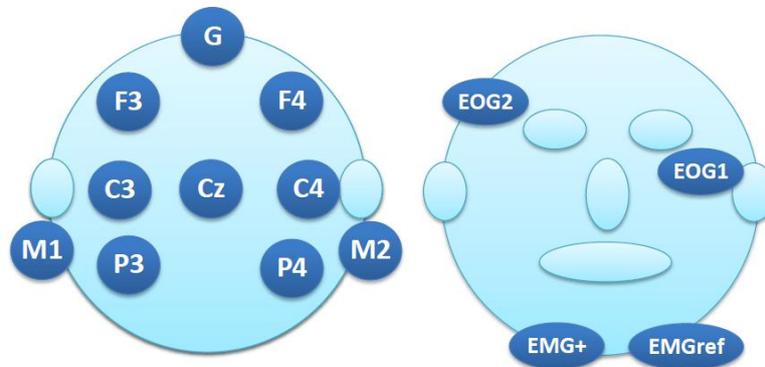


Abbildung 5: Elektroden-Setup. Zur Aufzeichnung des Elektroenzephalogramms wurden die Elektrodenpositionen F3, F4, C3, Cz, C4, P3 und P4 nach dem 10-20-System gewählt. Als Referenzelektroden dienten die jeweils rechts und links auf dem Mastoid angebrachten Elektroden M1 und M2. Die Erdungselektrode G wurde auf der Stirn angebracht. Elektromyogramm (EMG+ und EMG_{ref}) und Elektrookulogramm (EOG1 und EOG2) wurden jeweils über zwei Elektroden aufgezeichnet, die wie abgebildet platziert wurden.

2.4. Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs wurde jedem Probanden eine in dieser Arbeit so bezeichnete Trainingshand zugeteilt, mit der der Großteil der Durchgänge der Versuchsaufgabe durchgeführt wurde. Einige Durchgänge der Aufgabe wurden nicht mit der Trainingshand, sondern mit der jeweils kontralateralen Hand durchgeführt. Die Zuordnung der Trainingshand erfolgte ausbalanciert, sodass in etwa die Hälfte der Probanden die rechte, die andere Hälfte der Probanden die linke Hand als Trainingshand nutzten.

Die Erhebung wurde bei den Probanden zu Hause durchgeführt und umfasste neun aufeinander folgende Versuchstage (Tag 1 bis Tag 9) sowie eine zusätzliche kurze Testung, die bereits (mindestens einen Tag, maximal 42 Tage) zuvor stattfand (Tag 0). Die Versuchszeiten wurden so vereinbart, dass sie zu den gewohnten Schlafenszeiten des Kindes passten. Ein Überblick über den Versuchsablauf wird in **Abbildung 6** gegeben.

Tag 0	Tag 1		Tag 2	Tag 3 bis Tag 8	Tag 9
<u>morgens:</u> Baseline _(Transfer)	<u>abends:</u> Lernen, Baseline _(Lernsequenz)	Schlaf-Aufzeichnung	<u>morgens:</u> Abruf 1, Expliziter Wissenstest <u>abends:</u> Training 1	<u>abends:</u> Training 2-7	<u>morgens:</u> Abruf 2, Transfer

Abbildung 6: Versuchsablauf. Der Versuch umfasste neun aufeinander folgende Versuchstage (Tag 1 bis Tag 9) sowie eine zusätzliche Testung, die bereits wenige Tage zuvor stattfand (Tag 0). An Tag 1 wurde abends vor dem Schlafengehen mit der Trainingshand die Lernsequenz gelernt (Lernen) und eine Baseline erhoben (Baseline_(Lernsequenz)). In der darauffolgenden Nacht wurde der Schlaf des Probanden mittels Polysomnographie aufgezeichnet. An Tag 2 wurde morgens die Lernsequenz mit der Trainingshand an der Button-Box getestet (Abruf 1) und das explizite Wissen der Lernsequenz abgefragt. An den Tagen 2 bis 8 wurde die Lernsequenz täglich abends vor dem Schlafengehen mit der Trainingshand trainiert. An Tag 9 wurde die Lernsequenz morgens erneut mit der Trainingshand getestet (Abruf 2). Zudem wurden an Tag 9 ein Transfer-Durchgang mit der Trainingshand und drei Transfer-Durchgänge mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchgeführt. Für diese Transfer-Durchgänge wurde bereits einige Tage vor Tag 1 (an Tag 0) mit der kontralateralen Hand eine Baseline erhoben (Baseline_(Transfer)).

Vorbereitendes Telefongespräch

Vor Beginn des eigentlichen Versuchs erfolgte ein etwa 15- bis 20-minütiges Telefongespräch mit einem Erziehungsberechtigten des Probanden, bei dem dieser über den Versuchsablauf informiert wurde, Kriterien abgefragt wurden, die das Kind von einer Teilnahme ausgeschlossen hätten, und Termine vereinbart wurden.

Erstes Treffen mit Erhebung der Baseline_(Transfer) (Tag 0)

Der erste Termin fand vormittags oder nachmittags statt. Der Termin diente dazu, mit den Kindern und Eltern den Ablauf des Versuchs durchzusprechen, die schriftliche Einverständniserklärung eines Erziehungsberechtigten und die

mündliche des Kindes einzuholen, und den Fragebogen zum Gesundheitszustand des Kindes sowie die SDSC von den Eltern ausfüllen zu lassen.

Außerdem wurde dieser Termin genutzt, um die sogenannte Baseline_(Transfer) zu erheben. Dazu wurde eine Sequenz (Baseline-Sequenz_(Transfer)) in drei Blöcken an der Button-Box getestet. Bei diesem Durchgang wurde nicht die Trainingshand, sondern die jeweils kontralaterale Hand genutzt. Vor der Versuchsaufgabe wurde vom Probanden der Fragebogen zur Befindlichkeit ausgefüllt und der PVT durchgeführt.

Den Probanden wurde bei diesem ersten Termin ein Dummy-Polysomnographie-Gerät mitgebracht, an dem fünf Elektroden befestigt waren. Die Probanden bzw. deren Eltern wurden gebeten, vor der Versuchsnacht eine Probenacht durchzuführen. Durch die Eltern wurden dazu die am Gerät befestigten Elektroden mit Pflastern im Gesicht des Kindes angebracht und die Kinder schliefen eine Nacht mit den Elektroden im Gesicht und dem Gerät neben sich im Bett. So konnten sich die Kinder bereits vor der Versuchsnacht an das mobile Polysomnographie-Gerät und die Elektroden gewöhnen.

Lernen und Baseline_(Lernsequenz) (Tag 1)

Der Lern-Termin (Tag 1) fand abends statt. Zunächst wurden die Elektroden F3, F4, Cz, C3, C4, P3, P4, M1 und M2 auf dem Kopf des Probanden befestigt. Danach wurde der Fragebogen zur Befindlichkeit vom Probanden ausgefüllt und der PVT durchgeführt. Anschließend wurde eine Sequenz auf der Button-Box gelernt. Diese Sequenz wird in dieser Arbeit als Lernsequenz bezeichnet. Wie bereits erwähnt, wurde jedem Probanden eine der in 2.3.1.

Versuchsaufgabe beschriebenen Sequenzen A, B, C oder D als Lernsequenz zugeteilt. Das Lernen bestand aus zehn Blöcken der Lernsequenz. Diesmal wurde zur Durchführung der Aufgabe die dem Probanden zugeteilte Trainingshand genutzt. Nach dem Lernen wurden die Elektroden im Gesicht des Probanden angebracht. 30 Minuten nach dem Lernen wurde die Lernsequenz nochmals mit der Trainingshand getestet. Diese sogenannte Baseline_(Lernsequenz) bestand aus drei Blöcken. Nach dem Erheben der

Baseline_(Lernsequenz) wurde die polysomnographische Aufzeichnung gestartet und die Probanden wurden aufgefordert, zu Bett zu gehen.

Abruf 1 (Tag 2)

Am nächsten Morgen (Tag 2) wurden zunächst die Elektroden entfernt und der Proband und dessen Eltern befragt, wann genau der Proband zu Bett gegangen war, was er zwischen den Testungen und dem Zubettgehen gemacht hatte, wie er geschlafen hat, ob er im Laufe der Nacht aufgewacht ist, wann und wodurch er am Morgen aufgewacht ist und ob es Probleme im Umgang mit dem Polysomnographie-Gerät gegeben hat. Etwa eine Stunde nach dem Aufstehen wurde die Lernsequenz erneut mit der Trainingshand getestet (Abruf 1). Nach einer 15-minütigen Pause wurde das explizite Wissen der Lernsequenz abgefragt.

Training (Tag 2 bis Tag 8)

Von nun an wurde die Lernsequenz genau eine Woche lang (Tag 2 bis Tag 8) jeden Abend vor dem Zubettgehen mit der Trainingshand geübt (Training 1-7). Jede abendliche Trainingseinheit umfasste fünf Blöcke. Das Training wurde von den Probanden selbstständig durchgeführt. Dazu behielten die Probanden die Button-Box und den Computer bei sich zu Hause. Das entsprechende Programm wurde von den Probanden selbst oder von den Eltern gestartet. Die Studienteilnehmer und deren Eltern wurden darauf hingewiesen, dass sie sich während der Trainingswoche nicht über die Aufgabe, beispielsweise über die Reihenfolge der aufleuchtenden Knöpfe, unterhalten sollten. Zudem wurde betont, dass die Aufgabe unmittelbar vor dem Schlafengehen durchgeführt werden sollte und nach Durchführung der Aufgabe nicht mehr ferngesehen werden durfte.

Abruf 2 und Transfer (Tag 9)

Nach dem siebten abendlichen Training erfolgte ein weiterer Abruf (Abruf 2) am Morgen (Tag 9). Die trainierte Sequenz (Lernsequenz) wurde wie bei Abruf 1

etwa eine Stunde nach dem Aufstehen in drei Blöcken mit der Trainingshand getestet.

Außerdem wurden an diesem Morgen mehrere Transfer-Testungen durchgeführt. Zunächst bekam der Proband drei Blöcke einer bisher unbekannt Sequenz (Kontrollsequenz_(Trainingshand)) dargeboten, die er erneut mit der Trainingshand durchzuführen hatte (Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘). Darauf folgten drei weitere Durchgänge, die der Proband diesmal nicht mit der Trainingshand, sondern mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchzuführen hatte. Auch diese drei Durchgänge bestanden aus jeweils drei Blöcken. Erstens wurde die mit der Trainingshand trainierte Lernsequenz nun mit der anderen Hand getestet (Transfer ‚Lernsequenz‘). Zweitens wurde dem Probanden eine Sequenz dargeboten, die der Spiegelung der Lernsequenz an einer gedachten vertikalen Mittelachse entsprach (Transfer ‚Spiegelung‘). Und drittens wurde nochmals eine bisher völlig unbekannt Sequenz (Kontrollsequenz_(andere Hand)) getestet (Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘).

Als Kontrollsequenz_(Trainingshand) und Kontrollsequenz_(andere Hand) wurde jeweils eine der in 2.3.1. *Versuchsaufgabe* beschriebenen Sequenzen A, B, C oder D zugeteilt.

Zwischen Abruf 2 und dem Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘, sowie zwischen diesem und den Transfer-Testungen mit der kontralateralen Hand wurde jeweils eine Pause von fünf Minuten eingelegt.

Die Reihenfolge der drei Transfer-Durchgänge mit der kontralateralen Hand (Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘, Transfer ‚Lernsequenz‘ und Transfer ‚Spiegelung‘) war bei den Probanden jeweils unterschiedlich. Die Zuordnung erfolgte ausbalanciert, sodass die sechs möglichen Reihenfolgen in der Studie in etwa gleich häufig vorkamen.

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Durchgänge der Versuchsaufgabe und die dabei jeweils verwendeten Sequenzen.

