

Aus dem Institut für Neuroendokrinologie

der Universität zu Lübeck

Direktor: Prof. Dr. Jan Born

---

# **Die schlafabhängige Konsolidierung prozeduraler Gedächtnisinhalte bei Kindern**

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der Universität zu Lübeck

– Aus der Medizinischen Fakultät –

vorgelegt von Corinna Wolff

aus Stuttgart

Lübeck 2010

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. rer. soc. Jan Born

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. med. Wolfgang Heide

Tag der mündlichen Prüfung:

24.01.2011

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den:

24.01.2011

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig durchgeführt und verfasst habe.

Quellen, Literatur und Hilfsmittel, die von mir benutzt wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Lübeck, den 09.03.2010

Corinna Wolff

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>10</b>
2.1	Schlaf	10
2.1.1	Funktion und Regulation	10
2.1.2	Schlafstadien nach Rechtschaffen und Kales	11
2.1.3	Schlafzyklus	13
2.1.4	Besonderheiten des Schlafes bei Kindern	14
2.2	Gedächtnis	15
2.2.1	Gedächtnissysteme	15
2.2.2	Gedächtnisbildung	19
2.2.3	Gedächtnisentwicklung bei Kindern	20
2.3	Schlaf und Gedächtnis	22
2.3.1	Bedeutung der Schlafphasen für die Gedächtniskonsolidierung	24
2.3.2	Mechanismen der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung	25
2.3.3	Interaktion zwischen den Gedächtnissystemen	26
2.4	Schlaf und Gedächtnis bei Kindern	28
<b>3</b>	<b>Methoden</b>	<b>32</b>
3.1	Stichprobe und Rekrutierung	32
3.2	Kontrollvariablen	32
3.3	Versuchsaufbau	33
3.4	Aufzeichnung des Schlafes	34
3.5	Gedächtnistest	34
3.6	Datenreduktion und statistische Analyse	37
3.7	Ethikantrag	37
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>38</b>
4.1	Gedächtnisaufgabe	38
4.1.1	Abfrage des impliziten Lernens	38
4.1.2	Abfrage des impliziten Wissens nach dem Retentionsintervall	39

4.1.3	Freier Abruf des expliziten Wissens	41
4.1.4	Explizite Vorhersage der Sequenz	41
4.2	Zusammenhang zwischen Schlaf und Gedächtnisbildung	42
4.3	Kontrollvariablen	43
4.3.1	Befindlichkeitsfragebogen	43
4.3.2	Intelligenztest	45
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>56</b>
7.1	Befindlichkeitsfragebogen	56
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>57</b>

## Abbildungsverzeichnis

**Abbildung 1:** Physiologisches Hypnogramm.

**Abbildung 2:** Hypnogramm eines teilnehmenden Kindes dieser Studie.

**Abbildung 3:** Die Subtypen des Langzeitgedächtnisses (vereinfacht nach Squire und Zola, 1996).

**Abbildung 4:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

**Abbildung 5:** Darstellung der Reaktionszeitdifferenzen zwischen der gelernten und der Zufallssequenz vor und nach dem Retentionsintervall.

**Abbildung 6:** Darstellung der signifikanten Korrelation zwischen dem Anteil an Schlafstadium 4 und der expliziten Leistung bei der Vorhersageaufgabe.

## Tabellenverzeichnis

**Tabelle 1:** Darstellung der Differenz der Reaktionszeiten vom Beginn des Lernens und dem Ende des Lernens.

**Tabelle 2:** Tabellarische Darstellung der Reaktionszeitdifferenzen (gelernte Sequenz vs. Zufallssequenz) der beiden Versuchsbedingungen im Vergleich des Lernens mit der Abfrage nach dem Retentionsintervall.

**Tabelle 3:** Darstellung der korrekt wiedergegebenen Triplets beim freien Abruf im Vergleich der beiden Versuchsbedingungen.

**Tabelle 4:** Darstellung der korrekt vervollständigten Triplets bei der Generation task im Vergleich der beiden Versuchsbedingungen.

**Tabelle 5:** Die Verteilung der Schlafphasen der Kinder aus der Schlafbedingung als absoluter Anteil und in Prozent.

**Tabelle 6:** Darstellung der Antwortmöglichkeiten des Befindlichkeitsfragebogens und der dazugehörigen Punkteverteilung.

**Tabelle 7:** Darstellung der durchschnittlichen Befindlichkeitsbewertung der Kinder im Vergleich der Schlaf- und Wachbedingung.

**Tabelle 8:** Darstellung der erreichten Punktzahlen im Intelligenztest im Vergleich der beiden Versuchsbedingungen.

## **Abkürzungsverzeichnis**

EEG:	Elektroenzephalogramm
EOG:	Elektrookulogramm
EMG:	Elektromyogramm
Hz:	Hertz
REM:	Rapid Eye Movement
SWS:	Slow Wave Sleep
SRTT:	Serial Reaction Time Task
PET:	Positronen-Emissions-Tomographie
CFT1:	Culture Fair Intelligence Tests Scale 1
ANOVA:	Analyse of Variance

# 1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten beschäftigten sich zahlreiche Forschergruppen damit, die Bedeutung des Schlafes zu verstehen. Der Schlaf stellt einen festen Bestandteil unserer Lebenszeit dar, den jeder Mensch in einer individuellen Menge benötigt. Diese wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, zum Beispiel durch das Alter. So hat ein Säugling oder Kleinkind, verglichen mit älteren Menschen, mehr als den doppelten Schlafbedarf.

Natürlich stellt sich die Frage, warum wir so viel unserer Lebenszeit im schlafenden Zustand verbringen und worin der Grund für die altersabhängigen oder individuellen Unterschiede liegt. Die Notwendigkeit des Schlafes für unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden wurde bereits in zahlreichen Studien aufgeführt, wie auch die Reaktionen des Organismus auf einen gezielten Schlafentzug. Durch den Entzug von Schlaf wird das körperliche und geistige Wohlbefinden erheblich gemindert. Auf die fehlende Erholungsphase reagiert unser Körper unter anderem mit Müdigkeit, Schwäche, Leistungsminderung und Konzentrationsstörungen. In Tierversuchen mit Ratten führte der gezielte Schlafentzug über Tage letztendlich zum Tode, wodurch die essentielle Rolle des Schlafes deutlich wird. Neben diesen zahlreichen Funktionen wurde mittlerweile ein positiver Einfluss des Schlafes auf die Gedächtniskonsolidierung bewiesen, sowohl für das deklarative als auch für das prozedurale Gedächtnis.

Das Gedächtnis ist eine zentrale Funktion unseres Gehirns. Es ermöglicht, dass wir uns an gegenwärtige und vergangene Ereignisse erinnern können und Wissen ansammeln. Des Weiteren gibt es uns die Möglichkeit, durch das Wiedererkennen bereits bekannter Gesichter soziale Kontakte aufzubauen. Auch unsere praktischen Fähigkeiten verdanken wir unserem Gedächtnis. Um beispielsweise mit einem Auto fahren zu können, müssen zunächst die theoretischen Grundlagen und Abläufe, wie die Bedienung der Kupplung des Autos, verstanden und im Gedächtnis gespeichert werden. Erst dann und nach einiger Übung gelingt das reibungslose Fahren. Während solcher Lernprozesse findet ein fein abgestimmtes Zusammenspiel der einzelnen Systeme unseres Gedächtnisses statt.

All diese Lernprozesse beginnen bereits mit der Geburt. Die Redensart „was man als Kind nicht lernt, wird man nie lernen“ beschreibt passend die Fähigkeit der Kinder, sehr schnell eine Vielzahl von Informationen aufzunehmen und im Ge-

dächtnis zu behalten. Die Erfüllung dieser hohen Anforderungen wird unter anderem durch eine enorme Leistungsfähigkeit und Formbarkeit des kindlichen Gehirns gewährleistet. Auch bei Kindern zeigte sich in den bisherigen Studien ein positiver Einfluss des Schlafes auf die Gedächtnisbildung. Dies führte zu der Vermutung, dass das hohe Schlafbedürfnis von Kindern in einem besonderen Zusammenhang mit der Ausbildung des Gedächtnisses während der Entwicklung steht.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der Bedeutung des Schlafes für die prozedurale Gedächtnisbildung bei Kindern und dem Einfluss auf die verschiedenen Aspekte beim motorischen Lernen.

## 2 Theorie

In den folgenden Kapiteln wird der theoretische Hintergrund der vorliegenden Studie aufgeführt. Die grundlegenden Themen sind der Schlaf und das Gedächtnis, die in jeweils eigenen Kapiteln besprochen werden. In einem weiteren Kapitel werden bisherige Studienergebnisse über den Zusammenhang dieser beiden Themen aufgeführt. Eine besondere Bedeutung für die vorliegende Studie liegt in den altersabhängigen Unterschieden bezüglich des Schlafes und des Gedächtnisses. Daher wird der Schlaf bei Kindern, die Entwicklung des Gedächtnisses während der Kindheit und der Einfluss des Schlafes auf das kindliche Gedächtnis näher beschrieben.

### 2.1 Schlaf

Der Mensch verbringt, wie nahezu jedes Lebewesen, einen großen Anteil seiner Lebenszeit schlafend. Dabei unterscheiden sich die Schlafdauer und das Schlafbedürfnis bei jedem Individuum. Äußerlich erscheint der Schlaf als ein Zustand des Bewusstseinsverlustes, der jedoch reversibel ist, da der Schlafende jederzeit aus diesem Zustand erweckt werden kann. Trotz dieser scheinbaren Passivität während des Schlafes erfüllt dieser bedeutende Funktionen und kann mit Hilfe der polysomnographischen Aufzeichnung näher charakterisiert werden.

#### 2.1.1 Funktion und Regulation

Auf physiologischer Ebene sind für den Schlaf eine Abnahme der muskulären Aktivität und die eingeschränkte Aufnahme neuer Sinneswahrnehmungen kennzeichnend. Die Reaktionen des Körpers auf äußere Reize lassen während des Schlafes nach. Die gezielte Erforschung des Phänomens „Schlaf“ hat gezeigt, dass dieser in vielfältiger Weise auf den Organismus einwirkt und Veränderungen hervorruft. Diese Veränderungen betreffen den Stoffwechsel, die Körpertemperatur, das Immunsystem und das Hormonsystem (Horne, 1988). Außerdem führt der Schlaf zu einer Regeneration und Erholung des Organismus und zum Erhalt von Energiereserven (Siegel, 2005). Der positive Einfluss des Schlafes auf die Gedächtnisbildung wurde bereits in zahlreichen Studien untersucht und belegt (Plihal und Born, 1997; Maquet, 2001; Stickgold, 2005; Walker und Stickgold,

2006). Diese Funktion des Schlafes ist ein Thema dieser Studie und wird in der folgenden Arbeit eingehend betrachtet.

Die Regulation des Schlafes erfolgt, nach einer Theorie von Borbely, durch zwei Prozesse: durch den restaurativen und den zirkadianen Prozess (Borbely, 1984). Der zirkadiane Prozess oder Rhythmus bestimmt die Anpassungsvorgänge des Organismus an den Wechsel von Tag und Nacht und somit auch den Schlaf-Wach-Rhythmus. Er setzt das Zeitintervall des Schlafes fest und bestimmt den Zeitpunkt des Einschlafens und des Aufwachens. Der Wechsel von hell und dunkel spielt dabei für das Gehirn eine wichtige Rolle. Der Ursprung der zirkadianen Rhythmik liegt im Nucleus suprachiasmaticus des Hypothalamus. Der restaurative Prozess dient der Wiederherstellung der Homöostase des Körpers, die im wachen Zustand gestört wird. Durch den Schlaf kann diese Störung aufgehoben und das Gleichgewicht wiederhergestellt werden. Dieser Prozess bestimmt die Dauer und die Intensität des Schlafes. Er führt dazu, dass im Verlauf des Wachzustandes die Müdigkeit kontinuierlich zunimmt und während des Tiefschlafes wieder abnimmt. Vorangehender Schlafentzug führt dabei zu einem gesteigerten Schlafbedürfnis.

### **2.1.2 Schlafstadien nach Rechtschaffen und Kales**

Während des Schlafens durchläuft der Mensch eine Reihe definierter Schlafstadien. Diese werden anhand verschiedener Parameter bestimmt, wie beispielsweise der Schlaftiefe. Mit der Einführung des Elektroenzephalogramms wurde es möglich, den Schlaf durch standardisiertes Vorgehen in diese Stadien einzuteilen und näher zu charakterisieren (Rechtschaffen und Kales, 1968). Die Einteilung erfolgt mit Hilfe der Ableitungen des Elektroenzephalogramms (EEG) zur Abbildung der Gehirnaktivität, des Elektrookulogramms (EOG) zur Aufzeichnung von Augenbewegungen und des Elektromyogramms (EMG) zur Erfassung des Muskeltonus.

Beim wachen Menschen zeigen sich im EEG überwiegend schnelle Beta-Wellen mit einer Frequenz von 14 bis 30 Hertz (Hz) und einer flachen Amplitude. Im EMG und EOG zeigen sich starke Bewegungen. Dieses Bild verändert sich bei Entspannung und mit dem Schließen der Augen. Dann treten bereits vereinzelte Alpha-Wellen mit einer Frequenz von 8 bis 13 Hz auf. Mit dem Übergang zum

Schlaf und in dessen Verlauf verändert sich das Bild des EEGs auf charakteristische Weise. Mit zunehmender Schlaftiefe beobachtet man eine stetige Abnahme der Hirnstromfrequenz bei gleichzeitigem Anstieg der Amplitude.

Für die Gliederung der Schlafstadien wird der Non-Rapid-Eye-Movement-Schlaf (Non-REM-Schlaf) dem Rapid-Eye-Movement-Schlaf (REM-Schlaf) gegenübergestellt. Der Non-REM-Schlaf lässt sich nach der zunehmenden Schlaftiefe in die Schlafphasen 1 bis 4 unterteilen. Das Stadium 1 enthält noch einen geringen Anteil an Alpha-Aktivität, jedoch vorwiegend langsamere Wellen mit 2 bis 7 Hz sowie Vertexwellen mit einer Amplitude von bis zu 200  $\mu\text{V}$ . Im EOG erscheinen rollende Augenbewegungen, das EMG zeigt eine niedrigere Aktivität als im Wachzustand an. Das Stadium 1 stellt ein Übergangsstadium dar und dauert 1 bis 7 Minuten. Darauf folgt das Stadium 2 mit charakteristischen Schlafspindeln mit einer Frequenz von 12 bis 14 Hz und K-Komplexen. Die Frequenz der EEG-Wellen wird langsamer und die Amplitude steigt auf mindestens 75  $\mu\text{V}$ . Das Stadium 2 macht 50 % der gesamten Schlafdauer aus. In Stadium 3 erscheinen bereits zahlreiche langsame Wellen mit einer hohen Amplitude und einer Frequenz von 0,5 bis 2 Hz, die Delta-Wellen genannt werden. Auch Schlafspindeln und K-Komplexe können noch vereinzelt auftreten. Das Stadium 4 wird von den langsamen Delta-Wellen dominiert. Die Stadien 3 und 4 stellen gemeinsam den Tiefschlaf dar und werden durch ihr charakteristisches Bild der langsamen Delta-Wellen auch als „Slow Wave Sleep“ (SWS) oder Delta-Schlaf bezeichnet.