Durchgang	Name der Sequenz	Zuordnungs- Beispiel
Baseline _(Transfer)	Baseline-Sequenz _(Transfer)	A
Lernen	Lernsequenz	B
Baseline _(Lernsequenz)	Lernsequenz	B
Abruf 1	Lernsequenz	B
Training 1-7	Lernsequenz	B
Abruf 2	Lernsequenz	B
Transfer ,Kontrolle Trainingshand‘	Kontrollsequenz _(Trainingshand)	C
Transfer ,Lernsequenz‘	Lernsequenz	B
Transfer ,Kontrolle andere Hand‘	Kontrollsequenz _(andere Hand)	D
Transfer ,Spiegelung‘	Spiegelung der Lernsequenz	B Spiegelung

Abbildung 7: Sequenzen. Jedem Probanden wurden während des Versuchs verschiedene Sequenzen dargeboten. Die erste Spalte zeigt die Durchgänge der Versuchsaufgabe, die zweite Spalte zeigt, wie die dazugehörige Sequenz bezeichnet wird. Die in der Studie verwendeten Sequenzen A, B, C und D wurden den Funktionen Lernsequenz, Kontrollsequenz_(Trainingshand), Kontrollsequenz_(andere Hand) und Baseline-Sequenz_(Transfer) ausbalanciert zugeordnet. Die dritte Spalte stellt eine beispielhafte Zuordnung dar. Die weiß unterlegten Testungen wurden mit der Trainingshand, die grau unterlegten mit der jeweils kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchgeführt.

2.5. Datenauswertung

2.5.1. Auswertung der polysomnographischen Aufzeichnung

Zunächst wurden die polysomnographischen Daten mit dem Programm ‚BrainVision Analyzer‘ gefiltert. Für EEG und EOG wurde ein Tiefpassfilter mit einem Cutoff von 35 Hz genutzt. Für das EMG wurde ein Tiefpassfilter mit einem Cutoff von 100 Hz und ein Hochpassfilter mit einem Cutoff von 5 Hz genutzt. Zur Auswertung wurden die EEG-Daten gegen M1 und M2 referenziert. Das EOG wurde durch Subtraktion des einen vom anderen Kanal berechnet.

Die Auswertung der polysomnographischen Aufzeichnung erfolgte visuell nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales (Rechtschaffen und Kales 1968) und wurde offline mit dem Programm ‚*SchlafAus Version 1.5.0.1*‘ (Copyright © 2000 Steffen Gais) durchgeführt. Abschnitten von je 30 Sekunden wurden jeweils eine der Schlafphasen S1, S2, S3, S4 oder REM-Schlaf zugeteilt. Ein Abschnitt wurde als Movement Time (MT) gewertet, wenn über die Hälfte des auszuwertenden Abschnitts bewegungsbedingt Artefakte enthielt.

Zur Auswertung wurde bevorzugt einer der beiden Kanäle C3 oder C4 gewählt. Bei fünf Probanden konnte aufgrund schlechter Signalqualität (hohe Impedanzen, zahlreiche Artefakte, lose Elektroden) nicht durchgehend mit C3 oder C4 gescort werden. Stattdessen wurde bei einzelnen 30s-Segmenten auf andere Kanäle (F3, F4 oder P4) ausgewichen. Bei drei Probanden war die Signalqualität von M1 stellenweise schlecht. Deswegen wurde bei einzelnen Abschnitten dieser Aufzeichnungen nicht gegen M1 und M2, sondern ausschließlich gegen M2 referenziert.

Es wurden die Gesamtschlafdauer, der absolute und der relative Anteil der einzelnen Schlafphasen an der Gesamtschlafdauer sowie Einschlaflatenz, SWS-Latenz und REM-Schlaf-Latenz ermittelt. Als Einschlaflatenz wird die Zeit bezeichnet, die zwischen dem Ausschalten des Lichts und dem Einschlafzeitpunkt vergeht. Das erstmalige Auftreten einer S1-Epoche, der eine S2-Epoche unmittelbar folgt, wurde als Einschlafzeitpunkt definiert. Um die Einschlaflatenz ermitteln zu können, wurden die Eltern der Probanden gebeten, durch Drücken eines Knopfes auf dem Polysomnographie-Gerät einen Marker zu setzen, sobald sich das Kind zu Bett gelegt hatte und das Licht ausgemacht wurde. In acht Fällen wurde dies vergessen, sodass der am nächsten Morgen erfragte Zeitpunkt des Zubettgehens und Ausschaltens des Lichts zur Ermittlung der Einschlaflatenz genutzt wurde. SWS-Latenz und REM-Schlaf-Latenz entsprechen jeweils der Dauer zwischen dem Einschlafzeitpunkt und dem erstmaligen Auftreten von SWS bzw. REM-Schlaf.

2.5.2. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm *IBM SPSS Statistics Version 22.0*.

Von der Auswertung der Versuchsaufgabe mit der Button-Box wurden Reaktionszeiten von mehr als 1500 ms und weniger als 100 ms ausgeschlossen. Reaktionszeiten von weniger als 100 ms sind auf Fehlreaktionen oder zufälliges Drücken zurückzuführen. Verlangsamte Reaktionszeiten von mehr als 1500 ms sind durch technische Probleme bedingt oder dadurch verursacht, dass das Kind zwischendurch rausgekommen ist. Zudem wurden für die Auswertung der Versuchsaufgabe nur die Reaktionszeiten von korrekten Knopfdrücken verwertet.

Um zu ermitteln, ob sich die Ergebnisse der Versuchsaufgabe, des PVT und des Befindlichkeitsfragebogens zwischen den einzelnen Durchgängen/Terminen unterscheiden, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (analysis of variance (ANOVA)) mit Messwiederholung durchgeführt. Um zusätzlich auf Gruppeneffekte bei den einzelnen Durchgängen zu untersuchen wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholungsfaktor und Gruppenfaktor durchgeführt. Bei einem signifikanten Ergebnis der ANOVA wurden die Unterschiede zwischen Durchgängen/Terminen mittels t-Test für verbundene Stichproben weiter untersucht. Für die weitere Untersuchung auf Unterschiede zwischen einzelnen Gruppen wurde der t-Test für unverbundene Stichproben verwendet.

Um auf Korrelationen zwischen Ergebnissen der Versuchsaufgabe und einzelnen Schlafphasen zu untersuchen, wurde die Korrelationsanalyse nach Pearson angewendet. Zudem wurde stellenweise auch auf partielle Korrelation getestet.

Die Ergebnisse werden als Mittelwert (MW) \pm Standardabweichung (Standard Deviation (SD)) angegeben. In den Abbildungen werden MW \pm Standardfehler (Standard Error of the Mean (SEM)) abgebildet. Eine statistische Signifikanz wurde bei $p \leq .05$ angenommen.

3. Ergebnisse

3.1. Stichprobe

An der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie nahmen 22 Kinder teil. Zur Auswertung wurden zudem Ergebnisse von sechs Probanden hinzugenommen, die 2012 von Müge Bayramoglu erhoben worden waren. Insgesamt liegen somit Ergebnisse von 28 Probanden (15 weiblich, 13 männlich) im Alter von 8 bis 11 Jahren ($MW \pm SD: 10.05 \pm 1.10$ Jahre) vor. Bei den Erhebungen 2012 war keine Baseline_(Transfer) erhoben worden, da dieser Durchgang damals noch nicht geplant gewesen war. Für diesen Durchgang liegen daher nur Ergebnisse von 22 Probanden vor. In zehn Fällen wurden nur sechs der sieben selbstständig durchzuführenden Trainingsdurchgänge gemacht, da es vorkam, dass Probanden das Training vergaßen. Deswegen liegen für das siebte Training nur Ergebnisse von 18 Probanden vor.

3.2. Ergebnisse der Versuchsaufgabe

3.2.1. Testung des impliziten Wissens der Lernsequenz

Reaktionszeiten im Verlauf

Die Reaktionszeiten der einzelnen Durchgänge, bei denen die Lernsequenz gelernt (Lernen (Tag 1, abends)), trainiert (Training 1 bis Training 7 (Tag 2 bis Tag 8, jeweils abends)) und abgefragt (Baseline_(Lernsequenz) (Tag 1, abends), Abruf 1 (Tag 2, morgens), Abruf 2 (Tag 9, morgens)) wurde, sind in **Abbildung 8** dargestellt.

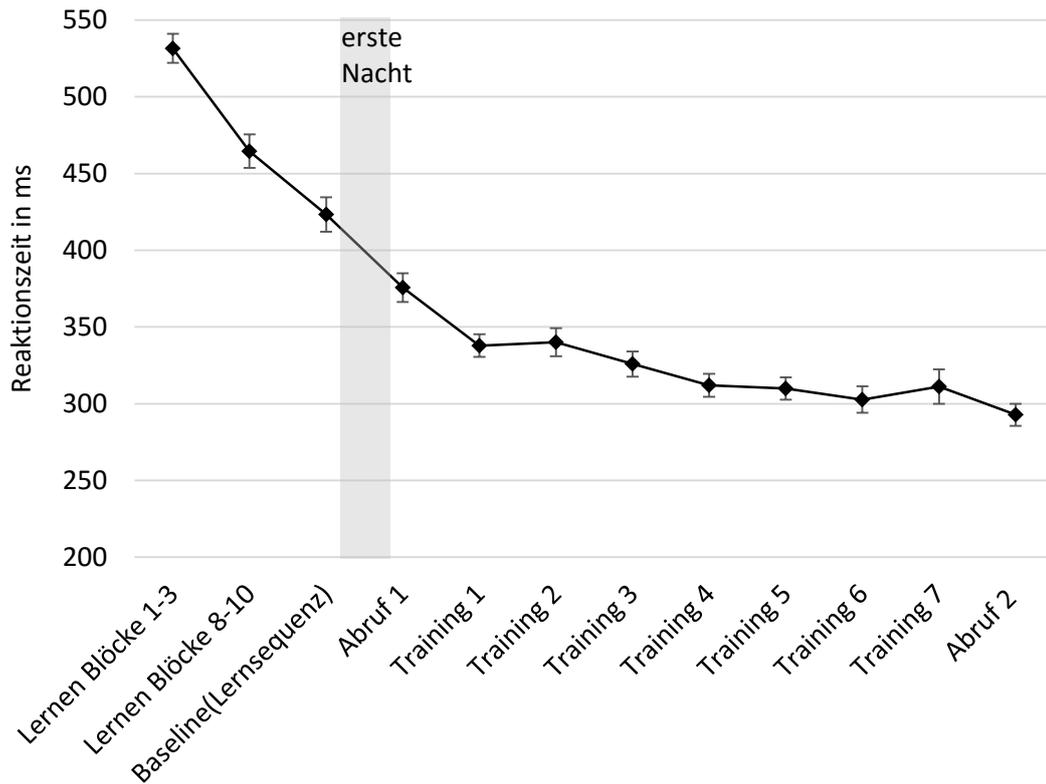


Abbildung 8: Reaktionszeiten bei Testung der Lernsequenz im Verlauf. Die Abbildung zeigt die mittleren Reaktionszeiten (Mittelwert \pm Standardfehler) der Durchgänge, bei denen die Lernsequenz getestet wurde. Es ergab sich ein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit zwischen den jeweils aufeinanderfolgenden Durchgängen Lernen Blöcke 1-3 und Lernen Blöcke 8-10, $p < .001$, Lernen Blöcke 8-10 und Baseline(Lernsequenz), $p < .001$, Baseline(Lernsequenz) und Abruf 1, $p < .001$, Abruf 1 und Training 1, $p = .001$, Training 3 und Training 4, $p = .03$, sowie Training 7 und Abruf 2, $p = .004$.

Zur Ermittlung von signifikanten Unterschieden in der Reaktionszeit zwischen den einzelnen Durchgängen der Versuchsaufgabe wurde eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Die oben genannten Durchgänge dienten dabei als Messwiederholungsfaktor. Training 7 wurde nicht in die ANOVA eingeschlossen, da für diesen Durchgang nur Ergebnisse von 18 der 28 Probanden vorlagen. Es zeigte sich, dass sich die mittleren Reaktionszeiten zwischen den Durchgängen signifikant unterscheiden, $F(5.19, 140.10) = 147.89$; $p < .001$ (korrigiert nach Greenhouse-Geisser). Deswegen wurde mittels t-Test für verbundene Stichproben untersucht, zwischen welchen Durchgängen Unterschiede in der Reaktionszeit bestehen. Die Reaktionszeiten

nahmen von Beginn bis zum Ende des Lerndurchgangs (abends) ab. Der Unterschied in der mittleren Reaktionszeit zwischen den Lern-Blöcken 1-3 und den Lern-Blöcken 8-10 war signifikant, $t(27) = 6.40$; $p < .001$.

Bei Erhebung der Baseline_(Lernsequenz) (abends) waren die Probanden im Mittel schneller als am Ende des Lerndurchgangs (abends). Zwischen den Durchgängen Lernen Blöcke 8-10 (abends) und Baseline_(Lernsequenz) (abends) ergab sich ein signifikanter Unterschied in der mittleren Reaktionszeit, $t(27) = 4.80$; $p < .001$.

Im Durchschnitt nahm die Reaktionszeit über die erste Nacht um 47.74 ± 46.54 ms (10.62 ± 11.11 %) ab. Der Unterschied in der mittleren Reaktionszeit zwischen Baseline_(Lernsequenz) (abends) und Abruf 1 (morgens) war signifikant, $t(27) = 5.43$; $p < .001$.

Des Weiteren nahm die mittlere Reaktionszeit im Laufe des ersten dem Lernen folgenden Tages, also von Abruf 1 (morgens) zu Training 1 (abends), ab. Es ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den mittleren Reaktionszeiten dieser Durchgänge, $t(27) = 4.09$; $p = .001$.

Weitere signifikante Unterschiede ergaben sich zwischen den Reaktionszeiten der jeweils aufeinander folgenden Durchgänge Training 3 und Training 4 (jeweils abends), $t(27) = 2.32$; $p = .03$, sowie Training 7 (abends) und Abruf 2 (morgens), $t(17) = 3.29$; $p = .004$.

Insgesamt nahm die Reaktionszeit im Verlauf der Trainingswoche, das heißt von Abruf 1 (morgens) zu Abruf 2 (morgens), im Durchschnitt um 82.83 ± 56.00 ms (21.06 ± 12.11 %) ab.

In Bezug auf die Reaktionszeiten ergab sich eine signifikante Korrelation zwischen der Baseline_(Lernsequenz) (abends) und Abruf 1 (morgens), $r = .65$; $p < .001$, sowie zwischen Baseline_(Lernsequenz) und Abruf 2 (morgens), $r = .47$; $p = .01$. Zwischen den Reaktionszeiten von Abruf 1 und 2 zeigte sich keine signifikante Korrelation, $p = .31$.

Zusammenhang zwischen Verbesserung über die erste Nacht und Endperformanz

Es zeigte sich eine signifikante negative Korrelation zwischen der Abnahme der Reaktionszeit von Baseline_(Lernsequenz) zu Abruf 1 und der Abnahme der Reaktionszeit von Abruf 1 zu Abruf 2, $r = -.46$; $p = .013$. Je stärker also die Verbesserung über die erste Nacht war, desto weniger stark nahm die Reaktionszeit im Verlauf der Trainingswoche ab.

Zusätzlich wurde auf partielle Korrelation mit der Kontrollvariable ‚Reaktionszeit bei Baseline_(Lernsequenz)‘ getestet. In diesem Fall ergab sich ebenfalls eine signifikante negative Korrelation zwischen der Reaktionszeitabnahme von Baseline_(Lernsequenz) zu Abruf 1 und der Reaktionszeitabnahme von Abruf 1 zu Abruf 2, $r = -.79$; $p < .001$. Die zusätzliche Testung auf partielle Korrelation mit der Kontrollvariable ‚Reaktionszeit bei Baseline_(Lernsequenz)‘ ist notwendig, da Probanden mit einer schlechteren Ausgangsperformanz mehr Raum zur Verbesserung haben als Probanden mit einer besseren Ausgangsperformanz, was sich in einer Korrelation zwischen Reaktionszeit bei Baseline_(Lernsequenz) und Reaktionszeitabnahme von Baseline_(Lernsequenz) zu Abruf 1 äußert, $r = .59$; $p = .001$.

Es ergab sich eine signifikante Korrelation zwischen der Reaktionszeit bei Abruf 2 (morgens) und der Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht, $r = -.39$; $p = .04$. Probanden, die sich über die erste Nacht in der Reaktionszeit stärker verbessert hatten, waren folglich bei Abruf 2 (morgens) eher langsam in der Durchführung der Versuchsaufgabe.

Auch an dieser Stelle musste aus oben genannten Gründen zusätzlich auf partielle Korrelation mit der Kontrollvariable ‚Reaktionszeit bei Baseline_(Lernsequenz)‘ getestet werden. Hierbei ergab sich keine Korrelation zwischen der Reaktionszeit bei Abruf 2 (morgens) und der Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht, $p = .44$.

Für weitere Analysen in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht und Endperformanz wurde ein

Mediansplit der Stichprobe durchgeführt. Als Gruppierungsvariable wurde die Abnahme über die erste Nacht gewählt. Diese entspricht der Differenz zwischen der Reaktionszeit bei der Baseline_(Lernsequenz) und der Reaktionszeit bei Abruf 1. Der Median, welcher 61.38 ms betrug, diente als Trennwert. Auf diese Weise ergab sich eine Hälfte der Stichprobe, deren Reaktionszeit über die erste Nacht stärker abnahm (> 61.38 ms; Gruppe ‚starke Verbesserung‘), und eine Hälfte, deren Reaktionszeit über die erste Nacht weniger stark abnahm oder ungefähr gleich blieb (< 61.38 ms; Gruppe ‚geringe Verbesserung‘). Die Reaktionszeiten (MW ± SEM) der beiden Gruppen sind in **Abbildung 9** dargestellt.

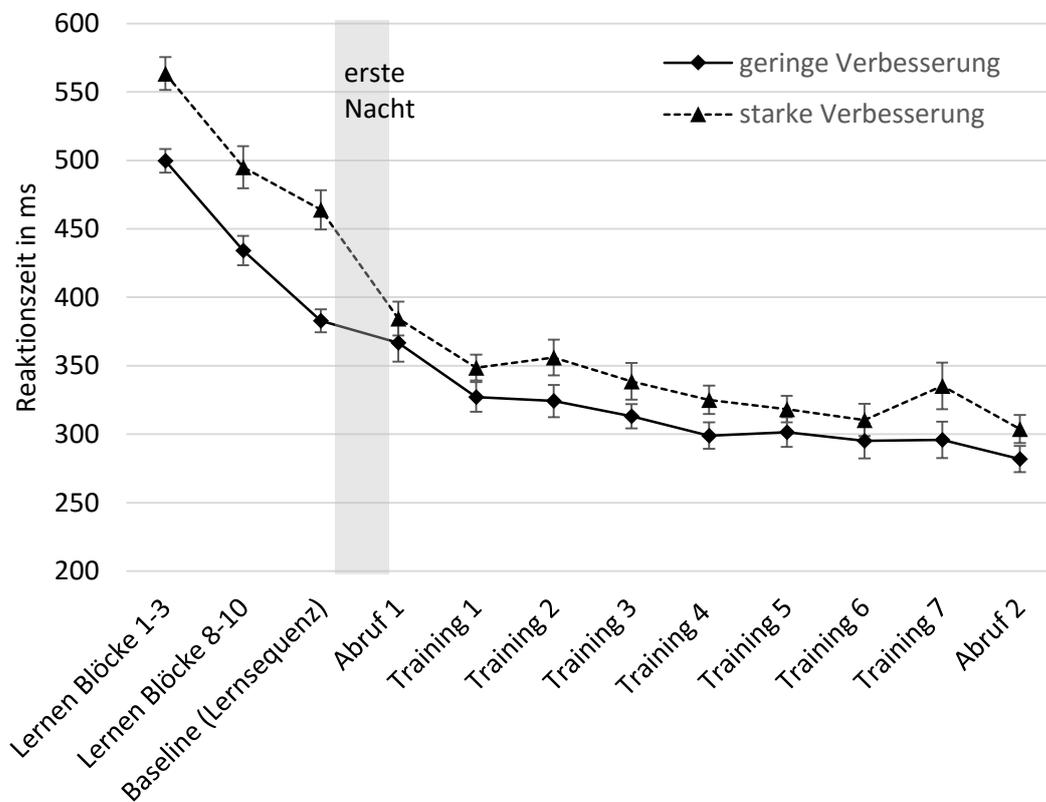


Abbildung 9: Mediansplit nach Verbesserung über die erste Nacht. Die Stichprobe wurde mittels Mediansplit nach der Abnahme der Reaktionszeit über die erste Nacht in zwei Hälften aufgeteilt: Die eine Hälfte der Probanden verbesserte sich um > 61.38 ms (‚starke Verbesserung‘), die andere Hälfte um < 61.38 ms (‚geringe Verbesserung‘). Die beiden Gruppen unterscheiden sich signifikant in der Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht (von Baseline_(Lernsequenz) zu Abruf 1), $p < .001$, jedoch nicht in der Reaktionszeitabnahme über die Trainingswoche (von Abruf 1 zu Abruf 2). Zwischen den beiden Gruppen ergab sich ein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit für die Durchgänge vor der ersten Nacht (Lernen Blöcke 1-3, $p < .001$, Lernen Blöcke 8-10, $p = .003$ und Baseline_(Lernsequenz), $p < .001$).

Die beiden Gruppen unterscheiden sich signifikant in der Reaktionszeit-Abnahme von Baseline_(Lernsequenz) (abends) zu Abruf 1 (morgens) (Gruppe ‚geringe Verbesserung‘: Abnahme um 16.03 ± 46.14 ms (4.09 ± 12.60 %); Gruppe ‚starke Verbesserung‘: Abnahme um 79.45 ± 14.26 ms (17.15 ± 2.45 %)), $t(26) = 4.91$; $p < .001$. Dagegen ist der Unterschied in der Abnahme über die Trainingswoche (von Abruf 1 zu Abruf 2 (jeweils morgens)) zwischen diesen beiden Gruppen nicht signifikant (Gruppe ‚geringe Verbesserung‘: Abnahme um 84.88 ± 68.16 ms (21.61 ± 14.42 %); Gruppe ‚starke Verbesserung‘: Abnahme um 80.77 ± 43.11 ms (20.50 ± 9.81 %)), $p = .85$.

Es wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit einem Messwiederholungsfaktor (Durchgänge der Versuchsaufgabe) und einem Gruppierungsfaktor (‚geringe Verbesserung‘/‚starke Verbesserung‘) durchgeführt. Diese wies bezüglich des Messwiederholungsfaktors (Durchgänge der Versuchsaufgabe) einen signifikanten Unterschied auf, $F(5.15, 133.95) = 161.87$ (Greenhouse-Geisser korrigiert); $p < .001$. Auch bezüglich des Gruppenfaktors (‚starke Verbesserung‘/‚geringe Verbesserung‘) zeigten sich signifikante Unterschiede, $F(1, 26) = 9.31$; $p = .005$.

Vor der ersten Nacht war die Gruppe ‚geringe Verbesserung‘ signifikant schneller in der Durchführung der Lernsequenz als die Gruppe ‚starke Verbesserung‘. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Reaktionszeiten der beiden Gruppen ergab sich für die Durchgänge Lernen Blöcke 1-3 (abends), $t(26) = 4.31$; $p < .001$, Lernen Blöcke 8-10 (abends), $t(26) = 3.26$; $p = .003$, und Baseline_(Lernsequenz) (abends), $t(26) = 4.88$; $p < .001$.

In allen Durchgängen, die nach der ersten Nacht durchgeführt wurden (Abruf 1, Training 1-7, Abruf 2), zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit zwischen den beiden Gruppen, alle $p \geq .07$.

3.2.2. Testung des expliziten Wissens der Lernsequenz

Bei Testung des expliziten Wissens der Lernsequenz wurden von insgesamt 8 Übergängen im Mittel 6.07 ± 2.34 richtige Übergänge genannt. 15 von 28 Kindern konnten die Sequenz vollständig richtig wiedergeben, was 53.6 % der

Probanden entspricht. Die Häufigkeiten der Anzahlen richtig genannter Übergänge werden in **Tabelle 2** dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse des expliziten Wissenstests.

Anzahl richtig genannter Übergänge (von 8)	Häufigkeit (von 28)	Anteil an Probanden in %
0	0	0
1	1	3.6
2	2	7.1
3	1	3.6
4	5	17.9
5	2	7.1
6	2	7.1
7	0	0
8	15	53.6

Bei Abfrage des expliziten Wissens der Lernsequenz konnten die Probanden maximal 8 richtige Übergänge nennen. Die linke Spalte stellt die möglichen Anzahlen richtig genannter Übergänge dar. In der mittleren Spalte wird gezeigt, wie viele Probanden die entsprechende Anzahl richtiger Übergänge genannt haben. In der rechten Spalte wird dargestellt, welchem Anteil am gesamten Probandenkollektiv das jeweils entspricht.