Den Stadien des Non-REM-Schlafes steht der REM-Schlaf gegenüber. Charakteristisch und namensgebend für den REM-Schlaf ist das Auftreten schneller Augenbewegungen im EOG (Rapid Eye Movements). Ein weiteres Kennzeichen ist die vollkommene Erschlaffung der Muskulatur während der REM-Phasen. Im EEG fehlen die langsamen Wellen mit großer Amplitude, die während des Tiefschlafes zu sehen sind. Es treten vorwiegend Wellen mit einer Frequenz von 2 bis 7 Hz auf, aber auch vereinzelt Alpha-Wellen. Das entstandene EEG-Muster zeigt ein ähnliches Bild wie im Wachzustand. Aufgrund dieser Eigenschaft wird der REM-Schlaf auch als paradoxer Schlaf bezeichnet (Jouvet und Michel, 1959). Die Weckschwelle ist im REM - Schlaf dennoch sehr hoch.

### 2.1.3 Schlafzyklus

Das Auftreten und die Abfolge der einzelnen Schlafstadien während einer Nacht unterliegen einem bestimmten Zyklus. Nach dem Übergang vom Wachzustand in die erste Schlafphase, der beim gesunden Menschen nicht länger als eine halbe Stunde dauert, werden alle Schlafstadien von 1 bis 4 durchlaufen, bis der REM-Schlaf erreicht ist. Daraufhin beginnt der Zyklus erneut. Ein solcher Zyklus nimmt beim Menschen 90 bis 100 Minuten in Anspruch und wird in einer Nacht ungefähr 5 bis 7 mal durchlaufen.

Die einzelnen Schlafstadien sind auf eine charakteristische Weise auf eine Nacht verteilt. Der größte Anteil an Tiefschlaf findet in der ersten Nachthälfte statt (80 %). Im Laufe der Nacht verkürzen sich die Tiefschlafabschnitte fortlaufend. In der zweiten Nachthälfte wird dieses Stadium schließlich kaum noch erreicht. Im Gegenzug hierzu ist der Anteil des REM-Schlafes in der ersten Nachthälfte gering und steigt mit Voranschreiten der Nacht stetig an (Hartmann, 1966). Auch die Dauer der einzelnen REM-Phasen nimmt mit zunehmender Schlafenszeit zu. Sie steigt von anfangs ca. 5 bis 10 Minuten auf ca. 20 bis 30 Minuten gegen Ende der Nacht an. Von den Stadien des Non-REM-Schlafes überwiegt in der zweiten Nachthälfte das Stadium 2, das insgesamt die Hälfte der gesamten Schlafdauer einer Nacht ausmacht. In Abbildung 1 wird ein Hypnogramm eines Erwachsenen mit der charakteristischen Verteilung der Schlafstadien auf eine Nacht dargestellt.

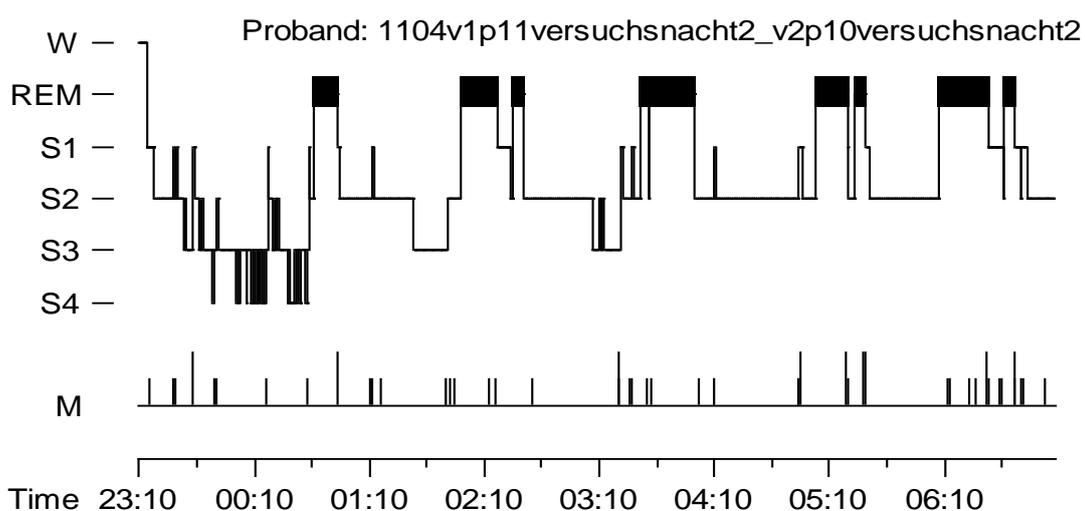


Abbildung 1: Physiologisches Hypnogramm.

### 2.1.4 Besonderheiten des Schlafes bei Kindern

Die Schlafgewohnheiten eines Kindes weisen im Vergleich zu einem Erwachsenen zahlreiche Unterschiede auf. Diese betreffen sowohl das Schlafprofil als auch die Schlafdauer (Kahn, Dan, Groswasser, Franco und Sottiaux, 1996; Ohayon, Carskadon, Guilleminault und Vitiello, 2004). Die Gesamtschlafenszeit sinkt stetig mit dem zunehmenden Alter. Ein Säugling benötigt bis zu 20 Stunden Schlaf, Kleinkinder und Schulkinder schlafen zwischen 9 und 13 Stunden. Bei Jugendlichen ist die durchschnittliche Gesamtschlafenszeit bereits auf 7 bis 8 Stunden pro Nacht reduziert. Dies entspricht der Schlafenszeit eines Erwachsenen. Die Schlaf-Latenz, das heißt die Zeit bis zum Moment des Einschlafens, und die wachen Phasen während der Nacht sind bei Kindern wesentlich geringer.

Zieht man für diesen Vergleich die EEG-Ableitungen hinzu zeigen sich auch hier altersabhängige Unterschiede. Der „Slow Wave Sleep“ ist bei Kindern das dominierende Schlafstadium. Im Vergleich zum Schlaf eines Erwachsenen weist der kindliche Schlaf einen enorm hohen Anteil an Tiefschlaf auf. Auch die einzelnen REM-Phasen sind in der Kindheit verlängert, werden jedoch mit einer höheren Latenzzeit erst spät in der Nacht erreicht. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Anteil der Schlafstadien 1 und 2 am Gesamtschlaf mit dem Alter deutlich zunimmt (Ohayon et al., 2004).

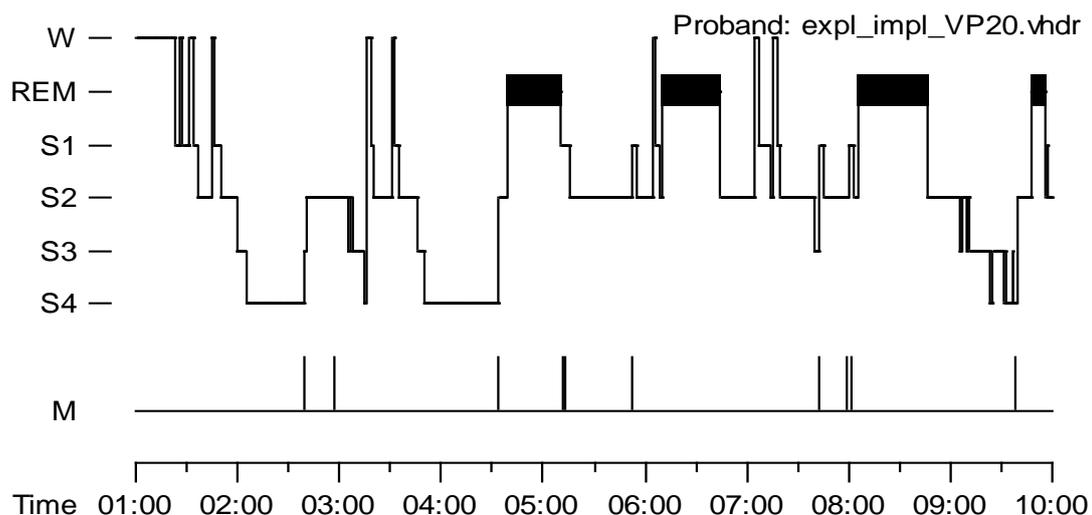


Abbildung 2: Hypnogramm eines teilnehmenden Kindes der vorliegenden Studie.

## **2.2 Gedächtnis**

Unser Gedächtnis ist ein äußerst komplexes System, dessen Erforschung die Wissenschaft auch heute noch beschäftigt. Auf der Basis zahlreicher Forschungsergebnisse sind mittlerweile die nähere Einteilung und die Charakterisierung der Gedächtnissysteme, sowie ein Blick auf die Gedächtnisentwicklung vom Säugling bis zum Erwachsenen möglich.

Die Funktionen des Gedächtnisses sind umfassend, wie auch die Anforderungen, denen es täglich gerecht werden muss. Das Gedächtnis soll sowohl die Aufnahme und Verarbeitung neuer Informationen als auch die spätere Wiedergabe dieser Inhalte ermöglichen. Ein zentraler Vorgang für das Erreichen dieser Ziele stellt das Lernen dar. Eine weitere Aufgabe des Gedächtnisses liegt in der Verknüpfung der neuen Informationen mit den bereits bestehenden Gedächtnisinhalten. Um diesen komplexen Anforderungen gerecht zu werden, sind auch auf neuronaler Ebene verschiedene Prozesse, wie beispielsweise die Gedächtniskonsolidierung erforderlich. Nur so kann die dauerhafte Speicherung neuer Informationen und deren Abruf zu einem späteren Zeitpunkt erreicht werden.

### **2.2.1 Gedächtnissysteme**

Entgegen früherer Annahmen weiß man heute, dass unser Gedächtnis kein einheitliches System darstellt, sondern aus mehreren Systemen aufgebaut ist. Diese können zur Speicherung der neu aufgenommenen Informationen genutzt werden. Die einzelnen Gedächtnissysteme zeigen eine spezifische Verknüpfung mit bestimmten Gehirnarealen, deren Beeinträchtigung sich erheblich auf die jeweilige Gedächtnisleistung auswirken würde.

Zur Einteilung des Gedächtnisses liegen verschiedene Modelle vor, wie beispielsweise die Unterteilung nach dem Inhalt des Gedächtnissystems. Die einfachste Gliederung nach inhaltlichen Aspekten ist die Unterteilung in das deklarative und das non-deklarative Gedächtnis (Cohen und Squire, 1980). Diese Unterteilung wird in Abbildung 3 graphisch dargestellt.

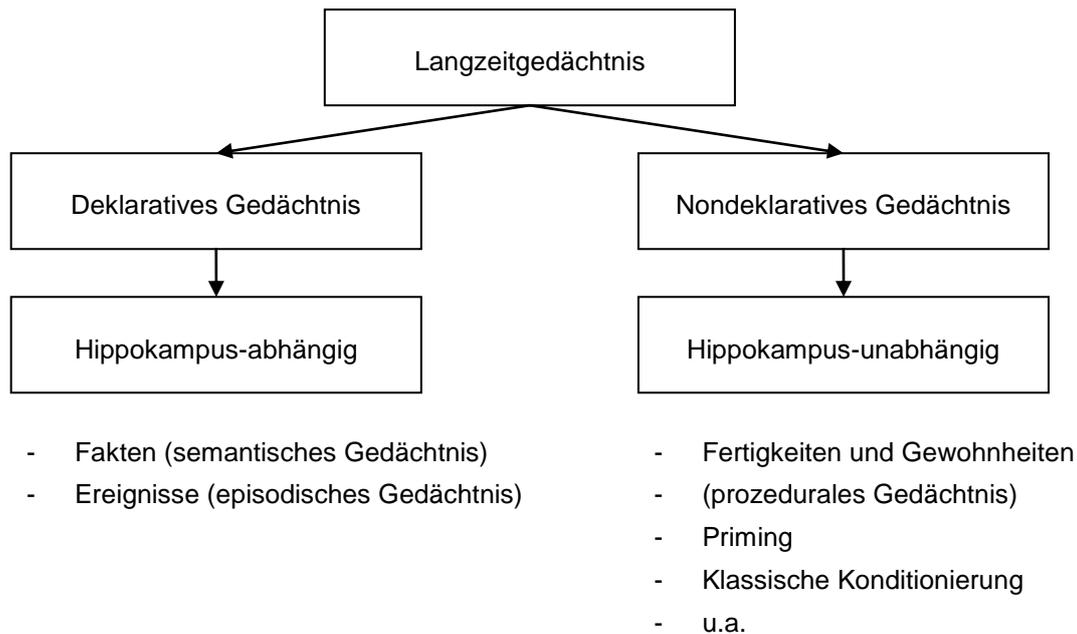


Abbildung 3: Systematische Darstellung der Subtypen des Langzeitgedächtnisses (vereinfacht nach Squire und Zola, 1996).

Das deklarative Gedächtnis beinhaltet die Speicherung von Fakten und Ereignissen und kann daher weiter in das semantische und episodische Gedächtnis unterteilt werden. Da der Zugriff auf die Inhalte des deklarativen Gedächtnisses willkürlich und bewusst geschieht, wird es auch als explizites Gedächtnis bezeichnet (Markowitsch, 1996). Das explizite Lernen kann sehr schnell erfolgen und möglicherweise auf nur einem einzelnen hervorstechenden Stimulus beruhen. Allerdings sind diese Erinnerungen auch nach der Enkodierung sehr anfällig dafür, schnell wieder vergessen oder durch andere Gedächtnisinhalte überlagert zu werden. Sowohl der Lernvorgang als auch der erneute Abruf erfordern Aufmerksamkeit und das Bewusstsein dafür (Reber, 1989; Squire, 1992; Shanks und John, 1994; Seger, 1994; Willingham und Goedert-Eschmann, 1999; Willingham, 2001; Destrebecqz und Cleeremans, 2001). Die entscheidenden Gehirnstrukturen für das deklarative Gedächtnis sind der mediale Temporallappen, insbesondere der Hippokampus mit angrenzenden Gebieten, und das Dienzephalon (Squire, 1992; Stern et al., 1996). Hinweise auf diese Beziehung zwischen dem deklarativen Gedächtnis und den genannten Gehirnstrukturen liefern Studien mit Amnesie-Patienten, deren Erkrankung auf eine Schädigung des mittleren

Temporallappens zurückzuführen war. Diese Patienten zeigten eine deutliche Beeinträchtigung des deklarativen Gedächtnisses (Cohen und Squire, 1980; Nissen und Bullemer, 1987). Als Funktionstest für das deklarative Gedächtnis eignet sich typischerweise der Wortpaar-Assoziations-Test. Für diesen Test lernt der Proband zusammengehörende Wortpaare, vergleichbar mit dem Lernen von Vokabeln. Bei der Abfrage wird nur das erste Wort eines Wortpaares genannt, an das zugehörige zweite Wort muss sich der Proband erinnern.