Es ergab sich keine Korrelation zwischen dem expliziten Wissen der Lernsequenz und der Performanz der Lernsequenz an der Button-Box bei Abruf 1 und Abruf 2, alle $p \geq .32$. Des Weiteren konnte kein Zusammenhang zwischen der Abnahme in der Reaktionszeit über die erste Nacht und expliziter Wissensleistung festgestellt werden, $p = .72$.

3.2.3. Ergebnisse der Transfer-Durchgänge

Abbildung 10 zeigt die mittleren Reaktionszeiten der Transfer-Durchgänge (Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘, Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘, Transfer ‚Lernsequenz‘, und Transfer ‚Spiegelung‘) sowie der Baseline_(Transfer).

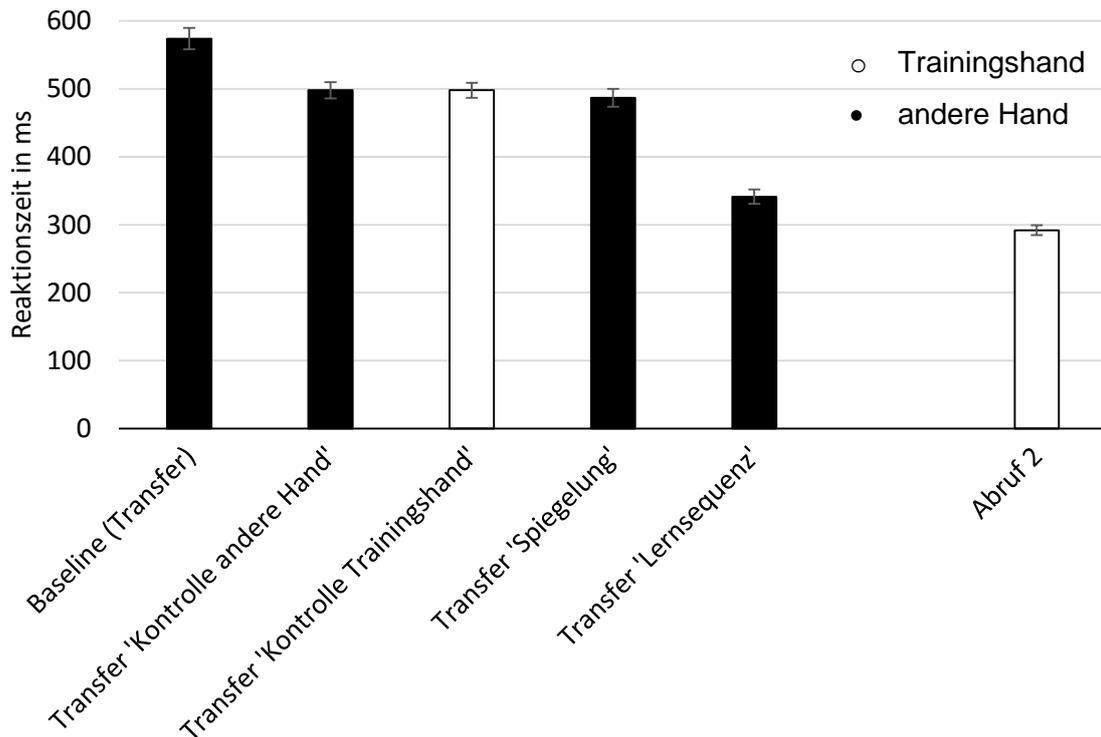


Abbildung 10: Reaktionszeiten der Transfer-Durchgänge. Die Abbildung zeigt die Reaktionszeiten (Mittelwert \pm Standardfehler) der Transfer-Durchgänge sowie der $Baseline_{(Transfer)}$. Zum Vergleich wird außerdem die mittlere Reaktionszeit von Abruf 2 der Lernsequenz nochmals dargestellt. Die weißen Balken stellen die Durchgänge dar, die mit der Trainingshand durchgeführt wurden. Die schwarzen Balken stellen die Durchgänge dar, die mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchgeführt wurden. Abruf 2 unterscheidet sich in der Reaktionszeit signifikant von allen Transfer-Durchgängen und der $Baseline_{(Transfer)}$, alle $p < .001$. Es ergab sich ein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit zwischen der $Baseline_{(Transfer)}$ und den vier Transfer-Durchgängen, alle $p < .001$. Der Transfer ‚Lernsequenz‘ unterscheidet sich signifikant von den anderen drei Transfer-Durchgängen, alle $p < .001$.

Zur Untersuchung auf Unterschiede in der Reaktionszeit zwischen den Transfer-Durchgängen sowie Abruf 2 wurde eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Diese ergab einen signifikanten Effekt für den Messwiederholungsfaktor (Durchgänge), $F(4, 108) = 197.71$; $p < .001$.

Die Probanden waren bei den Transfer-Durchgängen im Mittel deutlich langsamer als bei Testung der trainierten Lernsequenz in Abruf 2. Bei Abruf 2 ist die mittlere Reaktionszeit signifikant kleiner als bei Durchführung von $Baseline_{(Transfer)}$, $t(21) = 16.78$; $p < .001$, Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘, $t(27)$

= 21.48; $p < .001$, Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘, $t(27) = 22.52$; $p < .001$, Transfer ‚Lernsequenz‘, $t(27) = 5.27$; $p < .001$, und Transfer ‚Spiegelung‘, $t(27) = 19.51$; $p < .001$.

Die Probanden waren bei den Transfer-Durchgängen im Mittel schneller als bei der Baseline_(Transfer). Die mittlere Reaktionszeit bei Durchführung der Baseline_(Transfer) ist signifikant größer als die bei der Durchführung von Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘, $t(21) = 4.87$; $p < .001$, Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘, $t(21) = 4.92$; $p < .001$, Transfer ‚Lernsequenz‘, $t(21) = 17.41$; $p < .001$, und Transfer ‚Spiegelung‘, $t(21) = 5.21$; $p < .001$.

Beim Transfer ‚Lernsequenz‘ waren die Probanden im Mittel deutlich schneller als in den anderen drei Transfer-Durchgängen, in welchen den Probanden bis dahin unbekannte Sequenzen dargeboten wurden. Es ergab sich ein signifikanter Unterschied in der Reaktionszeit zwischen dem Transfer ‚Lernsequenz‘ und dem Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘, $t(27) = 13.17$; $p < .001$, zwischen dem Transfer ‚Lernsequenz‘ und dem Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘, $t(27) = 15.48$; $p < .001$, sowie zwischen dem Transfer ‚Lernsequenz‘ und dem Transfer ‚Spiegelung‘, $t(27) = 14.16$; $p < .001$.

Weitere signifikante Unterschiede zwischen den Transfer-Durchgängen ergaben sich nicht, alle $p > .20$.

3.3. Schlafdaten

Anhand der polysomnographischen Daten wurden die Gesamtschlafdauer, die Einschlaf Latenz, die SWS-Latenz und die REM-Schlaf-Latenz ermittelt.

Die Gesamtschlafdauer betrug im Mittel 570.50 ± 43.94 Minuten, die Einschlaf Latenz 19.96 ± 16.77 Minuten, die SWS-Latenz 4.96 ± 2.56 Minuten und die REM-Latenz 109.96 ± 36.14 Minuten (MW \pm SD).

Außerdem wurde der Anteil der Schlafstadien in Minuten und in Relation zur Gesamtschlafdauer ermittelt. Die durchschnittlichen Werte werden in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3: Schlafdaten.

Schlafstadium	Zeit in Minuten	relativer Anteil an der Gesamtschlafdauer in %
Wach	11.05 (± 19.11)	1.86 (± 3.23)
S1	26.02 (± 11.66)	4.50 (± 1.86)
S2	145.75 (± 45.01)	25.51 (± 7.70)
S3	134.80 (± 36.01)	25.20 (± 5.75)
S4	116.00 (± 25.78)	20.52 (± 5.33)
SWS (gesamt)	259.80 (± 49.06)	45.72 (± 8.96)
REM	121.79 (± 20.01)	21.35 (± 3.11)
MT	6.09 (± 3.69)	1.06 (± .64)

Die Tabelle stellt die Anteile der Schlafstadien S1, S2, S3, S4 und REM-Schlaf sowie den Anteil an Slow Wave Sleep (SWS) insgesamt in Minuten und in Relation zur Gesamtschlafdauer dar. Außerdem ist der Anteil dargestellt, bei dem kein bestimmtes Schlafstadium, sondern Movement Time (MT) gescort wurde. Angegeben wird jeweils der Mittelwert ± Standardabweichung.

3.4. Zusammenhang zwischen Schlaf und Gedächtnisleistung

3.4.1. Zusammenhang zwischen Schlaf und implizitem Wissen

Es ergab sich keine Korrelation zwischen der Gesamtschlafdauer oder dem relativen bzw. absoluten Anteil einer Schlafphase an der Gesamtschlafdauer und der Verbesserung in der Reaktionszeit über die erste Nacht, alle $p > .12$. Zwischen der Gesamtschlafdauer oder dem relativen bzw. absoluten Anteil einer Schlafphase an der Gesamtschlafdauer und der Reaktionszeitabnahme über die Trainingswoche ergab sich ebenfalls keine Korrelation, alle $p > .41$.

3.4.2. Zusammenhang zwischen Schlaf und explizitem Wissen

Zwischen dem expliziten Wissen der Lernsequenz und der Gesamtschlafdauer oder dem relativen bzw. absoluten Anteil einer Schlafphase an der Gesamtschlafdauer ergab sich keine Korrelation, alle $p > .17$.

3.5. Kontrollvariablen

Vor den Durchgängen Baseline_(Transfer), Lernen, Abruf 1 und Abruf 2 wurde jeweils der Fragebogen zur Befindlichkeit ausgefüllt und der PVT durchgeführt. Da jedoch nur bei 22 der 28 Probanden der Erhebungstermin für die Baseline_(Transfer) stattgefunden hat (siehe 3.1. *Stichprobe*), wurden die PVT-Ergebnisse sowie die Ergebnisse des Befindlichkeitsfragebogens von diesem Termin nicht in die jeweilige ANOVA eingeschlossen.

3.5.1. Befindlichkeitsfragebogen

Den Antwortmöglichkeiten des Fragebogens zur Befindlichkeit wurden Werte von 1 bis 3 zugeordnet (jeweils von „gar nicht gut [gelaunt]“ bis „sehr gut [gelaunt]“, „sehr müde“ bis „gar nicht müde“ und „gar keine Lust“ bis „große Lust“ aufsteigend; siehe 2.3.2. *Kontrollvariablen*).

Die durchschnittlichen Bewertungen von Stimmung, Müdigkeit und Motivation der Probanden bei den Terminen von Baseline_(Transfer), Lernen, Abruf 1 und Abruf 2 werden in **Tabelle 4** dargestellt.

Um auf Unterschiede in der Bewertung von Stimmung, Müdigkeit und Motivation zwischen den Terminen von Lernen, Abruf 1 und Abruf 2 zu testen, wurde für jeden der drei Parameter eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Als Messwiederholungsfaktor dienten die Termine von Lernen, Abruf 1 und Abruf 2, bei denen der Fragebogen jeweils ausgefüllt worden war. Zwischen den drei Terminen zeigte sich kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Bewertung von Stimmung und Motivation, alle $p \geq .38$. Es ergab sich jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Terminen in Bezug auf die Bewertung der Müdigkeit, $F(2, 50) = 11.34$; $p < .001$. Die Bewertung der Müdigkeit unterscheidet sich beim Termin Lernen signifikant von der bei den Terminen von Baseline_(Transfer), $t(21) = 2.88$; $p = .009$, Abruf 1, $t(26) = 4.12$; $p < .001$, und Abruf 2, $t(25) = 3.61$; $p = .001$. Die Probanden fühlten sich beim Termin Lernen, der abends stattfand, also müder als bei den anderen Terminen, die jeweils morgens stattfanden.