Gegenüber dem deklarativen Gedächtnis steht das hippokampus-unabhängige, non-deklarative Gedächtnis. Dieses kann in weitere Subtypen unterteilt werden. Dazu gehören das prozedurale Gedächtnis, Primingprozesse (Tulving und Schacter, 1990), klassische Konditionierung (Pavlov, 1927) sowie nicht-assoziatives Lernen (Siehe auch Abbildung 3). Da sich diese Studie insbesondere mit dem prozeduralen Gedächtnis beschäftigt, wird im Folgenden nur dieser Anteil des non-deklarativen Gedächtnisses näher beschrieben.

Im prozeduralen Gedächtnis werden Gewohnheiten sowie sensorische und motorische Fertigkeiten gespeichert wie beispielsweise das Fahrradfahren. Dieser Teil des Gedächtnisses wird unbewusst genutzt, was zu der Bezeichnung „implizites“ Gedächtnis geführt hat. Das implizite Lernen beinhaltet auch die unbewusste Anpassung an Regeln und Verhaltensweisen des Umfeldes, die allein durch Beobachtung wahrgenommen werden. Anders als beim deklarativen Gedächtnis genügt für die Speicherung eines prozeduralen Gedächtnisinhaltes nicht die Präsentation eines einzelnen Stimulus. Die Gedächtnisbildung erfordert das wiederholte Üben der gewünschten Fähigkeit. Wenn die Speicherung im Gedächtnis gelingt, bleibt sie das ganze Leben lang erhalten. Auf neuronaler Ebene zeigte sich, dass insbesondere der Neocortex, die Basalganglien und das Kleinhirn eine Rolle für die prozedurale Gedächtnisleistung spielen. In Studien mit Patienten, die an Morbus Parkinson oder einer Degeneration des Kleinhirns litten, wurde beispielsweise eine Einschränkung des Lernens impliziter Aufgaben und der Gedächtnisbildung beobachtet (Heindel, Salmon, Shults, Walicke und Butters, 1989; Pascual - Leone et al., 1993; Jackson, Jackson, Harrison, Henderson und Kennard, 1995; Gabrieli, Stebbins, Singh, Willingham und Goetz, 1997). Eine häufig erprobte Methode zum Test des prozeduralen Gedächtnisses ist die Serielle Reaktionszeit Aufgabe (SRTT). Dabei wird der Proband dazu aufge-

fordert, so schnell und exakt als möglich auf einen visuell präsentierten Stimulus zu reagieren. Dieser erscheint auf einem Bildschirm, abwechselnd in einem von vier horizontal angeordneten Kästchen. Diesen ist jeweils eine Taste zur Antwort zugeordnet. Nun werden dem Probanden Sequenzen mit vorher festgelegter Abfolge der Stimuluspräsentation und solche mit zufälliger Abfolge präsentiert. Die Testperson bekommt keine Informationen darüber, dass die Reihenfolge der Stimuluspräsentation gewissen Regeln folgt. Zeigt sich während des Übens eine Verbesserung der Reaktionszeit bei Erscheinen der geregelten Sequenz, nicht aber bei der Präsentation der Zufallssequenzen, lässt diese Differenz der Reaktionszeiten auf ein stattgefundenes implizites Lernen der Sequenzabfolge schließen. Dem Probanden kann dabei vollkommen unbewusst bleiben, dass gewisse Regelmäßigkeiten bestanden und ein Lernprozess stattfand.

Trotz der Unterschiede in der Gedächtnisbildung und den Funktionen bestehen dennoch enge Beziehungen zwischen den Gedächtnissystemen. Die alltäglichen Lernprozesse erfordern ein genau abgestimmtes Zusammenspiel, so dass die Systeme nicht vollkommen getrennt voneinander betrachtet werden können (Poldrack und Packard, 2003; Born und Wagner, 2004). Im Gegensatz zur deklarativen Gedächtnisbildung, die nur bewusst erfolgen kann, beinhaltet das Erlernen einer prozeduralen Gedächtnisaufgabe sowohl implizite als auch explizite Aspekte. Dies gilt insbesondere für Bewegungsabläufe. Um beispielsweise das Fahrradfahren zu erlernen, müssen zunächst die benötigten Bewegungsabläufe bewusst verstanden werden, bevor sie praktisch umgesetzt werden können. Nach einiger Übung wird dieser explizite Anteil fortlaufend geringer, bis die Bewegungsabläufe schließlich automatisch ausgeführt werden. Letztendlich erfolgt der Abruf unbewusst und führt zu einem schnellen und reibungslosen Ablauf. Für das Beispiel des Fahrradfahrens bedeutet dies, dass das Fahren erst durch das schnelle und automatische Treten der Pedale ermöglicht wird, ohne zuvor über die benötigten Bewegungsabläufe nachzudenken.

Nachdem bewiesen wurde, dass für deklarative und prozedurale Gedächtnisleistungen spezifische Gehirnareale aktiviert werden, konnte auch auf neuronaler Ebene gezeigt werden, dass diese Gebiete während eines Lernvorgangs parallel arbeiten (Willingham und Goedert-Eschmann, 1999). In einer Studie, in der eine SRTT genutzt wurde, zeigte sich während des initialen Lernens eine Aktivierung

des Hippokampus. Weiteres Üben und eine Steigerung der impliziten Leistung führte zu einer überwiegenden Aktivierung des Striatums (Albouy, Sterpenich, Balteau, Vandevallée, Desseilles, Dang - Vu et al., 2008). Mittlerweile wurde mehrfach gezeigt, dass mit zunehmendem impliziten Können die striatale Aktivität stetig ansteigt und die Aktivierung des Hippokampus langsam nachlässt (Burgess, Maguire und O'Keefe, 2002; Packard und Knowlton, 2002).

### **2.2.2 Gedächtnisbildung**

Die Aufnahme der zahlreichen neuen Informationen und deren Integration in unser Gedächtnis erfordert eine komplexe Verarbeitungstechnik des Gehirns. Die Gedächtnisbildung lässt sich in drei Prozesse unterteilen: das Lernen (Enkodierung), die Konsolidierung und den Abruf.

Während eines Lernprozesses entsteht im Gehirn durch die Enkodierung der neu ankommenden Information eine neuronale Repräsentation in Form einer Gedächtnisspur. Diese frische Spur ist zeitlich begrenzt und labil und kann somit auch schnell wieder verloren gehen. Einen negativen Einfluss auf die Gedächtnisbildung können Interferenzen bewirken, die durch neu enkodiertes Material entstehen und die Speicherung der vorangegangenen Information stören (Bower et al., 1994). Um diesen Verfall der Gedächtnisspur zu verhindern muss diese zunächst verfestigt werden. Dies geschieht im Prozess der Konsolidierung, bei der eine labile Spur in eine stabile Gedächtnisrepräsentation überführt wird.

Auf physiologischer Ebene lassen sich die Vorgänge der Konsolidierung näher beschreiben. Anhand der physiologischen Veränderungen des Gehirns während der Speicherung eines neuen Gedächtnisinhaltes werden zwei unterschiedliche Systeme der Konsolidierung unterschieden: die synaptische und die systemische Konsolidierung. Die synaptische Konsolidierung dauert Minuten bis Stunden nach dem Lernen an. Sie dient der Stabilisierung der neuronalen Veränderungen auf der Ebene der Synapsen. Die systemische Konsolidierung nimmt Tage bis Monate in Anspruch. Sie führt zu einer Neuorganisation der neuronalen Präsentationen und zum Einbezug verschiedener Nervennetzwerke (Dudai, 2004; Frankland und Bontempi, 2005). Dabei ist ein Transfer zwischen den Gehirnarealen von zentraler Bedeutung für die Konsolidierung. Dieser Vorgang endet nicht mit Abschluss des Lernens, sondern dauert möglicherweise für Wochen bis zu Monaten an. Er führt

letztendlich zur Stabilisierung der Erinnerung und kann sogar zu einer Verbesserung des Gelernten führen (Eysenk, 1965; Robertson, Pascual-Leone und Press, 2004; Walker, 2005). Für das deklarative Gedächtnis ist der Transfer zwischen Hippokampus und dem Neokortex entscheidend (Buzsaki, 1996). Neu aufgenommene Informationen werden zunächst im Hippokampus für den erneuten Abruf zwischengespeichert. Mit der Zeit werden sie jedoch wiederholt auf den Neokortex übertragen, bis sie letztendlich unabhängig vom Ort ihrer ersten Speicherung werden (Squire und Zola - Morgan, 1991). Erst nach diesem langsamen Prozess ist die Information im Langzeitspeicher des Neokortex vor Interferenzen geschützt. Für das prozedurale Gedächtnis ist kein genauer Austauschvorgang zwischen den Gehirnregionen während der Konsolidierung bekannt. Erwiesen ist jedoch die große Bedeutung der Basalganglien und des Kleinhirns, sowie der Verbindungen zwischen Striatum und Kortex für den Konsolidierungsprozess der prozeduralen Gedächtnisspuren (Doyon, Penhune und Ungerleider, 2003). Eine weitere Aufgabe des Konsolidierungsprozesses ist die Verknüpfung der neuen Information mit bereits vorhandenen Inhalten des Langzeitgedächtnisses. Letztendlich ermöglichen all diese Vorgänge der Informationsverarbeitung den Abruf und die gezielte Wiedergabe der gebildeten Gedächtnisinhalte zu einem späteren Zeitpunkt.

### **2.2.3 Gedächtnisentwicklung bei Kindern**

Während der Entwicklung werden hohe Ansprüche an die kognitive Leistungsfähigkeit eines Kindes gestellt. Um den Anforderungen gerecht zu werden, vollbringt das kindliche Gedächtnis täglich enorme Leistungen. Es muss in relativ kurzer Zeit eine Vielzahl neuer Informationen und Eindrücke aufnehmen und verarbeiten. Dies spricht für eine besonders hohe Plastizität des kindlichen Gehirns (Li, Brehmer, Shing, Werkle-Bergner, Lindenberger, 2006; Brehmer, Muller, Lindenberger, 2007). Entsprechend der Erforschung des erwachsenen Gedächtnisses, wurden in den letzten Jahren bereits einige Studien mit Kindern verschiedener Altersgruppen durchgeführt, sowohl in Bezug auf das deklarative als auch auf das prozedurale Gedächtnis. Dabei stellten sich einige Unterschiede in der Entwicklung und Reifung beider Gedächtnissysteme heraus.

Die Entwicklung des prozeduralen Gedächtnisses beginnt mit der Geburt und ist bereits früh in der Kindheit ausgereift, wohingegen sich das deklarative Gedäch-

nis stetig mit dem Alter weiterentwickelt (Meulemans, Van der Linden und Perruchet, 1998; Thomas und Nelson, 2001; Murphy, McKone und Slee, 2003; Vinter und Detable, 2003). Vorhanden ist die Fähigkeit zum expliziten Lernen allerdings auch bei kleinen Kindern, und der Entwicklungsprozess zeigt sich bereits im Laufe der Kindheit. Die Entwicklung ist jedoch eng an das Alter gebunden und nicht mit dem expliziten Wissen eines Erwachsenen vergleichbar (Parkin und Streete, 1988; Schneider und Pressley, 1997). Eine mögliche Erklärung für die altersabhängigen Unterschiede im Bereich des deklarativen Gedächtnisses ist das Fehlen von grundlegendem Wissen oder Strategien bei jüngeren Kindern. Diese tragen zur Bewältigung von Aufgaben bei und werden erst mit zunehmendem Alter entwickelt (Murphy et al., 2003; Thomas et al., 2004).

Die Studien mit Kindern über das prozedurale Gedächtnis ergaben kontroverse Ergebnisse. In einigen Studien wurde ein klarer Zusammenhang der impliziten Lernfähigkeit mit dem Alter oder dem Entwicklungsstadium gefunden, entsprechend den Ergebnissen zum deklarativen Gedächtnis. Hierzu wurde das Lernverhalten von Kindern unterschiedlicher Altersgruppen miteinander verglichen (Maybery, Taylor und O'Brien-Malone, 1995; Fletcher, Maybery und Bennett, 2000; Clohessy et al., 2001; Thomas und Nelson, 2001). Auf der anderen Seite liegen jedoch auch Studienresultate vor, die keinen Hinweis auf eine Altersabhängigkeit des impliziten Lernens lieferten (Meulemans et al., 1998; Vinter und Perruchet, 2000).

Um die prozedurale Gedächtnisbildung zu untersuchen kam die SRTT auch bei Kindern mehrfach zur Anwendung. In einer Studie mit Kindern im Alter von 6 bis 7 und 10 bis 11 Jahren wurde das implizite Lernen getestet und mit Erwachsenen verglichen. Der Lerneffekt wurde anhand der Reaktionszeiten gemessen, die für die vorbestimmte Sequenz gegenüber den Zufallssequenzen benötigt wurden. Die Ergebnisse zeigten hier eine vergleichbare Leistungssteigerung in allen drei Altersgruppen, wenn auch die Reaktionszeiten mit zunehmendem Alter stetig abnahmen (Meulemans et al., 1998). Dieses Ergebnis wurde ebenfalls in einer Studie mit vierjährigen Kindern repliziert (Thomas und Nelson, 2001) und bestätigte, dass bereits bei jungen Kindern die Fähigkeit zum impliziten Lernen vorhanden ist. Möglicherweise deutet dies auf eine besondere Bedeutung des prozeduralen Gedächtnisses für die kindliche Entwicklung hin. Es wurde vermutet, dass die Fähigkeit zum impliziten Lernen in der frühen Kindheit besonders wichtig für die Anpas-

sung eines Kindes an seine Umwelt ist, sowie für das Erlernen von Verhaltensmustern und für die emotionale und kognitive Entwicklung (Chandler, 1993; Krist, Fieberg und Wilkening, 1993; Perruchet und Vinter, 1998; Vinter und Perruchet, 2000; Thomas und Nelson, 2001).

Die prozedurale Gedächtnisentwicklung wurde auch auf neurophysiologischer Ebene untersucht. Dabei wurde beispielsweise eine Zunahme der Stoffwechselraten und der Myelinisierung von Neuronen der Basalganglien beobachtet, welche in engem Zusammenhang mit dem prozeduralen Gedächtnis stehen. Es zeigte sich, dass die Entwicklung dieser Gehirnregionen bereits mit dem ersten Lebensjahr abgeschlossen ist (Sidman und Rakic, 1982; Chugani, Phelps und Mazziotta, 1987). Einige Studien führten sogar zu dem Ergebnis, dass das prozedurale Gedächtnis bereits mit einem Alter von drei Jahren voll entwickelt ist und von diesem Alter an auf einem konstanten Niveau persistiert (Meulemans, Van der Linden und Perruchet, 1998; Thomas und Nelson, 2001; Murphy, McKone und Slee, 2003; Vinter und Detable, 2003). Andererseits liegen auch hier Studienergebnisse vor, die gegen diesen frühen Abschluss der prozeduralen Gedächtnisentwicklung sprechen. Diese beziehen sich auf weitere Gehirnstrukturen, die für das prozedurale Gedächtnis bedeutend sind, wie den Nukleus caudatus und dessen Verbindungen zum präfrontalen Kortex. Für diese Gehirnareale konnte eine anhaltende Entwicklung bis ins Erwachsenenalter nachgewiesen werden. Dies widerspricht der Theorie, dass die Reifung des prozeduralen Gedächtnisses schon in der Kindheit abgeschlossen ist und damit im Gegensatz zur Entwicklung des deklarativen Gedächtnisses steht, die bis ins Erwachsenenalter anhält (Yakovley und Lecours, 1967; Sowell et al., 1999; Olesen et al., 2003; Casey et al., 2004).

### **2.3 Schlaf und Gedächtnis**

Im Rahmen der Gedächtnisforschung belegen zahlreiche Studien die besondere Bedeutung des Schlafes für die Gedächtnisbildung. In vielen dieser Studien zeigte sich eine aktive Verstärkung der Gedächtniskonsolidierung durch den Schlaf (Plihal und Born, 1997; Maquet, 2001; Stickgold, 2005; Walker und Stickgold, 2006). Seither wurden einige Konzepte zur Erklärung dieses positiven Einflusses entwickelt und untersucht.

Der positive Einfluss des Schlafes zeigte sich sowohl für die deklarative als auch für die prozedurale Gedächtniskonsolidierung (Maquet, 2001; Stickgold, 2005; Born, Rasch und Gais, 2006). Um diesen Zusammenhang experimentell zu untersuchen, lernten Probanden am Abend neue Gedächtnisinhalte und wurden nach einem Retentionsintervall, das sie entweder schlafend oder wachend verbrachten, erneut getestet. Probanden, die nach der Lernphase geschlafen hatten, zeigten eine deutlich bessere Gedächtnisleistung als Probanden, die nach dem Lernen wach geblieben waren. Um beeinflussende Faktoren wie den zirkadianen Rhythmus oder Müdigkeit auszuschalten, wurde in einem verbesserten Studiendesign eine zweite Nacht vor den erneuten Test gesetzt, in der beide Probandengruppen schliefen (Drosopoulos et al., 2006; Gais et al., 2006). Die Ergebnisse wurden auch in diesem Studiendesign bestätigt.

Die Bedeutung des Schlafes für das prozedurale Gedächtnis wurde beispielsweise anhand der SRTT getestet. Die Probanden, die nach dem erstmaligen Durchführen dieser motorischen Aufgabe geschlafen hatten, erlangten mehr implizites Wissen über die Sequenzabfolge, als wenn sie nach dem Lernen wach geblieben waren. Dies zeigte sich durch verkürzte Reaktionszeiten bei der Präsentation der gelernten Sequenz und stark verlängerte Reaktionszeiten, wenn diese Sequenz verändert wurde (Peigneux et al., 2003). Dabei wurde in einigen Studien beim Abruf nicht nur der bloße Erhalt des Gelernten beobachtet, sondern sogar eine Leistungssteigerung. Diese Resultate weisen darauf hin, dass auch nach Abschluss des aktiven Trainings eine unbewusste Wiederholung des Gelernten stattfindet, die durch den Schlaf verstärkt wird. Dieser Prozess führt letztendlich zu einer verbesserten Leistung beim späteren Abruf (Korman et al., 2003; Stickgold, 2005; Walker und Stickgold, 2006).

Wie bereits besprochen, liegen dem Erlernen prozeduraler Inhalte zwei Prozesse zugrunde: zuerst der aktive Lernprozess während des Trainings und danach ein langsamer Konsolidierungsprozess, der nach dem Üben unbewusst andauert. Dieser Vorgang erlaubt erst die Speicherung im Langzeitgedächtnis und bewirkt eine mögliche Verbesserung der Abrufleistung (Karni und Sagi, 1993; McGaugh, 2000; Ungerleider et al., 2002; Walker und Stickgold, 2004). Die Abhängigkeit dieses Vorgangs vom Schlaf wurde mehrfach erwiesen (Karni und Sagi, 1993; Karni et al., 1998; Korman et al., 2003). Einige Studien zeigen, dass insbesondere der Schlaf direkt im Anschluss an das Training entscheidend für die Langzeit-

speicherung ist (Karni et al., 1998; Gais et al., 2000; Stickgold et al., 2000; Fischer et al., 2002; Walker et al., 2002). Vermutlich äußert sich der Konsolidierungsprozess auf Verhaltensebene auf unterschiedliche Art und Weise: zum einen kommt es zu einer Stabilisierung der neu gelernten Gedächtnisspur. Dieser Prozess ist möglicherweise unabhängig vom Schlaf. Zum anderen kommt es zu einer Verbesserung und Verstärkung der Erinnerung, die nur durch eine Schlafperiode erreicht werden kann (Walker, 2005).

### **2.3.1 Bedeutung der Schlafphasen für die Gedächtniskonsolidierung**

Die Fortschritte in der Schlafforschung führten zu der Frage, ob nur bestimmte Anteile des Schlafes die Gedächtnisbildung unterstützen. Die Bedeutung des REM-Schlafes gegenüber dem SWS wird diskutiert und bereits in einigen Studien getestet. Für die Untersuchung dieser Problematik wurde das Wissen über den zirkadianen Rhythmus und die Verteilung der Schlafphasen über die Nacht gezielt genutzt. Da in der ersten Hälfte der Nacht bekanntlich der SWS und in der zweiten Nachthälfte der REM-Schlaf vorherrscht, wurde in diesen Studien die Nacht „halbiert“, um den Einfluss der beiden Schlafstadien getrennt voneinander zu erfassen (Yaroush et al., 1971; Barrett und Ekstrand, 1972).

Um den Einfluss des SWS zu testen, lernten die Probanden am Abend vor dem Schlafengehen und wurden nach der ersten Nachthälfte für die Abfrage geweckt. Für die Untersuchung des REM-Schlafes wurden die Probanden nach der ersten Nachthälfte geweckt und lernten erst dann die Aufgabe. Am nächsten Morgen wurden sie erneut getestet. Durch dieses Untersuchungsparadigma konnte gezeigt werden, dass der SWS der ersten Nachthälfte, im Gegensatz zum REM-Schlaf der zweiten Nachthälfte, einen positiven Einfluss auf die deklarative Gedächtnisbildung ausübt. In weiterführenden Untersuchungen mit identischem Versuchsaufbau und dem zusätzlichen Einbezug prozeduraler Aufgaben stellte sich eine fördernde Funktion des REM-Schlafes auf die Konsolidierung dieser Aufgaben heraus (Plihal und Born, 1997). Auch in diesen erweiterten Studien profitierte die deklarative Gedächtnisbildung vom Deltaschlaf (Plihal und Born, 1997; Plihal und Born, 1999; Wagner et al., 2001; Wagner et al., 2002).

In einer weiteren Studie konnte ein kausaler Zusammenhang zwischen den langsamen EEG-Potentialen, die charakteristisch für den Tiefschlaf sind, und der

deklarativen Gedächtniskonsolidierung gezeigt werden. Durch transkraniell applizierte Potentiale von 0,75 Hz wurde hier der Anteil an SWS experimentell erhöht. Dies führte zu einer Steigerung des deklarativen Wissens bei der Abfrage. Auf der anderen Seite wurde durch eine Stimulation mit Wellen von 5 Hz, die insbesondere während des REM-Schlafes vorkommen, eine Abnahme des SWS induziert. In diesem Fall verblieb die deklarative Gedächtnisleistung auf einem unveränderten Niveau (Marshall, Helgadottir, Mölle und Born, 2006).

Die besondere Bedeutung des REM-Schlafes für den prozeduralen Konsolidierungsprozess wurde mittlerweile in zahlreichen Untersuchungen bestätigt (Karni et al., 1994; Smith, 1995). Deutlich wurde dieser Einfluss beispielsweise in einer Studie, die zum Test eine visuelle Strukturdiskriminierungsaufgabe nutzte (Stickgold, Whidbee, Schirmer, Patel und Hobson, 2000). Der Schlaf führte nach Durchführung der Aufgabe zu einer Verbesserung, der Schlafentzug hingegen zum vollkommenen Verlust der Fortschritte, die im Training erlangt worden waren. Es hat sich mittlerweile gezeigt, dass überwiegend der REM-Schlaf für die Verbesserung der impliziten Leistung verantwortlich ist (Karni et al., 1994). Der Einfluss des REM-Schlafes auf das deklarative Gedächtnis ist fraglich. Es liegen Studienergebnisse vor, die sowohl eine Verschlechterung der deklarativen Gedächtnisleistung nach gezieltem REM-Schlafentzug anzeigen (Empson und Clark, 1970; Greenberg et al., 1972) als auch Ergebnisse, in denen sich kein Einfluss des REM-Schlafes auf dieses Gedächtnissystem zeigte (Tilley und Empson, 1981; Greenberg et al., 1983).

### **2.3.2 Mechanismen der schlafbezogenen Gedächtniskonsolidierung**

Um die positiven Effekte des Schlafes auf das Gedächtnis zu erklären, wurden schon einige Konzepte entwickelt. Jenkins und Dallenbach (1924) vertraten die Meinung, dass der Schlaf das Gedächtnis vor dem Eingang neuer Informationen abschirmt, welche bereits bestehende Erinnerungen beeinflussen können. Auch unabhängig vom Schlaf wurde bereits gezeigt, dass die Speicherung von Informationen durch nachfolgendes Lernen oder Lesen gestört wird (Underwood, 1957). Diese Erkenntnisse bestärkten die Theorie der Schutzfunktion des Schlafes für das Gedächtnis. Später wurde dem Schlaf eine unterstützende Funktion von Mechanismen des Gehirns zugeschrieben, die den Zerfall von Nervenspuren ver-

hindern sollen (Ekstrand et al., 1977). Heute wird über das Vorhandensein aktiver Konsolidierungsprozesse während des Schlafes diskutiert, die dann verstärkt auftreten und für den Gedächtnisprozess essentiell scheinen (Maquet, 2001; Walker und Stickgold, 2004). In Experimenten mit Ratten wurde diese aktive Rolle des Schlafes untersucht und mehrfach bestätigt (Wilson und McNaughton, 1994; Sutherland und McNaughton, 2000). Um dies auf den Menschen zu übertragen und auch hier eine aktive Rolle des Schlafes zu belegen, wurden ebenfalls einige Studien durchgeführt. Bei der Durchführung einer Positronen-Emissions-Tomographie-Studie (PET-Studie) mit Menschen zeigte sich, dass während des Schlafes eine Reaktivierung genau der Gehirnareale erfolgte, welche bereits bei der Lernphase aktiviert waren. Diese Reaktivierung konnte in der Region des Hippokampus während Phasen von SWS beobachtet werden (Peigneux et al., 2004). Die Ergebnisse bestätigten sich in weiteren Studien (Mölle et al., 2004; Rasch et al., 2007; Ji und Wilson, 2007). Auf die gleiche Weise konnte dieser aktive Prozess für das prozedurale Gedächtnis nachgewiesen werden. Während des REM-Schlafes fand eine Reaktivierung der Gehirnregionen statt, die beim Lernen prozeduraler Aufgaben aktiviert waren (Maquet et al., 2000). Des Weiteren konnte in Studien mit der SRTT eine Korrelation zwischen der Ausprägung der neuronalen Reaktivierung während des Schlafes und dem erreichten Niveau an implizitem Wissen hergestellt werden (Maquet, Laureys et al., 2000; Peigneux, Laureys et al., 2003).

### **2.3.3 Interaktion zwischen den Gedächtnissystemen**

Auch bezüglich der Schlaffunktion wurde das Zusammenspiel der Gedächtnissysteme näher untersucht. Im Gegensatz zu explizitem Lernen, das Konzentration und Aufmerksamkeit erfordert, erfolgt implizites Lernen unbewusst. In einer Studie wurde eine Nummerreduktionsaufgabe implizit gelernt und entweder nach einem Schlaf- oder einem Wachintervall erneut getestet. Durch den Schlaf konnte hier, trotz des unbewussten Lernprozesses, ein explizites Wissen über die Struktur der Sequenz erreicht werden. Die Reaktionszeiten waren jedoch langsamer im Vergleich zu den Probanden, die kein explizites Wissen erlangt hatten. Demnach fand bei den Probanden, die geschlafen hatten, kein prozeduraler Lernprozess statt. Es wurde vermutet, dass die deklarative Gedächtnisbildung im Schlaf zu einer ver-

minderten Ausbildung der prozeduralen Anteile geführt hat (Born und Wagner, 2004).

Um zu testen wie sich implizites und explizites Lernen auf die prozedurale Gedächtnisbildung auswirken, wurde in einer weiteren Studie eine eigentlich prozedurale Aufgabe unter zwei verschiedenen Voraussetzungen gelernt. Nur ein Teil der Probanden wurde vor Versuchsbeginn darüber informiert, dass die Sequenzabfolge vorbestimmten Regeln folgt. Somit war diesen Teilnehmern bewusst, dass ein Lernvorgang stattfinden sollte. Die zweite Probandengruppe bekam im Voraus keine Instruktionen, wodurch bei diesen Teilnehmern ein impliziter Lernvorgang induziert wurde. Nach dem Retentionsintervall wurde in dieser Gruppe eine verbesserte implizite Leistung beobachtet, jedoch erst nach einer bestimmten Zeit. Diese Verbesserung war unabhängig vom Schlaf. Unter der expliziten Lernbedingung konnte bei der Abfrage ebenfalls eine Leistungssteigerung beobachtet werden, allerdings nur wenn im Anschluss an das Training geschlafen wurde. Diese Leistungssteigerung stand in einer engen Beziehung zu der Dauer des Non-REM-Schlafes. Demnach ergab sich eine Abhängigkeit der deklarativen Gedächtnisbildung vom Schlaf, während die prozedurale Gedächtnisbildung sowohl während eines Wach- als auch während eines Schlafintervalles stattfand (Robertson, Pascual-Leone und Press, 2004).