Zwischen den morgendlichen Terminen von $Baseline_{(Transfer)}$, Abruf 1 und Abruf 2 zeigte sich dagegen kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Müdigkeit, $p \geq .54$.

Tabelle 4: Befindlichkeit.

	Stimmung	Müdigkeit	Motivation
Baseline_(Transfer)	2.91 (\pm .29)	2.59 (\pm .50)	2.95 (\pm .21)
Lernen	2.85 (\pm .36)	2.15 (\pm .60)	2.89 (\pm .32)
Abruf 1	2.89 (\pm .31)	2.75 (\pm .52)	2.93 (\pm .26)
Abruf 2	2.85 (\pm .36)	2.70 (\pm .54)	2.81 (\pm .40)

Den Antwortmöglichkeiten des Fragebogens wurden Werte von 1 bis 3 zugeordnet. Die Tabelle stellt Mittelwert \pm Standardabweichung der Antworten bei den Terminen von $Baseline_{(Transfer)}$, Lernen, Abruf 1 und Abruf 2 dar.

3.5.2. PVT

Mittels einfaktorieller ANOVA mit Messwiederholung wurde auf signifikante Unterschiede zwischen den PVT-Ergebnissen der Termine von Lernen, Abruf 1 und Abruf 2 untersucht. Die Reaktionszeiten des PVT ergaben jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen diesen Terminen. Die Mittelwerte der Reaktionszeiten sind in **Tabelle 5** abgebildet.

Tabelle 5: PVT-Ergebnisse.

	Reaktionszeit in ms
Baseline_(Transfer)	365.53 (\pm 36.20)
Lernen	391.43 (\pm 57,67)
Abruf 1	366.35 (\pm 48.64)
Abruf 2	373.73 (\pm 83.81)

Die Tabelle stellt die Reaktionszeiten (Mittelwert \pm Standardabweichung) bei Durchführung des PVT dar. Dieser wurde jeweils vor den Durchgängen $Baseline_{(Transfer)}$, Lernen, Abruf 1 und Abruf 2 durchgeführt.

4. Diskussion

4.1. Entwicklung des impliziten Wissens im Verlauf

Bei den Probanden fand im Laufe des Versuchs eine Zunahme des impliziten Wissens statt. Das zeigt sich anhand der im Verlauf abnehmenden Reaktionszeiten bei Durchführung der Lernsequenz an der Button-Box. Dies entspricht den Ergebnissen zahlreicher Studien, die belegen, dass die Fähigkeit zu prozeduralem Lernen bei Kindern in diesem Alter gut ausgeprägt ist (Meulemans et al. 1998; Janacsek et al. 2012).

Es wird angenommen, dass das Erlernen einer prozeduralen Fertigkeit in zwei Stufen stattfindet (Karni 1996; Karni et al. 1998; Doyon et al. 2003): Einer frühen Phase, in der während den ersten Trainingseinheiten starke Fortschritte zu beobachten sind, und einer nachfolgenden Phase, in der etwas langsamer und nur über mehrere Trainingseinheiten hinweg eine weitere Verbesserung erzielt wird. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie entsprechen dieser Annahme. Während des Lernens sowie über die erste Nacht und den ersten Tag nahm die mittlere Reaktionszeit rapide ab. Im Verlauf der Trainingswoche nahm die Reaktionszeit weiterhin ab, jedoch weniger stark.

Am Ende der Trainingswoche wurden neben der Lernsequenz noch einige Transfer-Durchgänge getestet. Unter anderem wurde sowohl mit der Hand, die zum Training der Lernsequenz genutzt worden war, als auch mit der kontralateralen Hand jeweils eine völlig unbekannte Sequenz getestet (Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘ und Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘). Dies diente zur Überprüfung, ob das Training tatsächlich zu einer Verbesserung speziell in der Durchführung der Lernsequenz geführt hat oder zu einer generellen Verbesserung in der Button-Box-Aufgabe unabhängig von der Sequenz. Da die Probanden bei Abfrage 2 der Lernsequenz signifikant schneller waren als bei den Kontroll-Transfers, kann davon ausgegangen werden, dass das Training tatsächlich überwiegend zu einer Verbesserung in der trainierten Lernsequenz und nicht zu einer generellen Verbesserung in der Button-Box-Aufgabe geführt hat.

4.2. Langfristiger Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis

Wir stellten die Vermutung auf, dass Probanden, die sich über die erste Nacht weniger stark in der Versuchsaufgabe verbessern, nach dem einwöchigen Training eine bessere Endperformanz bieten (**Hypothese 1**). Tatsächlich ergaben die Studienergebnisse eine signifikante Korrelation zwischen der Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht und der Reaktionszeit bei Abruf 2. Probanden, die sich über die erste Nacht nicht oder nur gering verbessert hatten, waren also am Ende der Trainingswoche schneller als Probanden, die sich über die erste Nacht stark verbessert hatten. Allerdings stellte sich auch heraus, dass die Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht signifikant mit der Reaktionszeit bei der Baseline_(Lernsequenz) korreliert. Probanden, die bei der Baseline_(Lernsequenz) langsamer waren, verbesserten sich über die erste Nacht stärker als Probanden, die bei der Baseline_(Lernsequenz) bereits recht schnell waren. Dies liegt sehr wahrscheinlich daran, dass Probanden mit einer schlechteren Ausgangsperformanz mehr Raum zur Verbesserung haben als diejenigen, die von Anfang an sehr schnell sind. Außerdem waren die Kinder mit einer schlechteren Ausgangsperformanz auch am Ende der Trainingswoche langsamer als Kinder mit einer besseren Ausgangsperformanz. Zwischen den Reaktionszeiten von Baseline_(Lernsequenz) und Abruf 2 zeigte sich eine signifikante Korrelation. Aufgrund dieses Zusammenhangs wurde zusätzlich auf partielle Korrelation zwischen Reaktionszeitabnahme über die erste Nacht und Reaktionszeit bei Abruf 2 getestet, wobei die Reaktionszeit bei Baseline_(Lernsequenz) als Kontrollvariable diente. In diesem Fall ergab sich keine signifikante Korrelation zwischen der Verbesserung über die erste Nacht und der Endperformanz. Deswegen kann nicht davon ausgegangen werden, dass das Ausmaß der Verbesserung über die erste Nacht in direktem Zusammenhang mit der Endperformanz steht.

Dementsprechend stellte sich auch heraus, dass die Kinder unabhängig von ihrer Ausgangsperformanz bereits nach der ersten Nacht ein ähnliches Leistungsniveau in der Versuchsaufgabe erreichten. Dies zeigte sich anhand der Vergleiche der beiden Gruppen ‚starke Verbesserung‘ und ‚geringe Verbesserung‘. In diese Gruppen wurden die Probanden mittels Mediansplit

nach ihrer Verbesserung über die erste Nacht eingeteilt. In den Durchgängen vor der ersten Nacht war die Gruppe ‚geringe Verbesserung‘ signifikant schneller in der Versuchsaufgabe als die Gruppe ‚starke Verbesserung‘. Bei allen Testungen, die nach der ersten Nacht durchgeführt wurden, ergab sich jedoch kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den Reaktionszeiten der beiden Gruppen.

Während bei jungen Zebrafinken eine Verschlechterung über die ersten Nächte eindeutig mit einer besseren Endperformanz verbunden ist, scheint dies bei Kindern nicht der Fall zu sein. Die Ergebnisse dieser Studie belegen nicht, dass Schlaf bei Kindern in Verbindung mit Training langfristig einen positiven Einfluss auf das Erlernen einer prozeduralen Fertigkeit hat, sondern sprechen entgegengesetzt unserer Annahme eher dafür, dass die Endperformanz unabhängig vom Ausmaß der Verbesserung über die erste Nacht ist.

Hypothese 1 ist somit nicht bestätigt.

Dass sich die vermutete Parallele zur Gedächtniskonsolidierung bei juvenilen Zebrafinken in den vorliegenden Ergebnissen nicht zeigen ließ, könnte an der Art der Versuchsaufgabe gelegen haben.

Auffallend ist, dass sich die Probanden der vorliegenden Studie über Nacht in der Versuchsaufgabe verbesserten, während bei juvenilen Zebrafinken zu Beginn der Lernphase eine Verschlechterung über Nacht beobachtet wurde. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie beobachteten Fischer und Kollegen in einer Studie (2007), in der Kinder einen *SRTT* durchführten, dass Schlaf bei Kindern - ähnlich wie bei juvenilen Zebrafinken - zu einer deutlichen Verschlechterung in der Performanz einer prozeduralen Aufgabe führen kann. Es gibt einige mögliche Erklärungen dafür, weshalb dies in der vorliegenden Studie nicht der Fall war. Zum einen ist die Versuchsaufgabe der vorliegenden Studie mit der Button-Box deutlich einfacher als die Versuchsaufgabe, die Fischer und Kollegen durchführen ließen. Dass die Kinder bereits nach wenigen Tagen ein asymptotisches Leistungsniveau erreicht haben, spricht dafür, dass die Aufgabe recht schnell und leicht erlernbar war. Dies könnte dazu beigetragen haben, dass sich in der

vorliegenden Studie eher Verbesserungen über die erste Nacht zeigten als in der Studie von Fischer und Kollegen. Zum anderen könnten die unterschiedlichen Studienergebnisse daran liegen, dass die hier angewandte Button-Box-Aufgabe eine stärkere explizite Komponente beinhaltet. (Bei den meisten Arten von motorischen Versuchsaufgaben ist nicht nur implizites Lernen, sondern auch explizites Lernen involviert; die Anteile der beiden Systeme am Lernprozess sind jedoch von Aufgabe zu Aufgabe unterschiedlich groß (vgl. Born und Wagner 2004).) In der Versuchsaufgabe, die Fischer und Kollegen gewählt hatten, war die explizite Komponente im Vergleich zur hier verwendeten Versuchsaufgabe wahrscheinlich durch die abwechselnde Testung von grammatikalischen und nicht-grammatikalischen Sequenzen deutlich geringer ausgeprägt. Vermutlich haben in der vorliegenden Studie einige Kinder bereits in den Durchgängen Lernen oder Baseline_(Lernsequenz) erkannt, dass der Reihenfolge der aufleuchtenden Knöpfe immer eine bestimmte Sequenz zugrunde liegt, obwohl dies in der Aufgabenstellung nicht gesagt worden war. Somit wurde die Sequenz von einigen Kindern eventuell bereits vor dem Schlafen nicht ausschließlich implizit, sondern auch explizit enkodiert. Dies könnte den Konsolidierungsprozess während des Schlafs beeinflusst haben. Da am ersten Morgen nach dem Lernen auch ein expliziter Wissenstest durchgeführt worden war, wussten außerdem alle Probanden während des Trainings 1-7, dass der Versuchsaufgabe eine sich wiederholende Sequenz zugrunde lag. Dies verstärkte den expliziten Anteil am Lernprozess und hatte vermutlich auch Auswirkungen auf die Konsolidierung im Verlauf der Trainingswoche.

Bei weiteren Studien zum langfristigen Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern wäre in Erwägung zu ziehen, eine Versuchsaufgabe zu wählen, die etwas schwieriger ist und eine weniger starke explizite Komponente enthält. Vielleicht würde sich dann eine Verschlechterung über die erste Nacht zeigen, die wie bei juvenilen Zebrafinken mit einem langfristigen positiven Effekt von Schlaf einhergeht.

4.3. Zusammenhang zwischen Schlaf und prozeduraler Gedächtniskonsolidierung über die erste Nacht

Über die erste Nacht war eine signifikante Abnahme in der Reaktionszeit zu beobachten. Rückschlüsse darüber, ob die beobachtete Reaktionszeitabnahme (in positiver oder negativer Weise) durch Schlaf beeinflusst worden ist, können anhand der vorliegenden Ergebnisse jedoch nicht gezogen werden, da keine Wachgruppe zum Vergleich getestet wurde.

Es wurden bereits Studien bezüglich des Einflusses von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern durchgeführt, in denen zusätzlich zur Schlafbedingung auch eine Wachbedingung getestet wurde (Wilhelm et al. 2008; Fischer et al. 2007). Hierbei zeigte sich im Vergleich zur Wachbedingung kein oder lediglich ein geringerer positiver Einfluss des Schlafs auf die Konsolidierung prozeduraler Fertigkeiten.