In einer weiteren Studie wurden die Beobachtungen von Robertson (2004) aufgegriffen und weitergeführt. Für den Versuch wurde eine modifizierte Variante der SRTT verwendet. In dieser sollte der Proband nach dem üblichen Training der SRTT die Abfolge der geübten Sequenz voraussagen (Cohen, Ivry und Keele, 1990; Cleeremans und McClelland, 1991; Jimenez et al., 1996). So wurde getestet, ob die Durchführung der SRTT auch zu einem expliziten Wissen über die Sequenzabfolge führen kann. Ein wesentlicher Unterschied im Studiendesign, verglichen mit Robertson (2004), bestand darin, dass die Probanden erst nach dem Lernen über das Vorhandensein der Sequenz informiert wurden. Der Lernprozess erfolgte somit auf einer rein impliziten Ebene. Trotz dieser Abweichung beim Lernen konnten dennoch ähnliche Ergebnisse verzeichnet werden. Ein explizites Wissen nach implizitem Lernen konnte nur nach einer Schlafperiode erreicht werden. In diesem Fall wurde vermutlich durch den Schlaf eine Umwandlung der implizit gebildeten Gedächtnisspuren in explizites Wissen induziert. Eine Abweichung ergab sich für den prozeduralen Gedächtnistest, da weder in der Schlaf-

noch in der Wachgruppe ein Anzeichen von stattgefundenem implizitem Lernen beobachtet wurde. Diese Ergebnisse deuteten auf Interaktionen der Gedächtnissysteme während des Schlafes hin, die möglicherweise zu einer Verdrängung der prozeduralen zu Gunsten der deklarativen Gedächtniskonsolidierung während des Schlafes führen (Fischer, Drosopoulos, Tsen und Born, 2006).

## **2.4 Schlaf und Gedächtnis bei Kindern**

Betrachtet man die zahlreichen Studienergebnisse über die Beziehungen zwischen dem Schlaf und der Gedächtnisbildung bei Erwachsenen, stellt sich die Frage, wie diese Prozesse bei Kindern zusammenarbeiten. Die enormen Fähigkeiten des kindlichen Gedächtnisses und das spezielle Schlafverhalten eines Kindes lässt eine besondere Rolle des Schlafes für deren Gedächtnisbildung vermuten.

Auch während der Entwicklung konnte eine förderliche Wirkung des Schlafes auf plastische Prozesse des Gehirns nachgewiesen werden. Unter anderem zeigten sich nach dem Schlaf Veränderungen an Synapsen, die vermutlich an der Gedächtnisbildung beteiligt sind (Marks, Shaffery, Oksenberg, Speziale und Roffwarg, 1995; Frank, Issa und Stryker, 2001; Shaffery, Sinton, Bissette, Roffwarg und Marks, 2002). Die Untersuchung des Schlafeinflusses auf die Gedächtnissysteme bei Kindern zeigte eine eindeutige Förderung des deklarativen Gedächtnisses durch den Schlaf, wohingegen die prozedurale Gedächtnisbildung eher von wachen Phasen nach dem Lernen profitierte (Fischer, Wilhelm und Born, 2007; Backhaus, Hoeckesfeld, Born, Hohagen und Junghanns, 2008; Wilhelm, Diekelmann und Born, 2008).

In Bezug auf das deklarative Gedächtnis entstanden bei den Kindern vergleichbare Ergebnisse zu denen der Erwachsenen. Dies konnte erstmals in einer Studie mit 9 bis 12 jährigen Kindern mittels eines Wortpaarassoziationstest gezeigt werden. Eine Leistungssteigerung des expliziten Wissens wurde nur nach einem Schlafintervall erreicht. Die Steigerung war unabhängig davon, ob direkt im Anschluss an das Lernen geschlafen wurde oder erst nach einigen Stunden (Backhaus et al., 2008). Diese Ergebnisse wurden in weiteren Studien zur deklarativen Gedächtnisbildung im Schlaf bestätigt (Backhaus, Hoeckesfeld, Born, Hohagen und Junghanns, 2008; Wilhelm, Diekelmann und Born, 2008).

Auch der Einfluss des Schlafes auf das prozedurale Gedächtnis bei Kindern wurde bereits in einigen Studien untersucht. Diese führten zu gegensätzlichen Ergebnissen, verglichen mit den Studien der Erwachsenen. Es zeigte sich, dass die Bedeutung des Schlafes für die prozedurale Gedächtnisbildung vermutlich altersabhängig ist. Im Gegensatz zu den Erwachsenen konnte bei den Kindern kein positiver Einfluss des Schlafes auf dieses Gedächtnissystem festgestellt werden. Beim erneuten Abruf der gelernten Aufgabe zeigten ausschließlich die Kinder, die nach dem Training wach geblieben waren, eine bessere oder zumindest unveränderte implizite Leistung. Dies wurde beispielsweise in einer SRTT-Studie mit 7-11 Jahre alten Kindern und Erwachsenen gezeigt. Die implizite Leistung der Kinder in der Schlafgruppe war in dieser Studie sogar deutlich beeinträchtigt bei der Abfrage am darauf folgenden Morgen. Dieses Ergebnis lieferte einen weiteren Unterschied zu den Versuchen mit Erwachsenen, die nach einem reinen Wachintervall ihre Lernfortschritte aus dem morgendlichen Training vollkommen verloren hatten (Fischer, Wilhelm und Born, 2007). Mit einer weiteren Methode, der Finger-Sequenzaufgabe, wurde das implizite Lernen bei 6- bis 8-jährigen Kindern und Erwachsenen getestet. Auch hier konnten nur die Kinder, die wach geblieben waren, ihre prozedurale Gedächtnisleistung verbessern. Die Erwachsenen zeigten die erwartungsgemäße Leistungssteigerung nach dem Schlaf (Wilhelm, Diekelmann und Born, 2008).

Die Ergebnisse führten zu der Annahme, dass bei Kindern keine direkte Abhängigkeit des prozeduralen Gedächtnisses vom Schlaf besteht. Parallel zu den Humanstudien konnten diese Befunde auch bei Tieren bestätigt werden. In einem Versuch mit Vogelkindern zeigte sich, dass der Schlaf die Gedächtnisbildung für neu gelernte „Lieder“ während der Entwicklung möglicherweise auf andere Weise beeinflusst, als es bei bereits ausgewachsenen Vögeln geschieht. Die Vogelkinder lernten am Abend ein vorgegebenes Lied. Am nächsten Morgen konnten nur die Vögel, die über Nacht wachgeblieben waren, das Lied wiedergeben. Die jungen Vögel, die nach Erlernen des Liedes geschlafen hatten, konnten das Lied am folgenden Morgen nicht wiedergeben und zeigten somit eine ähnliche Entwicklung wie die Kinder in Humanstudien zum impliziten Lernen. Bei der weiteren Beobachtung der Vögel und erneutem Training verschwand die Erinnerungslücke im Laufe des Tages, und es kam bis zum Abend zu einer deutlichen Verbesserung der Leistung. Letztendlich wurde das Lied nach 3 Monaten von jenen Vogel-

kindern am besten wiedergegeben, die sich zu Beginn der Studie nach dem Schlaf scheinbar am wenigsten an das Lied erinnern konnten (Deregnacourt, Mitra, Feher, Pytte und Tchernichovski, 2005). Somit zeigte der Schlaf in diesem Versuch eine positive Auswirkung auf die Langzeitspeicherung des gelernten Liedes.

Die Frage, warum sich bei den Kindern kein direkter förderlicher Einfluss auf die prozedurale Gedächtniskonsolidierung finden lässt, bleibt weiterhin unklar. Eine mögliche Ursache für die Abweichung des prozeduralen Gedächtnisses kann in der besonderen Lernweise der Kinder liegen. Trotz einer generellen Verbesserung der Reaktionszeiten waren die teilnehmenden Kinder meist langsamer als die Erwachsenen und mussten genauer über die erforderlichen Bewegungsabläufe nachdenken. Vermutlich überwog daher bei den Kindern der deklarative Lernprozess während des Lernens der Aufgabe. Bei Erwachsenen stellte sich wesentlich schneller ein Automatismus der Bewegungsabläufe ein, durch den kein weiteres Bewusstsein für die Abläufe erforderlich war. Somit überwog in diesem Fall der prozedurale Lernprozess. In einer Studie zum impliziten Lernen wurde gezeigt, dass verschiedene Lernweisen zu Veränderungen auf neuronaler Ebene führen (Albouy, Sterpenich, Balteau, Vandevallée, Desseilles, Dang-Vu, et al., 2008). Bei Probanden, die sehr langsam lernten, zeigte sich während des gesamten Lernvorganges eine verstärkte Aktivierung des Hippokampus. Im Gegensatz dazu nahm bei schnell lernenden Teilnehmern die Aktivität des Hippokampus, zugunsten einer gesteigerten Aktivität des Striatums, schnell ab. Die Ergebnisse der Abfrage ergaben nur bei den Probanden, die schnell gelernt hatten, eine verbesserte implizite Leistung nach einem Schlafintervall. Vermutlich führt die gleichzeitige Beanspruchung der verschiedenen Gehirnareale, sowohl beim initialen Lernen als auch während der Konsolidierung, zu einem Konflikt in der Informationsverarbeitung. Bei Kindern könnte die verzögerte Automatisierung der motorischen Abläufe und die damit verbundene Dominanz hippokampaler Gehirnaktivierung während des Lernens zu einem verstärkten Konflikt zwischen den beiden Gedächtnissystemen führen. Der hohe Anteil an SWS, der bekanntlich in kausaler Beziehung zum deklarativen Gedächtnis steht, könnte weiterhin besonders die Konsolidierung expliziter Inhalte verstärken. Somit führt möglicherweise sowohl die besondere Lernweise der Kinder als auch deren charakteristische Verteilung der Schlafstadien dazu, dass die kompetitive Interaktion zwischen den beiden Gedächtnissystemen

verstärkt ist. Auf Verhaltensebene würde dies eine Dominanz deklarativer Gedächtniskonsolidierung zulasten prozeduraler Konsolidierung bedingen.

Diese Problematik bildet den Hintergrund der folgenden Arbeit. In der vorgestellten Studie wird sowohl die deklarative als auch die prozedurale Gedächtniskonsolidierung einer motorischen Aufgabe in Abhängigkeit vom Schlaf bei Kindern im Alter von 6 bis 8 Jahren untersucht. Als Gedächtnistest wurde eine modifizierte SRTT genutzt, die nach einem Schlaf- oder einem Wachintervall erneut durchgeführt wurde. In der SRTT wurde eine festgelegte Sequenz im Wechsel mit eingestreuten Zufallssequenzen präsentiert. Das implizite Lernen wurde durch die Messung der Reaktionszeiten getestet, durch den Vergleich der Antwortgeschwindigkeiten bei Erscheinen der Sequenz gegenüber den Zufallssequenzen. Neben der prozeduralen Gedächtnisbildung wurde auch das explizite Wissen über die gelernte Sequenz geprüft. Dies wurde bei der Abfrage anhand eines freien Abrufs des Wissens und einer Vorhersageaufgabe getestet.

Folgende Hypothesen wurden erstellt:

1. Die implizite Gedächtnisbildung ist bei Kindern unabhängig vom Schlaf.
2. Der Schlaf fördert bei Kindern die expliziten Aspekte einer prozeduralen Aufgabe.
3. Die explizite Gedächtnisbildung wird durch den SWS gefördert.

### **3 Methoden**

Im folgenden Kapitel wird der gesamte Versuchsaufbau erläutert, mit einer Beschreibung der Stichprobe und deren Rekrutierung, der Kontrollvariablen und des Ablaufes der Versuchstage. Des Weiteren wird der Aufbau der angewandten SRTT und die statistische Auswertung der gewonnenen Daten aufgeführt.

#### **3.1 Stichprobe und Rekrutierung**

An der vorliegenden Studie nahmen 29 Kinder im Alter von 6 bis 8 Jahren teil (Durchschnittsalter  $\pm$  Standardabweichung: 7,52 Jahre  $\pm$  0,17 Jahre). Davon waren 11 Teilnehmer weiblichen Geschlechts und 18 männlichen Geschlechts.

Das Anwerben der Teilnehmer erfolgte über zahlreiche Aushänge an Orten, an denen sich Kinder und deren Eltern typischerweise aufhalten wie beispielsweise Kindergärten, Schulen, Schwimmbäder und Spielwarengeschäfte. Des Weiteren wurden Elternbriefe verfasst, die nach Absprache mit der jeweiligen Schulleitung direkt in den Klassen der zu rekrutierenden Altersgruppen verteilt wurden.

Die Ausschlusskriterien für die Teilnahme waren das Vorliegen von Lern- und Verhaltensstörungen, Schlafstörungen, chronischen Erkrankungen oder eine dauerhafte Medikamenteneinnahme. Aufgrund der Ähnlichkeit zur Aufgabe, die im Experiment verwendet wurde, mussten auch Kinder, die bereits Klavier spielen konnten, ausgeschlossen werden.

Diese Voraussetzungen wurden im Gespräch mit den Eltern und durch Fragebögen ermittelt. Eltern und Kinder wurden bei einem persönlichen Gespräch und durch einen schriftlichen Informationsbogen ausführlich über den Versuchsaufbau und -ablauf aufgeklärt. Die Einwilligung der Teilnahme erfolgte schriftlich durch die Erziehungsberechtigten. Die Teilnehmer erhielten eine Aufwandsentschädigung.

#### **3.2 Kontrollvariablen**

Zur Einschätzung der motorischen Fähigkeiten und des Entwicklungsstandes musste jedes Kind vor der Teilnahme an dem eigentlichen Versuch einen Vortest absolvieren. Dieser fand bei den Kindern zu Hause statt. Zur Anwendung kam der Intelligenztest Skala 1 (CFT1) nach der Vorlage von R.B. Cattell. Der CFT1 dient der Bestimmung der Grundintelligenz durch Erfassung von Denkproblemen, dem

Herstellen von Beziehungen, dem Erkennen von Regeln und Merkmalen und der schnellen Wahrnehmung dieser. Der Test sollte insbesondere die Fähigkeit eines Kindes prüfen, nonverbale Problemstellungen zu erfassen und zu lösen. Dafür mussten innerhalb einer für jede Altersgruppe definierten Zeit fünf verschiedene Einzelaufgaben gelöst werden.

Während des eigentlichen Experiments wurde von jedem Versuchsteilnehmer unmittelbar vor dem Lernen und vor der Abfrage ein Befindlichkeitsfragebogen ausgefüllt. Durch diesen Fragebogen wurde die momentane Stimmung (1. nicht gut, 2. geht so, 3. sehr gut), die Müdigkeit (1. sehr müde, 2. etwas müde, 3. nicht müde) und die Motivation (1. keine Lust, 2. ein bisschen, 3. große Lust) wiedergegeben.

Von den Eltern wurde am jeweiligen Versuchstag bzw. der Versuchsnacht ein Protokoll geführt. Dieses sollte mögliche Störungen des Kindes während der Versuchsnacht festhalten und den Tagesablauf zwischen dem Lernen und der Abfrage der Kinder aus der Wachgruppe aufführen.