In **Hypothese 2** stellten wir die Vermutung auf, dass sich ähnlich wie bei Erwachsenen auch bei Kindern ein Zusammenhang zwischen prozeduraler Gedächtniskonsolidierung und REM-Schlaf zeigt. Allerdings ergaben die Ergebnisse dieser Studie keine Korrelationen zwischen einzelnen Schlafphasen und der Verbesserung in der prozeduralen Leistung. **Hypothese 2** konnte also nicht bestätigt werden. Die Studienergebnisse geben somit leider keinen Anhalt dafür, ob bestimmte Schlafphasen bei Kindern ausschlaggebend zur Konsolidierung prozeduraler Gedächtnisinhalte beitragen.

4.4. Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung

Während bei Kindern ein positiver Effekt von Schlaf auf das deklarative Gedächtnis bereits mehrfach belegt werden konnte, ist es bisher nicht gelungen, einen positiven Effekt von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis zu belegen (Wilhelm et al. 2008; Prehn-Kristensen et al. 2011; Fischer et al. 2007). Als mögliche Ursache hierfür wird die Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung diskutiert.

Sowohl das explizite als auch das implizite Gedächtnis können in das Lernen einer motorischen Gedächtnisaufgabe involviert sein (Born und Wagner 2004).

Es wird spekuliert, dass bei Kindern beim Lernen einer motorischen Aufgabe eine kompetitive Interaktion von impliziten und expliziten Konsolidierungsprozessen während des Schlafs stattfindet. Dabei profitiert vermutlich der explizite Anteil stärker vom Schlaf als der implizite Anteil (Fischer et al. 2007). Dies könnte dadurch bedingt sein, dass der Schlaf von Kindern im Vergleich zu dem von Erwachsenen durch einen deutlich höheren Anteil an SWS gekennzeichnet ist (Ohayon et al. 2004). Dieser spielt bekanntlich eine bedeutende Rolle für die Hippocampus-abhängige Konsolidierung deklarativer Gedächtnisinhalte (Rasch et al. 2007; Marshall et al. 2006; Marshall und Born 2007).

Um die Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung während des Schlafs bei Kindern weiter zu untersuchen, wurde in der vorliegenden Studie wie in der Studie von Wilhelm und Kollegen (2013) nicht nur das implizite Wissen der Button-Box-Aufgabe getestet, sondern zudem nach der ersten Nacht, die dem Lernen folgte, eine explizite Wissensabfrage über die Sequenz durchgeführt. Die Hälfte der Probanden konnte die am Vorabend implizit an der Button-Box gelernte Sequenz (8 Übergänge) komplett richtig wiedergeben. Im Mittel wurden 6.07 ± 2.34 (MW \pm SD) richtige Übergänge genannt. Nach dem Schlaf verfügte der Großteil der Kinder also über ein explizites Wissen der Sequenz. Somit ist die **Hypothese 3a)** bestätigt. Da keine Vergleichsgruppe getestet wurde, erlauben die Ergebnisse dieser Studie keine sichere Aussage darüber, ob die Bildung von explizitem Wissen über die implizit gelernte Sequenz tatsächlich maßgeblich durch Schlaf bewirkt wurde. Dennoch stehen die Ergebnisse in Einklang mit den Ergebnissen der oben erwähnten Studie von Wilhelm und Kollegen (2013) und stützen somit die Vermutung, dass Schlaf das Erlangen expliziten Wissens über implizit Gelerntes fördert. In der Studie von Wilhelm und Kollegen wurde ebenfalls eine Sequenz aus 8 Elementen an der Button-Box implizit gelernt und am nächsten Morgen explizit abgefragt. Die Ergebnisse dieser Studie sprechen für den Einfluss von Schlaf auf die Bildung des expliziten Wissen: Probanden der Schlafgruppe konnten im Mittel $7.63 \pm .26$ (MW \pm SE) richtige Übergänge wiedergeben, Probanden der Wachgruppe im Mittel $4.00 \pm .54$ (MW \pm SE); der

Unterschied war signifikant. Zudem wurde in der Studie von Wilhelm und Kollegen bei einer Vergleichsgruppe von Kindern direkt nach dem Training eine explizite Wissensabfrage durchgeführt. Diese Gruppe war mit durchschnittlich $4.36 \pm .71$ (MW \pm SE) richtigen Übergängen deutlich schlechter in der expliziten Wiedergabe der Sequenz als die Schlafgruppe (Wilhelm et al. 2013). Diese Ergebnisse belegen recht eindeutig, dass Schlaf bei Kindern tatsächlich maßgeblich daran beteiligt ist, dass explizites Wissen über die implizit gelernte Sequenz erlangt werden kann.

Im Vergleich zu anderen Studien, die einen Zusammenhang zwischen SWS und dem Erlangen expliziten Wissens über eine implizit gelernte Sequenz feststellten (Yordanova et al. 2008), ergab sich in der vorliegenden Studie keine Korrelation zwischen expliziter Wissensleistung und einer bestimmten Schlafphase. **Hypothese 3c)** konnte somit nicht bestätigt werden. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass eventuell einige Kinder bereits beim Lernen oder bei Durchführung der Baseline_(Lernsequenz) gemerkt haben, dass der Versuchsaufgabe eine sich wiederholende Sequenz zugrunde liegt. Somit wurde teilweise schon vor dem Schlafen explizites Wissen über die Sequenz gewonnen.

In der vorliegenden Studie zeigte sich auch keine (positive oder negative) Korrelation zwischen der Anzahl richtig genannter Übergänge (Maß für explizites Wissen) und den Reaktionszeiten (Maß für implizites Wissen). Somit konnte **Hypothese 3b)**, die besagt, dass eine bessere explizite Wiedergabe der Sequenz mit einer schlechteren impliziten Performanz einhergeht, nicht belegt werden. Ergebnisse einer Studie, die Wagner und Kollegen mit Erwachsenen durchführten (2004), deuten aber darauf hin, dass die Bildung expliziten Wissens während des Schlafs mit einer verminderten Zunahme der impliziten Leistung einhergeht. Es wäre interessant, weitergehend zu untersuchen, ob sich dies bei Kindern ähnlich verhält.

Dass in dieser Studie keine Korrelationen zwischen den Ergebnissen des expliziten Wissenstests und den Reaktionszeiten bzw. einzelnen Schlafphasen festgestellt werden konnte, könnte an der Verteilung der Werte der Ergebnisse des expliziten Wissenstests liegen. Über die Hälfte der Werte liegt bei 8. Dies

führt zu einer äußerst ungleichmäßigen Verteilung, was für die Korrelationsanalyse problematisch ist. Die ungleichmäßige Verteilung ist möglicherweise durch einen Ceiling-Effekt bedingt. Eventuell wäre die Testung einer längeren Sequenz, die schwieriger zu merken ist, für eine Korrelationsanalyse vorteilhafter gewesen.

Es wäre interessant, in weiterführenden Studien noch genauer zu untersuchen, ob bei Kindern tatsächlich im Schlaf eine kompetitive Interaktion zwischen impliziter und expliziter Gedächtnisbildung zu Gunsten der expliziten Gedächtnisbildung stattfindet, und ob diese Interaktion durch den bei Kindern hohen Anteil an SWS bedingt ist, der die Hippocampus-abhängige deklarative Konsolidierung fördert.

4.5. *Movement-directed* und *goal-directed learning*

Bei Erwachsenen wurde gefunden, dass sich Schlaf positiv auf das *goal-directed learning* auswirkt (Cohen et al. 2005). Hingegen scheint Schlaf keinen positiven Effekt auf das *movement-directed learning* zu haben (Cohen et al. 2005). Ein Ziel der vorliegenden Studie war unter anderem, herauszufinden, wie sich Schlaf bei Kindern auf das *goal-directed learning* und das *movement-directed learning* auswirkt. Nachdem eine Woche lang eine Lernsequenz mit einer Hand geübt worden war, wurden deswegen am Ende der Woche verschiedene Transfer-Testungen mit der kontralateralen (nicht-trainierten) Hand durchgeführt.

Beim Transfer ‚Lernsequenz‘ wurde die mit der Trainingshand trainierte Lernsequenz mit der nicht-trainierten kontralateralen Hand getestet. So konnte überprüft werden, ob es zu *goal-directed learning* (bzw. extrinsischer Transformation) gekommen ist.

Beim Transfer ‚Spiegelung‘ wurde die Spiegelung der mit der Trainingshand trainierten Lernsequenz mit der nicht-trainierten kontralateralen Hand getestet, um herauszufinden, ob *movement-directed learning* (bzw. intrinsische Transformation) stattgefunden hat.

Außerdem wurde sowohl mit der Trainingshand als auch mit der nicht-trainierten kontralateralen Hand ein Kontroll-Transfer durchgeführt (Transfer ‚Kontrolle Trainingshand‘ und Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘). Hierbei wurde jeweils eine völlig unbekannte Sequenz getestet.

In der vorliegenden Studie unterschied sich die mittlere Reaktionszeit des Transfers ‚Spiegelung‘ nicht signifikant von den mittleren Reaktionszeiten der beiden Kontroll-Transfers. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass kein *movement-directed learning* (bzw. kein intrinsischer Transfer) stattgefunden hat. Im Gegensatz dazu waren die Kinder beim Transfer ‚Lernsequenz‘ deutlich schneller als bei den Kontroll-Transfers und dem Transfer ‚Spiegelung‘. Die Kinder konnten mit der nicht-trainierten kontralateralen Hand also die trainierte Lernsequenz deutlich schneller drücken als die Spiegelung der Lernsequenz und die unbekannte Kontroll-Sequenz (Transfer ‚Kontrolle andere Hand‘). Daher kann angenommen werden, dass im Laufe der Woche bei den Kindern *goal-directed learning* (bzw. extrinsischer Transfer) stattgefunden hat. **Hypothese 4** wird somit erfüllt.

Da das Training der Lernsequenz an der Button-Box immer direkt vor dem Schlafengehen durchgeführt wurde, kann vermutet werden, dass Schlaf tatsächlich für das hier nachgewiesene *goal-directed learning* von Bedeutung war. Da die Trainingseinheiten jeweils nur wenige Minuten dauerten, stehen die Ergebnisse außerdem mit der Vermutung von Robertson in Einklang, dass kurze Trainingseinheiten zum einen dazu führen, dass verstärkt *goal-directed learning* stattfindet, zum anderen bewirken, dass die Konsolidierung mehr vom schlafenden als vom wachen Zustand profitiert (Robertson 2009).

Dass in der vorliegenden Studie bei den Probanden kein *movement-directed learning* stattgefunden hat, könnte damit zusammenhängen, dass das Training auf mehrere Tage verteilt war und aus mehreren kurzen Einheiten bestand. Boutin und Kollegen stellten nämlich fest, dass eine Aufteilung des Trainings auf mehrere kleine Trainingseinheiten im Vergleich zu einer langen Trainingseinheit zu eingeschränktem *movement-directed learning* führt (2012).

Zusammenfassend stützen die Ergebnisse dieser Studie die allgemeine Annahme, dass Schlaf sich positiv auf das *goal-directed learning* auswirkt, aber wenig Einfluss auf das *movement-directed learning* nimmt (Witt et al. 2010; Robertson 2009; Cohen et al. 2005), und sprechen dafür, dass dies auch bei Kindern der Fall ist. Allerdings kann aufgrund des Versuchsdesigns nicht sicher belegt werden, dass das *goal-directed learning* in dieser Studie (ausschließlich) während des Schlafs stattgefunden hat. Es wäre ebenso möglich, dass dieser Prozess bereits während des Trainings oder am darauffolgenden Tag im Wachzustand erfolgte. Aktuelle Erkenntnisse sprechen gegen eine Konsolidierung in Form von *goal-directed learning* im Wachzustand. Dennoch kann in der vorliegenden Studie nicht sicher ausgeschlossen werden, dass bei den Kindern tagsüber *goal-directed learning* (offline) stattgefunden hat. Die Annahme, dass bei Kindern während des Schlafs *goal-directed learning* stattfindet, muss in Zukunft also noch genauer untersucht werden. Hierzu wäre ein Studiendesign ähnlich dem der Studien von Witt und Kollegen (2010) und Cohen und Kollegen (2005) mit einer Schlafgruppe und einer Wachgruppe zum Vergleich sinnvoll.