### **3.3 Versuchsaufbau**

Das Experiment wurde unter zwei verschiedenen Versuchsbedingungen durchgeführt. Die Kinder wurden daher randomisiert in zwei Gruppen aufgeteilt. Nur eine der Gruppen sollte nach dem Lernen schlafen. Im Gegensatz dazu sollte die andere Gruppe nach einem wachen Intervall erneut getestet werden (14 Teilnehmer in der Schlafbedingung, 15 Teilnehmer in der Wachbedingung). Somit wurde die Aufgabe in der einen Gruppe am Abend gelernt, in der zweiten Gruppe am Morgen. Die Gedächtnisaufgabe war in beiden Gruppen identisch. Alle Versuchsabschnitte fanden bei den Teilnehmern zu Hause statt, um bestmögliche Versuchsbedingungen zu schaffen und die Kinder nicht zu verunsichern. Um das EEG-Gerät kennen zu lernen und zur Vorbereitung auf die eigentliche Versuchsnacht, mussten die Kinder der Schlafgruppe im Voraus eine Nacht mit im Gesicht angebrachten Elektroden schlafen. Die Zeiten wurden auf die individuellen Schlafgewohnheiten der Kinder und auf die Schulzeiten abgestimmt. In der Schlafgruppe startete das Experiment 90 Minuten vor der individuellen Schlafenszeit des Kindes. Im Durchschnitt fand der Lernabschnitt zwischen 19.30 Uhr und 20.00 Uhr statt. In vorheriger Absprache mit den Eltern waren die Kinder schon vor dem Ver-

suchsbeginn für das Schlafengehen vorbereitet. Nach Anbringen der Elektroden für die Schlafaufzeichnung fand der Lernabschnitt statt, der zwischen 20 bis 30 Minuten in Anspruch nahm. Danach gingen die Kinder zu Bett. Um die Aufnahme von nachfolgenden visuellen Informationen zu verhindern, durften die Kinder nach dem Lernen nicht mehr lesen. Die Abfrage fand am nächsten Morgen statt, mindestens 45 Minuten und maximal 90 Minuten nach dem Aufwachen. Meist wurde die Abfrage gegen 7.30 Uhr durchgeführt. Dieser Versuchsabschnitt dauerte 15 bis 20 Minuten. Die Kinder in der Wachbedingung lernten die Aufgabe am Morgen, mindestens 45 Minuten nach dem Aufstehen, und wurden nach 8-10 Stunden erneut getestet. Das Lernen fand meist gegen 7.30 Uhr am Morgen statt. Im Wachintervall zwischen dem Lernen und der Abfrage durfte kein Mittagsschlaf gehalten werden.

### **3.4 Aufzeichnung des Schlafes**

Für die polysomnographische Aufzeichnung wurde ein tragbares EEG-Gerät verwendet (SOMNOscreen EEG 10-20). Abgeleitet wurden das EEG, EMG und EOG durch insgesamt 12 Elektroden, 6 davon am Schädel (C3, C4, P3, P4, F3, F4) und 6 Elektroden im Gesicht (2 am Auge, 2 am Kinn, je eine an der Nase und der Stirn). Die Aufzeichnungen wurden offline anhand der Kriterien von Rechtschaffen und Kales (1968) ausgewertet.

### **3.5 Gedächtnistest**

Als Gedächtnisaufgabe wurde eine deterministische SRTT adaptiert nach Robertson genutzt, die noch auf die geplante Anwendung bei Kindern angepasst wurde. Die Kinder bekamen die Instruktion, dass die Aufgabe die Geschwindigkeit testet, in welcher sie ganz bestimmte Tasten des Computers drücken können. Zur Durchführung des Tests saß der Versuchsteilnehmer in einem ruhigen Raum, vor sich ein Computerbildschirm mit einer Tastatur. Auf dem Bildschirm erschienen vier horizontal angeordnete Kästchen, denen jeweils ein Knopf auf der Tastatur zugeordnet war (VBNM). Die Kinder wurden dazu aufgefordert, die Finger ihrer nicht dominanten Hand mit Ausnahme des Daumens auf jeweils eine der Tasten zu legen. Der visuelle Stimulus für die Kinder stellte einen Fisch dar, welcher abwechselnd an einer der vier möglichen Positionen erschien. Auf dieses Signal

sollten sie so schnell und genau als möglich reagieren, indem sie die zugehörige Taste drückten. Der Fisch verblieb bis zum Drücken der Taste an derselben Stelle und konnte erst dann an seiner nächsten Position erscheinen. Unmittelbar vor dem Beginn des Tests wurde eine kurze Übungssequenz durchgeführt, um die eigentliche Aufgabe kennen zu lernen.

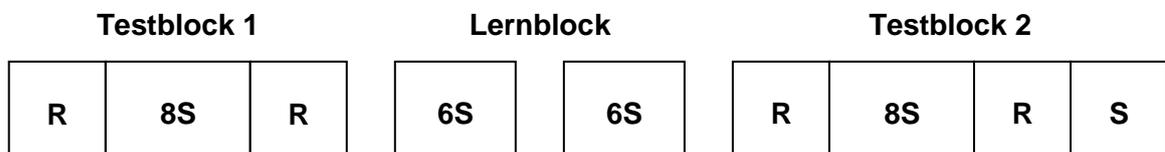
Der Lernabschnitt enthielt eine vorbestimmte Sequenz und 8 Zufallssequenzen, die aus jeweils 12 Signalpräsentationen bestanden. Die geregelte Sequenz war somit aus 4 Triplets aufgebaut. Diese Sequenz wurde in der Lernphase insgesamt 30-mal präsentiert. In der Zufallssequenz folgte die Präsentation des Fisches keinen Regeln. Der Lernabschnitt war auf vier Blöcke verteilt, die durch eine Pause von 30 Sekunden voneinander getrennt wurden. Der Beginn der Übung und das Ende der Pausen zwischen den einzelnen Blöcken wurde durch einen Ton signalisiert. Die Abfolge bestand aus einem Testblock jeweils am Anfang und am Ende der Aufgabe und zwei reinen Lernblöcken dazwischen. In Testblock 1 wurden zunächst zwei Zufallssequenzen präsentiert, gefolgt von acht Durchläufen der vorbestimmten Sequenz. Darauf folgten zwei weitere Zufallssequenzen. In den beiden Lernblöcken wurde ausschließlich die vorbestimmte Sequenz präsentiert, jeweils sechsmal in Folge. Der Testblock 2 war identisch zu Testblock 1 aufgebaut, jedoch wurde hierbei die Sequenz am Ende des Blockes zwei weitere Male wiederholt.

Die Abfrage verteilte sich auf drei Blöcke: den Testblock 3, den freien Abruf (Free Recall) und die Vorhersage (Generation). Der Testblock 3 war identisch zum Testblock 1 des Lernabschnittes. Im freien Abruf (Free Recall) sollten sich die Teilnehmer frei und ohne eine weitere Signalpräsentation an die Abfolge der gelernten Sequenz erinnern und diese über die Tastatur eingeben. Dafür wurde der Bildschirm mit dem Beginn dieses Aufgabenteils schwarz, der Anfang und das Ende der Aufgabe wurden durch einen Ton signalisiert. In diesem Block waren insgesamt 48 Tastendrucke möglich. Die Kinder wurden dazu instruiert, die Finger wie gewohnt auf die Tasten zu legen und möglichst ohne darüber nachzudenken die Tasten zu drücken. In der Vorhersage (Generation) wurden 12 Triplets je zweimal getestet. Dafür wurden vor der Vorhersage zwei Positionen des Triplets vorgegeben, indem der Fisch automatisch an den beiden ersten Stellen eines Triplets nacheinander auftauchte. Auf der zweiten Position blieb der Fisch stehen. Darauf-

hin sollte die dritte Position des Triplets aus dem Gedächtnis vorhergesagt und die entsprechende Taste gedrückt werden.

Das implizite Lernen wurde anhand der Reaktionszeiten gemessen, durch den Vergleich der geregelten Sequenz zu den Zufallssequenzen. Das explizite Lernen wurde anhand der korrekt wiedergegebenen Triplets beim freien Abruf und in der Vorhersageaufgabe getestet. Eine Übersicht des Ablaufes der SRTT wird in Abbildung 4 dargestellt.

**Lernen:**



**Abfrage:**



Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus;

R = Random, S = Sequenz, P = Pause, FreeRecall = freier Abruf,  
Generation = Vorhersage.

### **3.6 Datenreduktion und statistische Analyse**

Zur Messung der prozeduralen Gedächtnisleistung wurde als abhängige Variable die Differenz der mittleren Reaktionszeiten zwischen der Sequenz und den Zufallssequenzen berechnet. Um den impliziten Wissenszuwachs während des Lernens zu analysieren, wurde eine 2x2 Analyse of Variance (ANOVA) mit Messwiederholung auf einem Faktor (Bedingung: Schlaf/Wach; Zeit: Beginn Lernen/ Ende Lernen (messwiederholt)) durchgeführt.

Die Analyse des Zuwachses an implizitem Wissen über das Retentionsintervall erfolgte durch eine 2x2 ANOVA mit Messwiederholung auf einem Faktor (Bedingung: Schlaf/Wach; Zeit: Ende Lernen/ Beginn Abfrage (messwiederholt)).

Die einzelnen Stufen der Faktoren wurden mittels posthoc t-Test auf statistische Unterschiede geprüft, falls die vorangegangene Variationsanalyse signifikante Unterschiede ergeben hatte.

Die beiden Bedingungen Schlaf/Wach wurden bezüglich ihres erlangten expliziten Wissens (freier Abruf/ Vorhersage) über die gelernte Sequenz mittels t - Test für abhängige Stichproben verglichen. Um den Zusammenhang zwischen den einzelnen Schlafparametern und des expliziten und impliziten Wissenszuwachses über das Retentionsintervall zu bestimmen, wurde Pearsons Korrelation verwendet.

Bezüglich der Störvariablen (Intelligenz, Stimmung, Müdigkeit, Motivation) wurden beide Experimentalgruppen mittels t-Test für unabhängige Stichproben auf signifikante Unterschiede geprüft.

### **3.7 Ethikantrag**

Der Ethikantrag wurde vor dem Beginn der Versuche gestellt und genehmigt (Aktenzeichen: 07-031).

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der SRTT, der Kontrollvariablen und der Schlafdaten aufgeführt.

### 4.1 Gedächtnisaufgabe

Anhand der SRTT wurde die implizite Gedächtnisleistung während des Lernens und nach dem Retentionsintervall getestet und das erreichte explizite Wissen.

#### 4.1.1 Abfrage des impliziten Lernens

Während des Lernabschnitts zeigte sich bei den Kindern beider Versuchsbedingungen eine implizite Leistungssteigerung. Dies wurde anhand der Differenz zwischen der motorischen Fähigkeit (Reaktionszeit Sequenz - Reaktionszeit Zufallssequenz) zu Beginn und am Ende des Lernens ersichtlich. Dabei ergab sich kein signifikanter Leistungsunterschied zwischen den beiden Bedingungen (Schlaf: Beginn  $90,34 \pm 120,84$  msec, Ende  $-157,02 \pm 207,46$ ; Wach: Beginn  $25,25 \pm 269,48$  msec, Ende  $-135,02 \pm 252,95$  msec; Haupteffekt Beginn/Ende  $F(1,25) = 14,497$ ,  $p = 0,001$ ; Haupteffekt Schlaf/Wach  $F(1,25) = 0,662$ ,  $p = 0,423$ ). Der Vergleich der Differenzen der Reaktionszeiten für die Sequenz und die Zufallssequenzen wird auch in Tabelle 1 wiedergegeben.

Differenz Sequenz - Zufallssequenz	Bedingung	Mittelwert (ms)	Standardabweichung (ms)
Beginn des Lernens	Schlaf	90,34	120,84
	Wach	25,25	269,48
	Total	54,20	215,34
Ende des Lernens	Schlaf	-157,02	207,46
	Wach	-135,02	252,95
	Total	-144,80	229,75

Tabelle 1: Differenz der Reaktionszeiten vom Beginn und Ende des Lernens.

#### 4.1.2 Abfrage des impliziten Wissens nach dem Retentionsintervall

Um das erlangte implizite Wissen nach dem Retentionsintervall zu testen, wurden die Reaktionszeitdifferenzen vom Lernen mit denen von der Abfrage verglichen. Der Vergleich erfolgte anhand der Antwortgeschwindigkeiten vom letzten Lernblock des Lernabschnittes und dem ersten Lernblock der Abfrage. Gemessen wurde die Differenz der Reaktionszeit für die geregelte Sequenz und für die Zufallssequenzen. Hieraus ergab sich keine signifikante Verbesserung der Reaktionszeit bei der Abfrage im Vergleich zum Lernen (Lernen:  $-144,80 \pm 229,75$  msec; Abfrage:  $-107,11 \pm 157,26$  msec;  $F(1,25) = 0,335$ ,  $p = 0,568$ ). Auch in diesem Vergleich zeigte sich kein signifikanter Leistungsunterschied zwischen den beiden Bedingungen (Schlaf: Lernen  $-157,02 \pm 207,46$ , Abfrage  $-191,97 \pm 127,69$  msec; Wach: Lernen  $-135,02 \pm 252,95$  msec, Abfrage  $-39,22 \pm 148,35$  msec;  $F(1,25) = 1,548$ ,  $p = 0,225$ ).

Der implizite Lerneffekt über das Retentionsintervall sowie der Vergleich zwischen den beiden Versuchsbedingungen wird in Tabelle 2 und Abbildung 5 dargestellt.

Differenz Sequenz - Zufallssequenz	Bedingung	Mittelwert (ms)	Standardabweichung (ms)
Ende des Lernens	Schlaf	-157,02	207,46
	Wach	-135,02	252,95
	Total	-144,80	229,75
Beginn der Abfrage	Schlaf	-191,97	127,69
	Wach	- 39,22	148,35
	Total	-107,12	157,26

Tabelle 2: Darstellung der Reaktionszeitdifferenzen (gelernte Sequenz minus Zufallssequenz) der beiden Versuchsbedingungen im Vergleich des Lernens mit der Abfrage nach dem Retentionsintervall.

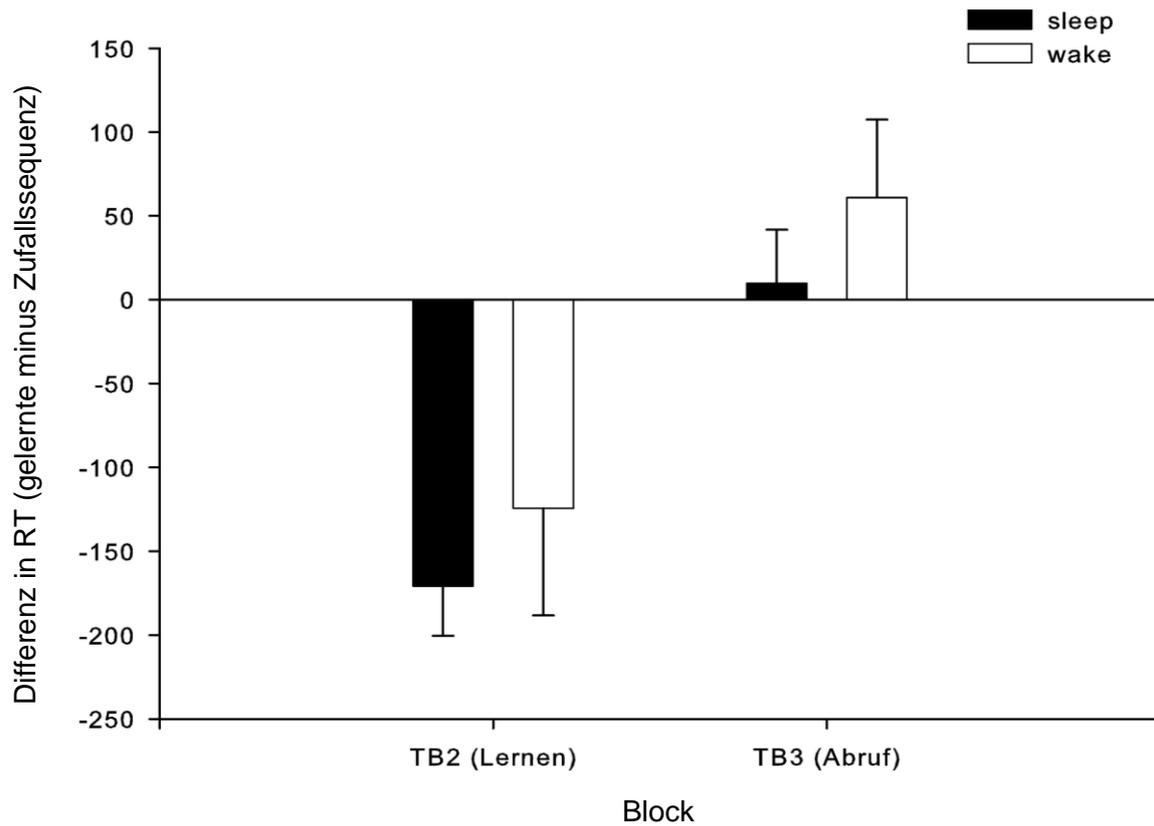


Abbildung 5: Graphische Darstellung der Reaktionszeitdifferenzen zwischen der gelernten und der Zufallssequenz vor und nach dem Retentionsintervall. TB2 = Testblock 2 des Lernabschnittes; TB3 = Testblock 3 der Abfrage.

### 4.1.3 Freier Abruf des expliziten Wissens

Im freien Abruf wurde das explizite Wissen über die Abfolge der gelernten Sequenz getestet. Hierfür wurden die korrekt eingegebenen Triplets der Sequenz unter Ausschluss von wiederholten Triplets ermittelt. In der Schlafbedingung wurden im Durchschnitt 7,78 ( $\pm 0,67$ ) richtige Triplets eingegeben, in der Wachgruppe 8,31 ( $\pm 0,44$ ) richtige Triplets (Darstellung in Tabelle 3). Die Ergebnisse ergaben keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Bedingungen ( $t = 0,669$ ,  $p > 0,45$ ).

	Bedingung	Mittelwert (ms)	Standardabweichung (ms)
Anzahl der korrekten Triplets	Schlaf	7,79	0,67
	Wach	8,31	0,44

Tabelle 3: Darstellung der korrekt wiedergegebenen Triplets beim freien Abruf.

### 4.1.4 Explizite Vorhersage der Sequenz

In diesem Aufgabenteil wurde durch eine Vorhersage der dritten Stelle eines Triplets die deklarative Gedächtnisleistung getestet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 4 aufgeführt. Die Kinder der Schlafgruppe konnten durchschnittlich 8,93 ( $\pm 0,66$ ) richtige Triplets vorhersagen, die Kinder der Wachgruppe 10,27 ( $\pm 0,643$ ). Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied der expliziten Leistung zwischen den beiden Bedingungen ( $t = -1,44$ ,  $p > 0,15$ ).

	Bedingung	Mittelwert (ms)	Standardabweichung (ms)
Anzahl der korrekten Triplets	Schlaf	8,93	0,67
	Wach	10,27	0,63

Tabelle 4: Darstellung der korrekt vervollständigten Triplets bei der Generation task.

## 4.2 Zusammenhang zwischen Schlaf und Gedächtnisbildung

Der Anteil der einzelnen Schlafphasen der Kinder aus der Schlafbedingung wird in Tabelle 1 aufgeführt. Es zeigte sich ein hoher Anteil an Tiefschlaf bei den Kindern, ersichtlich aus dem hohen Anteil der Schlafstadien 3 und 4. Im Durchschnitt wurden in der Versuchsnacht 11,6% ( $\pm 0,9\%$ ) der Schlafenszeit durch das Stadium 3 und 14,6% ( $\pm 1,7\%$ ) durch das Stadium 4 ausgemacht. Der REM-Schlaf betrug im Durchschnitt 20,8% ( $\pm 1,3\%$ ) der Gesamtschlafenszeit.

Bei der Auswertung der Schlafdaten im Zusammenhang mit der Gedächtnisleistung konnte eine signifikante Korrelation zwischen dem Schlafstadium 4 und der Leistung in der expliziten Vorhersageaufgabe gezeigt werden ( $p \leq 0,05$ ). Dieses Ergebnis wird in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Für die weiteren Schlafstadien ergab sich keine signifikante Korrelation zu der Abfrageleistung.

Schlafparameter	Mittelwert $\pm$ Standardabweichung
Gesamte Schlafenszeit in Minuten	595,39 $\pm$ 16,05
Schlaf-Latenz in Minuten	21,25 $\pm$ 3,88
SWS-Latenz in Minuten	22,25 $\pm$ 4,05
REM-Latenz in Minuten	171,86 $\pm$ 11,07
Wach in Minuten (%)	9,75 $\pm$ 3,73 (1,7 $\pm$ 0,6)
Stadium 1, Minuten (%)	20,89 $\pm$ 3,43 (3,6 $\pm$ 0,6)
Stadium 2, Minuten (%)	282,68 $\pm$ 16,33 (47,1 $\pm$ 2,0)
Stadium 3, Minuten (%)	68,74 $\pm$ 5,52 (11,6 $\pm$ 0,9)
Stadium 4, Minuten (%)	84,86 $\pm$ 8,52 (14,6 $\pm$ 1,7)
REM-Schlaf, Minuten (%)	124,75 $\pm$ 8,92 (20,8 $\pm$ 1,3)

Tabelle 5: Darstellung der Verteilung der Schlafphasen der Kinder aus der Schlafbedingung als absoluter Anteil und in Prozent.

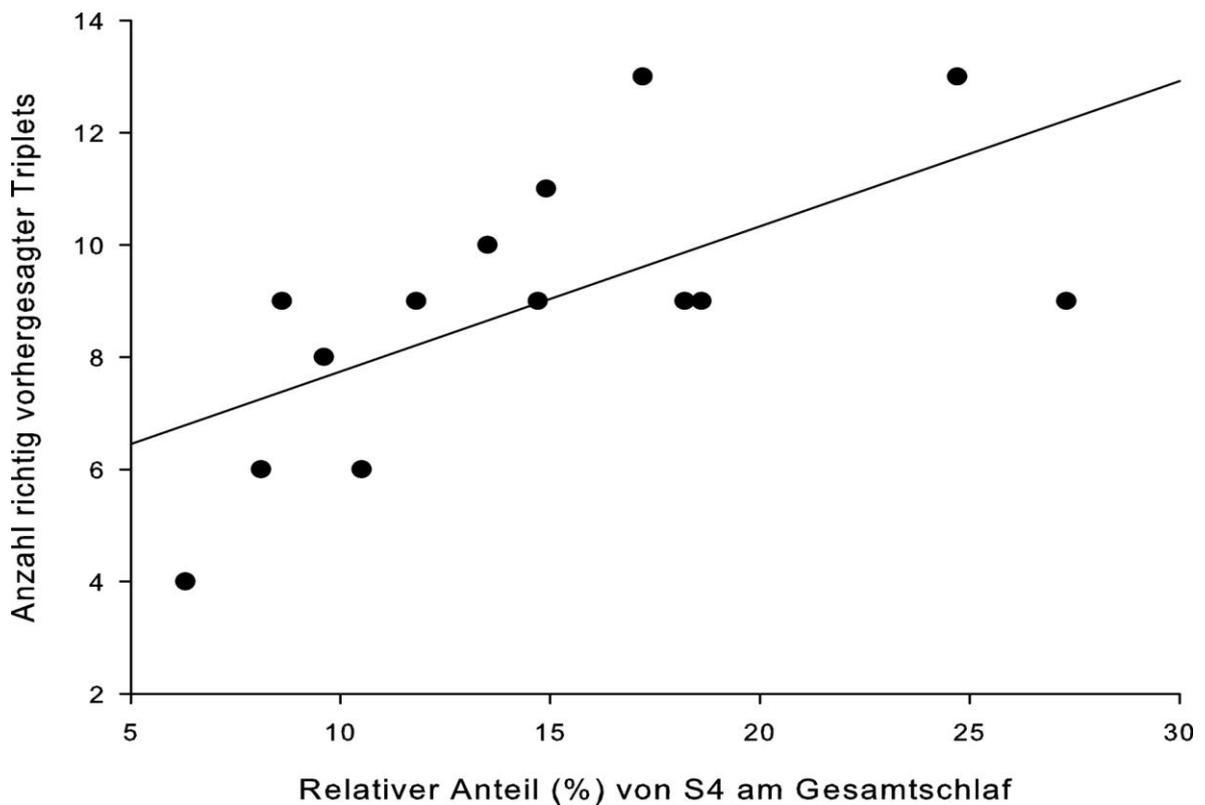


Abbildung 6: Graphische Darstellung der signifikanten Korrelation zwischen dem Anteil an Schlafstadium 4 und der expliziten Leistung bei der Vorhersageaufgabe.

### 4.3 Kontrollvariablen

Die Kontrollvariablen umfassen den Intelligenztest CFT1 und den Befindlichkeitsfragebogen.

#### 4.3.1 Befindlichkeitsfragebogen

In diesem Fragebogen wurden anhand einer dreistufigen Skala vor jedem Test die momentane Stimmung, die Müdigkeit und die Motivation zur Durchführung der Aufgabe erfragt. Für jeden Parameter gab es drei Antwortmöglichkeiten, die in Tabelle 6 mit den zugehörigen Punkten dargestellt werden. Die durchschnittliche Bewertung dieser Parameter durch die Kinder wird in Tabelle 7 aufgeführt. Die Auswertung des Fragebogens ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Bedingungen in allen erfragten Parametern ( $p > 0,1$ ). Dies zeigte sich sowohl für den Lernblock als auch für die Abfrage.

<b>Stimmung</b>	Gar nicht gut	Es geht so	sehr gut
<b>Müdigkeit</b>	sehr müde	etwas müde	gar nicht müde
<b>Motivation</b>	gar keine Lust	ein bisschen	große Lust
<b>Punkteverteilung</b>	1	2	3

Tabelle 6: Darstellung der Antwortmöglichkeiten des Befindlichkeitsfragebogen und der dazugehörigen Punkteverteilung.

<b>Lernen</b>	<b>Bedingung</b>	<b>Mittelwert (<math>\pm</math> Standardabweichung)</b>
<b>Stimmung</b>	Schlaf	2,71 ( $\pm$ 0,13)
	Wach	2,93 ( $\pm$ 0,67)
<b>Müdigkeit</b>	Schlaf	2,36 ( $\pm$ 0,13)
	Wach	2,60 ( $\pm$ 0,13)
<b>Motivation</b>	Schlaf	3,00 ( $\pm$ 0,00)
	Wach	2,93 ( $\pm$ 0,07)
<b>Abfrage</b>	<b>Bedingung</b>	<b>Mittelwert (<math>\pm</math> Standardabweichung)</b>
<b>Stimmung</b>	Schlaf	2,86 ( $\pm$ 0,00)
	Wach	2,80 ( $\pm$ 0,11)
<b>Müdigkeit</b>	Schlaf	2,71 ( $\pm$ 0,13)
	Wach	2,53 ( $\pm$ 0,17)
<b>Motivation</b>	Schlaf	2,79 ( $\pm$ 0,16)
	Wach	2,80 ( $\pm$ 0,11)

Tabelle 7: Darstellung der durchschnittlichen Befindlichkeitsbewertung der Kinder im Vergleich der Schlaf- und Wachbedingung.

### 4.3.2 Intelligenztest

Die Ergebnisse des Intelligenztestes (CFT1) ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Versuchsbedingungen in allen Teilaufgaben (Teilaufgabe 1  $t = -1,878$ ,  $p > 0,71$ ; Teilaufgabe 2  $t = -0,999$ ,  $p > 0,33$ ; Teilaufgabe 3  $t = 0,48$ ,  $p > 0,64$ ; Teilaufgabe 4  $t = 0,76$ ,  $p > 0,45$ ; Teilaufgabe 5  $t = 0,33$ ,  $p > 0,74$ ). In der Schlafgruppe wurden im Durchschnitt 49,0 Punkte ( $\pm 1,825$ ) erreicht und in der Wachgruppe 50,3 Punkte ( $\pm 1,530$ ). Insgesamt konnten in diesem Test 60 Punkte erreicht werden, für jede der fünf Aufgaben wurden maximal 12 Punkte vergeben. In Tabelle 8 werden die erlangten Punktzahlen in den einzelnen Aufgabenteilen und im gesamten Intelligenztest im Vergleich der beiden Versuchsgruppen dargestellt.

Aufgabenteil	Bedingung	Mittelwert ( $\pm$ Standardabweichung)
Teilaufgabe 1	Schlaf	9,38 ( $\pm 0,81$ )
	Wach	11,00 ( $\pm 0,46$ )
Teilaufgabe 2	Schlaf	9,71 ( $\pm 0,48$ )
	Wach	10,27 ( $\pm 0,30$ )
Teilaufgabe 3	Schlaf	8,64 ( $\pm 0,58$ )
	Wach	8,27 ( $\pm 0,53$ )
Teilaufgabe 4	Schlaf	10,85 ( $\pm 0,25$ )
	Wach	10,53 ( $\pm 0,34$ )
Teilaufgabe 5	Schlaf	10,43 ( $\pm 0,49$ )
	Wach	10,20 ( $\pm 0,49$ )
Gesamt	<b>Schlaf</b>	<b>49,00 (<math>\pm 1,83</math>)</b>
	<b>Wach</b>	<b>50,27 (<math>\pm 1,53</math>)</b>

Tabelle 8: Darstellung der erreichten Punktzahlen im Intelligenztest.