Es wäre außerdem interessant herauszufinden, ob ein morgendliches Training im Gegensatz zum abendlichen Training zu einem stärkeren *movement-directed learning* führen würde, da dieses überwiegend im Wachzustand stattfindet.

Zudem könnte in Anlehnung an die Vermutung von Robertson auch bei Kindern der Einfluss der Dauer des Trainings untersucht werden. So könnte man überprüfen, ob längere Trainingseinheiten zu vermindertem *goal-directed learning* und verstärktem *movement-directed learning* führen würden.

Wie in der Studie von Witt und Kollegen (2010) könnte man außerdem auch bei Kindern testen, wie stark die Ziel-Komponente bereits unmittelbar nach dem ersten Lernen der prozeduralen Aufgabe ausgeprägt ist. So könnte man klären, in welchem Ausmaß schon während des Lernens *goal-directed learning* stattgefunden hat und ob sich die Ziel-Komponente im Vergleich dazu über ein Retentionsintervall noch zusätzlich verbessert oder nur unverändert bleibt. Witt

und Kollegen beobachteten bei Erwachsenen, dass die Ziel-Komponente bereits nach dem Lernen stark ausgeprägt ist (2010).

4.6. Kontrollvariablen

Die Auswertung der Fragebögen zur Befindlichkeit ergab einen signifikanten Unterschied im subjektiven Müdigkeitsempfinden zwischen dem Durchgang Lernen und den Durchgängen Baseline_(Transfer), Abruf 1 und Abruf 2. Beim Durchgang Lernen fühlten sich die Probanden müder als bei den anderen Durchgängen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass dieser Termin am Abend stattgefunden hat, die anderen Termine, an denen der Fragebogen ausgefüllt wurde, jedoch morgens. Die Auswertung des PVT ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Durchgängen Lernen, Baseline_(Transfer), Abruf 1 und Abruf 2. Hier unterschieden sich die Ergebnisse des Lern-Termins nicht signifikant von den Ergebnissen der anderen Termine. Objektiv unterschied sich die Vigilanz bei diesem Termin also nicht von der bei den anderen Terminen. Aufgrund der PVT-Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass sich die beim Lernen subjektiv stärker empfundene Müdigkeit kaum auf Aufmerksamkeit und Konzentration der Probanden ausgewirkt hat und die Ergebnisse der Versuchsaufgabe nicht ausschlaggebend beeinflusst hat.

5. Zusammenfassung

Während inzwischen viele Studienergebnisse für einen starken fördernden Einfluss von Schlaf auf die deklarative Gedächtnisbildung bei Kindern sprechen, ist bisher nicht ausreichend geklärt, inwiefern sich Schlaf bei Kindern auf das prozedurale Gedächtnis auswirkt. Verschiedene Studien beobachteten, dass Schlaf die prozedurale Gedächtnisbildung bei Kindern nicht stärker begünstigt als der Wachzustand (Prehn-Kristensen et al. 2011; Wilhelm et al. 2008; Fischer et al. 2007). Die meisten Studien, die sich bisher mit dem Einfluss des Schlafs auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern auseinandersetzten, testeten dabei den unmittelbaren Effekt über eine Nacht. Deswegen hatte die vorliegende Studie zum Ziel, den langfristigen Einfluss von Schlaf auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern zu untersuchen. Dazu wurde von Probanden im Alter von 8 bis 11 Jahren eine motorische Sequenz gelernt und über eine Woche jeden Abend vor dem Schlafengehen trainiert. Es wurde untersucht, inwiefern die Verbesserung über die erste Nacht mit der Verbesserung über die Trainingswoche in Zusammenhang steht. Basierend auf Beobachtungen, die bei jungen Zebrafinken gemacht worden waren (Derégnaucourt et al. 2005; Margoliash und Schmidt 2010), wurde vermutet, dass sich Schlaf bei Kindern langfristig positiv auf die prozedurale Gedächtnisbildung auswirkt, obwohl sich unmittelbar über die erste Nacht noch kein positiver Effekt zeigt. Es wurde angenommen, dass eine geringere Verbesserung über die erste Nacht mit einer besseren Endperformanz am Ende der Trainingswoche einhergeht. Diese Hypothese konnte in der vorliegenden Studie jedoch nicht belegt werden. Die Ergebnisse sprechen eher dafür, dass bei Kindern die Endperformanz einer regelmäßig trainierten prozeduralen Aufgabe unabhängig vom Ausmaß der Verbesserung (oder Verschlechterung) über die erste Nacht ist. Ein positiver langfristiger Effekt von Schlaf auf die prozedurale Gedächtnisbildung konnte somit nicht belegt werden. Ein Zusammenhang zwischen einer bestimmten Schlafphase und der prozeduralen Gedächtniskonsolidierung über die erste Nacht wurde nicht beobachtet. Zusätzlich wurde nach der ersten Nacht eine Testung des expliziten Wissens über die implizit gelernte Sequenz durchgeführt. Die Ergebnisse bekräftigen die

Vermutung von Wilhelm und Kollegen (2013), dass Schlaf bei Kindern die Bildung expliziten Wissens über eine implizit gelernte prozedurale Aufgabe fördert.

Mittels verschiedener Transferaufgaben wurde außerdem überprüft, ob es bei den Kindern im Verlauf der Trainingswoche zu *movement-directed* oder *goal-directed learning* gekommen ist. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass *goal-directed learning* stattgefunden hat.

Literaturverzeichnis

Albouy G, Sterpenich V, Balteau E, Vandewalle G, Desseilles M, Dang-Vu T, Darsaud A, Ruby P, Luppi P, Degueldre C, Peigneux P, Luxen A, Maquet P (2008) Both the hippocampus and striatum are involved in consolidation of motor sequence memory. *Neuron* 58 (2): 261–272.

Al-Sharman A, Siengsukon CF (2014) Time rather than sleep appears to enhance off-line learning and transfer of learning of an implicit continuous task. *Nature and science of sleep* 6, 27–36.

Ambrosini MV, Giuditta A (2001) Learning and sleep: the sequential hypothesis. *Sleep medicine reviews* 5 (6): 477–490.

Aserinsky E, Kleitman N (1953) Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep. *Science* 118 (3062): 273–274.

Ashtamker L, Karni A (2013) Motor memory in childhood: early expression of consolidation phase gains. *Neurobiology of learning and memory* 106: 26–30.

Astill RG, Piantoni G, Raymann RJEM, Vis JC, Coppens JE, Walker MP, Stickgold R, Van Der Werf YD, Van Someren EJW (2014) Sleep spindle and slow wave frequency reflect motor skill performance in primary school-age children. *Frontiers in human neuroscience* 8, 910.

Atkinson RC, Shiffrin RM (1968): Human memory: a proposed system and its control processes. In: Spence KW, Spence JT: *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*. Vol. 2, 89–195, New York: Academic Press (1968).

Backhaus J, Hoeckesfeld R, Born J, Hohagen F, Junghanns K (2008) Immediate as well as delayed post learning sleep but not wakefulness enhances declarative memory consolidation in children. *Neurobiology of learning and memory* 89 (1): 76–80.

Borbély A (2004) *Schlaf*. Fischer, Frankfurt am Main: 3-4.

Born J, Rasch B, Gais S (2006) Sleep to remember. *Neuroscientist* 12 (5): 410–424.

Born J, Wagner U (2004) Awareness in memory: being explicit about the role of sleep. *Trends in cognitive sciences* 8 (6): 242–244.

Boutin A, Badets A, Salesse RN, Fries U, Panzer S, Blandin Y (2012) Practice makes transfer of motor skills imperfect. *Psychological research* 76 (5): 611–625.

Brashers-Krug T, Shadmehr R, Bizzi E (1996) Consolidation in human motor memory. *Nature* 382 (6588): 252–255.

Buchmann A, Ringli M, Kurth S, Schaerer M, Geiger A, Jenni OG, Huber R (2011) EEG sleep slow-wave activity as a mirror of cortical maturation. *Cerebral cortex* 21 (3): 607–615.

Campbell IG, Feinberg I (2009) Longitudinal trajectories of non-rapid eye movement delta and theta EEG as indicators of adolescent brain maturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (13): 5177–5180.

- Cohen DA, Pascual-Leone A, Press DZ, Robertson EM (2005) Off-line learning of motor skill memory: a double dissociation of goal and movement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (50): 18237–18241.
- Dang-Vu TT, Desseilles M, Peigneux P, Maquet P (2006) A role for sleep in brain plasticity. *Pediatric rehabilitation* 9 (2): 98–118.
- Debas K, Carrier J, Orban P, Barakat M, Lungu O, Vandewalle G, Hadj Tahar A, Bellec P, Karni A, Ungerleider LG, Benali H, Doyon J (2010): Brain plasticity related to the consolidation of motor sequence learning and motor adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (41): 17839–17844.
- Derégnaucourt S, Mitra PP, Fehér O, Pytte C, Tchernichovski O (2005) How sleep affects the developmental learning of bird song. *Nature* 433 (7027): 710–716.
- Diekelmann S, Born J (2010) The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience* 11 (2): 114-126.
- Diekelmann S, Wilhelm I, Born J (2009) The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation. *Sleep Medicine Reviews* 13 (5): 309–321.
- Doyon J, Korman M, Morin A, Dostie V, Tahar AH, Benali H, Karni A, Ungerleider LG, Carrier J (2009) Contribution of night and day sleep vs. simple passage of time to the consolidation of motor sequence and visuomotor adaptation learning. *Experimental Brain Research* 195 (1): 15–26.
- Doyon J, Penhune V, Ungerleider LG (2003) Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia* 41 (3): 252–262.
- Dudai Y (2004) The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Annual review of psychology* 55: 51–86.
- Eichenbaum H (2006) Remembering: functional organization of the declarative memory system. *Current biology* 16 (16), S. R643-5.
- Ellenbogen JM, Hulbert JC, Stickgold R, Dinges DF, Thompson-Schill SL (2006a): Interfering with theories of sleep and memory: sleep, declarative memory, and associative interference. *Current biology* 16 (13): 1290–1294.
- Ellenbogen JM, Payne JD, Stickgold R (2006b) The role of sleep in declarative memory consolidation: passive, permissive, active or none? *Current Opinion in Neurobiology* 16 (6): 716–722.
- Fischer S, Born J (2009): Anticipated reward enhances offline learning during sleep. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 35 (6): 1586–1593.
- Fischer S, Drosopoulos S, Tsen J, Born J (2006) Implicit learning -- explicit knowing: a role for sleep in memory system interaction. *Journal of cognitive neuroscience* 18 (3): 311–319.
- Fischer S, Hallschmid M, Elsner AL, Born J (2002) Sleep forms memory for finger skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (18): 11987–11991.

- Fischer S, Wilhelm I, Born J (2007) Developmental differences in sleep's role for implicit off-line learning: comparing children with adults. *Journal of cognitive neuroscience* 19 (2): 214–227.
- Fitts PM (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology* 47 (6): 381–391.
- Frank MG, Issa NP, Stryker MP (2001) Sleep enhances plasticity in the developing visual cortex. *Neuron* 30 (1): 275–287.
- Gais S, Born J (2004) Declarative memory consolidation: mechanisms acting during human sleep. *Learning & memory* 11 (6): 679–685.
- Galland BC, Taylor BJ, Elder DE, Herbison P (2012) Normal sleep patterns in infants and children: a systematic review of observational studies. *Sleep medicine reviews* 16 (3): 213–222.
- Gaudreau H, Carrier J, Montplaisir J (2001) Age-related modifications of NREM sleep EEG: from childhood to middle age. *Journal of sleep research* 10 (3): 165–172.
- Giuditta A (2014) Sleep memory processing: the sequential hypothesis. *Frontiers in systems neuroscience* 8, 219.
- Gruber T (2011) Gedächtnis. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien, Wiesbaden: 13-15, 32-37.
- Hasselmo ME (1999) Neuromodulation: acetylcholine and memory consolidation. *Trends in Cognitive Sciences* 3 (9): 351–359.
- Hikosaka O, Nakamura K, Sakai K, Nakahara H (2002) Central mechanisms of motor skill learning. *Current Opinion in Neurobiology* 12 (2): 217–222.
- Irwin MR (2012) Sleep and infectious disease risk. *Sleep* 35 (8): 1025–1026.
- Janacsek K, Fiser J, Nemeth D (2012) The best time to acquire new skills: age-related differences in implicit sequence learning across the human lifespan. *Developmental Science* 15 (4): 496–505.
- Jäncke L (2013) Lehrbuch Kognitive Neurowissenschaften. Verlag Hans Huber, Bern: 423-472.
- Karni A (1996) The acquisition of perceptual and motor skills: a memory system in the adult human cortex. *Brain research. Cognitive brain research* 5 (1-2): 39–48.
- Karni A, Meyer G, Rey-Hipolito C, Jezard P, Adams MM, Turner R, Ungerleider LG (1998) The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95 (3): 861–868.
- Korman M, Doyon J, Doljansky J, Carrier J, Dagan Y, Karni A (2007) Daytime sleep condenses the time course of motor memory consolidation. *Nature neuroscience* 10 (9): 1206–1213.
- Kuriyama K, Stickgold R, Walker MP (2004) Sleep-dependent learning and motor-skill complexity. *Learning & memory* 11 (6): 705–713.
- Kurth S, Jenni OG, Riedner BA, Tononi G, Carskadon MA, Huber R (2010) Characteristics of sleep slow waves in children and adolescents. *Sleep* 33(4): 475-480.

- Lange T, Perras B, Fehm HL, Born J (2003) Sleep enhances the human antibody response to hepatitis A vaccination. *Psychosomatic medicine* 65 (5): 831–835.
- Margoliash D, Schmidt MF (2010) Sleep, off-line processing, and vocal learning. *Brain and Language* 115 (1): 45–58.
- Marshall L, Born, J (2007) The contribution of sleep to hippocampus-dependent memory consolidation. *Trends in Cognitive Sciences* 11 (10): 442–450.
- Marshall L, Helgadóttir H, Mölle M, Born J (2006) Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature* 444 (7119): 610–613.
- Meulemans T, Van der Linden M, Perruchet P (1998) Implicit sequence learning in children. *Journal of experimental child psychology* 69 (3): 199–221.
- Miller GA (1956): The magical number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review* 63 (2): 81–97.
- Morris CJ, Aeschbach D, Scheer FAJL (2012) Circadian system, sleep and endocrinology. *Molecular and cellular endocrinology* 349 (1): 91–104.
- Ohayon MM, Carskadon MA, Guilleminault C, Vitiello MV (2004) Meta-analysis of quantitative sleep parameters from childhood to old age in healthy individuals: developing normative sleep values across the human lifespan. *Sleep* 27 (7): 1255–1273.
- Peigneux P, Laureys S, Fuchs S, Destrebecqz A, Collette F, Delbeuck X, Phillips C, Aerts J, Del Fiore G, Degueldre C, Luxen A, Cleeremans A, Maquet P (2003) Learned material content and acquisition level modulate cerebral reactivation during posttraining rapid-eye-movements sleep. *Neuroimage* 20 (1): 125–134.
- Peirano PD, Algarín CR (2007): Sleep in brain development. *Biological research* 40 (4): 471–478.
- Plihal W, Born J (1997) Effects of Early and Late Nocturnal Sleep on Declarative and Procedural Memory. *Journal of cognitive neuroscience* 9 (4): 534–547.
- Prather AA, Hall M, Fury JM, Ross DC, Muldoon MF, Cohen S, Marsland AL (2012) Sleep and antibody response to hepatitis B vaccination. *Sleep* 35 (8): 1063–1069.
- Prehn-Kristensen A, Molzow I, Munz M, Wilhelm I, Müller K, Freytag D, Wiesner CD, Baving L (2011) Sleep restores daytime deficits in procedural memory in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Research in Developmental Disabilities* 32 (6): 2480–2488.
- Rasch B, Born J (2007) Maintaining memories by reactivation. *Current Opinion in Neurobiology* 17 (6): 698–703.
- Rasch B, Born J (2013) About sleep's role in memory. *Physiological reviews* 93 (2): 681–766.
- Rasch B, Büchel C, Gais S, Born J (2007) Odor cues during slow-wave sleep prompt declarative memory consolidation. *Science* 315 (5817): 1426–1429.
- Rechtschaffen A, Kales A (1968) A manual of standardized terminology, techniques, and scoring system for sleep stages of human subjects. Bethesda, Maryland: US Department of Health, Education, and Welfare - NIH.

- Robertson EM (2009) From creation to consolidation: a novel framework for memory processing. *PLoS Biology* 7 (1): 11-19.
- Robertson EM, Pascual-Leone A, Press DZ (2004) Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep. *Current biology* 14 (3): 208–212.
- Roffwarg HP, Muzio JN, Dement WC (1966) Ontogenetic development of the human sleep-dream cycle. *Science* 152 (3722): 604–619.
- Sarchiapone M, Mandelli L, Carli V, Iosue M, Wasserman C, Hadlaczky G, Hoven CW, Apter A, Balazs J, Bobes J, Brunner R, Corcoran P, Cosman D, Haring C, Kaess M, Keeley H, Keresztény A, Kahn JP, Postuvan V, Mars U, Saiz PA, Varnik P, Sisask M, Wasserman D (2014) Hours of sleep in adolescents and its association with anxiety, emotional concerns, and suicidal ideation. *Sleep medicine* 15 (2): 248–254.
- Schendan HE, Searl MM, Melrose RJ, Stern CE (2003) An FMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron* 37 (6): 1013–1025.
- Shank SS, Margoliash D (2009) Sleep and sensorimotor integration during early vocal learning in a songbird. *Nature* 458 (7234): 73–77.
- Siegel JM (2005) Clues to the functions of mammalian sleep. *Nature* 437 (7063): 1264–1271.
- Song S, Cohen LG (2014) Practice and sleep form different aspects of skill. *Nature communications* 5: 3407.
- Song S, Howard JH, Howard DV (2007) Sleep does not benefit probabilistic motor sequence learning. *The Journal of neuroscience* 27 (46): 12475–12483.
- Spiegel K, Leproult R, van Cauter E (1999) Impact of sleep debt on metabolic and endocrine function. *Lancet* 354 (9188): 1435–1439.
- Squire LR, Knowlton B, Musen G (1993) The structure and organization of memory. *Annual review of psychology* 44: 453–495.
- Squire LR, Zola SM (1996) Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 93 (24): 13515–13522.
- Squire LR (2009) Memory and brain systems: 1969-2009. *The Journal of neuroscience* 29 (41): 12711–12716.
- Stickgold R (2005) Sleep-dependent memory consolidation. *Nature* 437 (7063): 1272–1278.
- Tononi G, Cirelli C (2014) Sleep and the price of plasticity: from synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration. *Neuron* 81 (1): 12–34.
- Tucker MA, Hirota Y, Wamsley EJ, Lau H, Chaklader A, Fishbein W (2006) A daytime nap containing solely non-REM sleep enhances declarative but not procedural memory. *Neurobiology of learning and memory* 86 (2): 241–247.
- Ungerleider LG, Doyon J, Karni A (2002) Imaging brain plasticity during motor skill learning. *Neurobiology of learning and memory* 78 (3): 553–564.

Velluti RA (1997) Interactions between sleep and sensory physiology. *Journal of sleep research* 6 (2): 61–77.

Wagner U, Diekelmann S, Born J (2010) Neuropsychologie des Schlafes. In: Lautenbacher S (2010) *Neuropsychologie psychischer Störungen*, 2., vollst. aktualisierte und erw. Auflage. Springer, Berlin, Heidelberg: 165–188.

Wagner U, Gais S, Haider H, Verleger R, Born J (2004) Sleep inspires insight. *Nature* 427 (6972): 352–355.

Walker MP, Brakefield T, Morgan A, Hobson JA, Stickgold R (2002) Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning. *Neuron* 35 (1): 205–211.

Walker MP, Brakefield T, Seidman J, Morgan A, Hobson JA, Stickgold R (2003) Sleep and the time course of motor skill learning. *Learning & memory* 10 (4): 275–284.

de Weerd AW, van den Bossche RA (2003) The development of sleep during the first months of life. *Sleep medicine reviews* 7 (2): 179–191.

Wiestler T, Waters-Metenier S, Diedrichsen J (2014) Effector-independent motor sequence representations exist in extrinsic and intrinsic reference frames. *The Journal of neuroscience* 34 (14): 5054–5064.

Wilhelm I, Prehn-Kristensen A, Born J (2012a) Sleep-dependent memory consolidation – What can be learnt from children? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 36 (7): 1718–1728.

Wilhelm I, Diekelmann S, Born J (2008) Sleep in children improves memory performance on declarative but not procedural tasks. *Learning & memory* 15 (5): 373–377.

Wilhelm I, Metzkw-Mészáros M, Knapp S, Born J (2012b): Sleep-dependent consolidation of procedural motor memories in children and adults: the pre-sleep level of performance matters. *Developmental Science* 15 (4): 506–515.

Wilhelm I, Rose M, Imhof KI, Rasch B, Büchel C, Born J (2013) The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nature Neuroscience* 16 (4): 391–393.

Witt K, Margraf N, Bieber C, Born J, Deuschl G (2010) Sleep consolidates the effector-independent representation of a motor skill. *Neuroscience* 171 (1): 227–234.

Yordanova J, Kolev V, Verleger R, Bataghva Z, Born J, Wagner U (2008) Shifting from implicit to explicit knowledge: Different roles of early- and late-night sleep. *Learning & Memory* 15 (7): 508–515.

Erklärungen zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde im Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie unter Betreuung von Professor Dr. Jan Born durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Müge Bayramoglu, Dr. Katharina Zinke und Dr. Ines Wilhelm.

Die Versuche wurden nach Einarbeitung durch Dr. Katharina Zinke von mir eigenständig durchgeführt. An der Studie nahmen insgesamt 28 Probanden teil.

Die Ergebnisse von 22 Probanden wurden von mir erhoben. Die Ergebnisse von 6 Probanden sind bereits zuvor von Müge Bayramoglu erhoben worden und wurden von mir in die statistische Auswertung miteinbezogen.

Die Auswertung der polysomnographischen Aufzeichnungen erfolgte nach Einführung durch Dr. Susanne Diekelmann und Dr. Katharina Zinke in das Sleep-Scoring und das *SchlafAus*-Programm durch mich.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Anleitung durch Dr. Katharina Zinke durch mich.

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

Stuttgart, den 16.11.2015

Danksagung

Herrn Professor Dr. Jan Born danke ich dafür, dass er mir ermöglichte, diese Arbeit am Institut für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie durchzuführen und mich so mit dem faszinierenden Themengebiet *Schlaf und Gedächtnis* auseinandersetzen zu können.

Von ganzem Herzen danke ich Frau Dr. Katharina Zinke, die diese Arbeit mit Geduld, Motivation und zahlreichen wertvollen Ratschlägen hervorragend betreut hat und sich bei Fragen immer sehr zuverlässig und hilfsbereit Zeit genommen hat.

Frau Dr. Susanne Diekelmann danke ich für die gute Einführung in das Sleep-Scoring nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales im Rahmen eines Kurses der *Graduate School of Neuroscience*.

Den Mitarbeitern des Kinderschlaflabors des Instituts danke ich für ihre Hilfsbereitschaft bezüglich fachlicher und praktischer Fragen und für das freundliche Arbeitsklima.

Ohne die Mitarbeit interessierter Familien wäre die Studie selbstverständlich undenkbar gewesen. Deswegen gilt mein Dank allen Probanden und deren Eltern für ihre Aufgeschlossenheit, an der Studie teilzunehmen.

Besonderen Dank richte ich an meine ehemalige Lehrerin Frau Dr. Gudrun Schickler, über deren Ermutigung und spontane und unkomplizierte Hilfe bei der Rekrutierung von Probanden ich mich sehr gefreut habe.

Bei meinen Freunden Dorothee Abrell und Tabea Ehrmann bedanke ich mich dafür, dass sie sich bereiterklärt haben, mit mir den Ablauf der Versuche vor Beginn der eigentlichen Erhebungen zu üben. Eure Hilfe und Begeisterung hat mich motiviert und ermutigt.

Meiner Familie bin ich zutiefst dankbar für die ermutigende und liebevolle Unterstützung, auf die ich mich immer verlassen kann.