## 5 Diskussion

In dieser Studie wurde der Einfluss des Schlafes auf die Konsolidierung von impliziten und expliziten Aspekten einer prozeduralen Gedächtnisaufgabe bei Kindern getestet. Als Gedächtnisaufgabe wurde eine modifizierte SRTT nach Robertson verwendet. Die Probanden wurden randomisiert in zwei verschiedene Versuchsgruppen unterteilt. Eine Gruppe verbrachte das Retentionsintervall zwischen dem Lernen und der Abfrage schlafend, die zweite Gruppe wurde am Tag getestet und blieb somit nach dem Lernen wach. Bei der Abfrage wurde die prozedurale (Differenz der Reaktionszeiten: Random-Sequenz) und deklarative (Anzahl der korrekt wiedergegebenen bzw. vorhergesagten Triplets) Gedächtnisleistung der Kinder getestet.

Die Auswertung der motorischen Leistung nach dem Retentionsintervall ergab keinen signifikanten Effekt des Schlafes auf die prozedurale Konsolidierung. In beiden Versuchsgruppen zeigte sich eine vergleichbare motorische Leistung, die verglichen mit dem Lernblock auf einem unveränderten Niveau stand. Auch der Abruf der expliziten Leistung in der Vorhersageaufgabe und im freien Abruf zeigte keinen positiven Effekt des Schlafes auf die Konsolidierung.

Die Auswertung der Schlafdaten in Bezug auf die Gedächtnisleistung ergab jedoch eine signifikante Korrelation zwischen dem Anteil an SWS an der Schlafenszeit und der erreichten expliziten Leistung der Kinder bei der Vorhersageaufgabe.

Aufgrund früherer Studienergebnisse vermuteten wir, dass der Schlaf bei den Kindern keinen positiven Effekt auf die Konsolidierung von prozeduralen Gedächtnisinhalten ausübt, wie es im Gegensatz dazu bei Erwachsenen beobachtet wurde (Fischer, Wilhelm, Born, 2007; Wilhelm, Diekelmann, Born, 2008). Diese Vermutung bestätigte sich in unseren Ergebnissen, die keine Verbesserung der motorischen Leistung über das Retentionsintervall hinweg ergaben. Dies zeigte sich bei der Abfrage in einer vergleichbaren impliziten Leistung in beiden Versuchsbedingungen. Die generelle Fähigkeit der Kinder zum impliziten Lernen war jedoch durchaus vorhanden. Dies ergab die Auswertung der motorischen Leistung während des Lernabschnittes, die sich in beiden Versuchsgruppen im Verlauf des Lernblocks steigerte. Ersichtlich wurde diese motorische Leistungssteigerung durch die deutliche Verbesserung der Antwortgeschwindigkeiten bei Erscheinen der Sequenz im Verlauf des Lernens. Dieses Ergebnis entspricht früheren Stu-

dien, die eine frühe Entwicklung des prozeduralen Gedächtnisses in der Kindheit belegen (Meulemans et al., 1998; Vinter und Perruchet, 2000; Murphy et al., 2003).

Unsere Ergebnisse bezüglich des Schlafeffektes auf die Konsolidierung prozeduraler Gedächtnisinhalte entsprechen nicht den Beobachtungen früherer Studien, die diesen Zusammenhang beim motorischen Lernen bei Kindern untersuchten. In diesen Studien verbesserten die Kinder, die nach dem Lernen wach geblieben waren, ihre implizite Leistung beim Abruf, im Gegensatz zu den Schlafprobanden (Fischer, Wilhelm, Born, 2007; Wilhelm, Diekelmann, Born, 2008). Unsere Ergebnisse entsprechen eher einer weiteren aktuellen Kinderstudie von Prehn-Kristensen et al. (2009), die ebenfalls den Schlafeffekt bei einer motorischen Aufgabe untersuchten. In dieser Studie wurde mit Kindern im Alter von 10 bis 13 Jahren eine Spiegelzeichenaufgabe durchgeführt, um das prozedurale Gedächtnis zu testen. Die Abfrage nach dem Retentionsintervall ergab eine vergleichbare implizite Leistung in der Schlaf- und der Wachbedingung, so wie es auch in unserer aktuellen Studie beobachtet wurde. Dennoch besteht weiterhin die Frage, ob das prozedurale Gedächtnis während der Entwicklung vollkommen unabhängig vom Schlaf ist, oder ob dieses Gedächtnissystem auf eine andere Weise durch den Schlaf beeinflusst wird. Diese Möglichkeit wurde beispielsweise in einem Versuch mit Vogelkindern gezeigt. In der Studie wurde ein positiver Effekt des Schlafes auf die Langzeitspeicherung eines implizit gelernten Liedes beobachtet (Deregnacourt, Mitra, Feher, Pytte, Tchernichovski, 2005).

Um den fehlenden impliziten Effekt des Schlafes bei Kindern zu erklären, wird der Einfluss von Interaktionen zwischen dem deklarativen und dem prozeduralen Gedächtnis diskutiert. Durch die Beanspruchung beider Gedächtnissysteme und den dazugehörigen Gehirnarealen während des motorischen Lernens kann sich eine kompetitive Beeinträchtigung des Konsolidierungsprozesses entwickeln. Man vermutet, dass die Interaktion aufgrund einer Dominanz in der Verarbeitung der expliziten Komponenten einer motorischen Aufgabe zu einer Verdrängung der prozeduralen Konsolidierung führt. Dies kann sowohl während des Lernens auftreten als auch während des weiteren Konsolidierungsprozesses im Schlaf. In der bereits erwähnten Studie von Prehn-Kristensen et al. (2009) wurde in der Auswertung der Aspekt der Interaktion betrachtet. Sie diskutierten die Studienergebnisse anhand der Anforderungen ihrer Aufgabe an das Gedächtnis. In ihrer Studie wurde eine

Spiegelzeichenaufgabe genutzt mit einem geringen expliziten Anteil. Daher vermuteten sie, dass nahezu ausschließlich implizit gelernt wurde und keine Interaktion zwischen den Gedächtnissystemen entstehen konnte. Dies würde die vergleichbare Leistung der beiden Versuchsbedingungen erklären (Prehn-Kristensen et al., 2009). Auch in der bereits erwähnten Studie mit 6 bis 8 jährigen Kindern von Wilhelm, Diekelmann und Born (2008), wurde vermutet, dass der fehlende Effekt des Schlafes bei den Kindern durch eine kompetitive Interaktion zwischen den Gedächtnissystemen entstanden war. In dieser Studie wurde als Gedächtnisaufgabe eine Finger-Sequenzaufgabe genutzt, die eine starke explizite Komponente beinhaltet. Die Kinder der Schlafgruppe konnten ihr implizites Wissen nicht verbessern, wohingegen die Kinder der Wachgruppe ihre motorische Leistung über das Retentionsintervall hinweg steigerten. Die Gedächtnisleistung der Kinder wurde in dieser Studie mit der Leistung von Erwachsenen verglichen. Im Gegensatz zu den Kindern zeigte sich bei den erwachsenen Teilnehmern ein deutlicher impliziter Lerneffekt durch den Schlaf (Wilhelm, Diekelmann, Born, 2008). Dieser implizite Effekt des Schlafes bei Erwachsenen, der bei Kindern scheinbar ausbleibt, stellt einen klaren Unterschied zwischen Erwachsenen und Kindern in Bezug auf die prozedurale Gedächtnisbildung dar. Ein weiterer Unterschied zu Erwachsenen findet sich bei Kindern in der Verteilung der Schlafphasen über eine Nacht. Der Schlaf bei Kindern ist durch einen besonders hohen Tiefschlafanteil gekennzeichnet (Ohayon et al., 2004). Wir vermuteten daher, dass die kompetitive Interaktion der Gedächtnissysteme beim motorischen Lernen bei Kindern durch die hohe Tiefschlafquote besonders ausgeprägt ist. Die Bedeutung des SWS für die deklarative Konsolidierung kann die Dominanz über die prozedurale Konsolidierung weiter erklären. Es ist möglich, dass die Kinder aus diesem Grund in ihrer impliziten Leistung nicht vom Schlaf profitieren konnten.

Dieser Zusammenhang zwischen den Schlafstadien und der Konsolidierung beim motorischen Lernen wurde in einer Studie von Yordanova et al. (2008) deutlich, die eine Nummerreduktionsaufgabe durchführten. In der Studie wurde der Einfluss des frühen und SWS-reichen Schlafes mit dem Einfluss des späten Schlafes, der durch den REM-Schlaf dominiert wird, verglichen. Es wurde getestet, ob die Probanden durch das Lernen einer prozeduralen Aufgabe ein explizites Wissen entwickeln können. Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigte sich diese Entwicklung nur bei den Probanden, die in der ersten Nachthälfte geschlafen hatten und somit

einen höheren Anteil ihres Schlafes im SWS verbracht hatten. Die Probanden der zweiten Versuchsgruppe, die in der späten Nachthälfte schliefen, entwickelten nur ein explizites Wissen, wenn ihr Schlaf einen niedrigen Anteil an REM-Phasen enthielt (Yordanova, Kolev, Verleger, Bataghvra, Born und Wagner, 2008).

Dieser Hintergrund bildet die Grundlage unserer Studie. Wir vermuteten, dass die Kinder durch den Schlaf über das Retentionsintervall profitieren und ein explizites Wissen über die Sequenzabfolge entwickeln können. Daher wurde in unserer Studie, neben dem impliziten Wissen, auch die explizite Komponente der motorischen Aufgabe abgefragt. Bei Erwachsenen wurde dieses Vorgehen in ähnlicher Weise bereits getestet. Der positive Effekt des Schlafes auf die expliziten Aspekte der motorischen Aufgabe wurde mehrfach ersichtlich. In diesen Studien konnten nur die Probanden, die nach dem motorischen Lernen geschlafen hatten, ein explizites Wissen über die Aufgabe erreichen (Born und Wagner, 2004; Robertson, Pascual-Leone und Press, 2004; Fischer, Drosopoulos, Tsen und Born, 2006).

Für die Kinder unserer Studie bestätigte sich diese Vermutung nicht. Die Ergebnisse unserer Schlafgruppe beim expliziten Abruf ergaben kein besseres explizites Wissen im Vergleich mit der Wachgruppe. Dies zeigte sich in beiden expliziten Aufgabenteilen, sowohl im freien Abruf als auch in der Vorhersageaufgabe. Andererseits konnten unsere Erwartungen, bezüglich des besonderen Einflusses des SWS auf die deklarative Konsolidierung, bestätigt werden. Unter Einbezug der Schlafdaten zeigte sich eine Korrelation des Schlafstadiums 4 mit der expliziten Leistung der Kinder bei der Vorhersageaufgabe. Diese Korrelation entspricht den Ergebnissen der oben erwähnten Studie von Yordanova et al. (2008) und bestätigt die große Bedeutung des SWS für die deklarative Gedächtniskonsolidierung.

Eine mögliche Erklärung unserer Ergebnisse kann in der Schwierigkeit unserer Aufgabe liegen. Es wurde eine modifizierte SRTT nach Robertson verwendet, die in dieser Weise bisher nur bei Erwachsenen getestet wurde. Vermutlich war diese Aufgabe zu komplex aufgebaut, um einen expliziten Lernprozess zu induzieren, trotz der Anpassung der Aufgabe an die Durchführung mit Kindern. Zwischen die einzelnen Präsentationen unserer Sequenz, die gelernt werden sollte, wurden zahlreiche Zufallssequenzen eingestreut. Wir vermuten, dass der ständige Wechsel die Kinder beim Lernen beeinträchtigt hat und sie daher kein explizites Wissen entwickelten, wie es in den früheren Studien bei Erwachsenen beobachtet worden

ist. Die noch grob entwickelte Motorik der Kinder dieses Alters liefert einen weiteren Kritikpunkt. Das schnelle und korrekte Drücken der Tasten erforderte ein gewisses Maß an Feinmotorik, das bei den Kindern in diesem Alter möglicherweise noch nicht ausreichend vorhanden ist. Dies wirkte sich auch auf die Lerngeschwindigkeit der Kinder aus. Die Durchführung der Aufgabe erfolgte allgemein sehr langsam und dauerte durchschnittlich zwanzig bis dreißig Minuten. Durch das langsame Lernen konnte sich vermutlich kein automatisierter Bewegungsablauf einstellen. In einer früheren Studie wurde gezeigt, dass dieser Automatismus der Bewegungen bedeutend für den motorischen Lernprozess ist. Die Ergebnisse dieser Studie ergaben nur bei schnell lernenden Probanden einen impliziten Lerneffekt durch den Schlaf (Albouy, Sterpenich, Balteau, Vandevallée, Desseilles, Dang-Vu et al., 2008). Vermutlich wurde durch die langsame Ausführung der Aufgabe und die fehlende Automatisierung kein prozeduraler Lernprozess ausgelöst, wodurch sich folglich auch kein explizites Wissen über die Sequenz generieren konnte. Dies kann eine weitere Erklärung für den fehlenden Leistungsunterschied zwischen unserer Schlaf- und Wachgruppe liefern.

Eine weitere Überlegung betrifft den expliziten Anteil unserer Aufgabe. Die verwendete SRTT war eine sehr implizit aufgebaute Aufgabe. Daher war die explizite Komponente in ihrer Anforderung an das Gedächtnis möglicherweise zu gering, um einen Lernprozess zu generieren, ähnlich der Aufgabenstellung von Prehn-Kristensen (2009) in ihrer Studie mit Kindern.

Neben diesen aufgeführten Schwierigkeiten des Lernens konnten auch während des Abrufs weitere Beeinflussungsfaktoren entstanden sein. Die kompetitiven Interaktionen konnten möglicherweise auch während des Abrufs stattfinden. In unserer Studie wurde im Abfrageblock zuerst die implizite Leistung getestet. Die Interaktion konnte somit durch den Test des impliziten Wissens unmittelbar vor der expliziten Abfrage entstanden sein, im Sinne einer proaktiven Interferenz. Dieses Vorgehen hat möglicherweise eine Störung des expliziten Abrufes bewirkt und somit unsere Ergebnisse beeinflusst.

Um mögliche Störfaktoren auszuschließen und um eine bestmögliche standardisierte Durchführung zu gewährleisten, wurden im Voraus einige Vorkehrungen getroffen. Alle Versuchsabschnitte wurden bei den Kindern zu Hause durchgeführt, in ihrer gewohnten Umgebung. Vor dem eigentlichen Versuch fand ein

Treffen mit dem jeweiligen Kind und dessen Eltern statt, um sich kennen zu lernen und eine Vertrauensbasis zwischen dem Versuchsleiter und dem Kind zu schaffen. Dadurch sollte erreicht werden, dass die Kinder sich während des Versuchs wohl fühlen um ihre bestmögliche Leistung zu erbringen. Diese Versuchsplanung führte außerdem dazu, dass alle Kinder unter den gleichen Bedingungen teilnehmen konnten. Bei dem ersten Treffen wurde ein Vortest mit den Kindern durchgeführt. Zwischen den teilnehmenden Kindern, die im Alter von 6 bis 8 Jahren waren, bestanden aufgrund der Altersspanne einige Unterschiede im Entwicklungsstand. Ein Teil der Kinder ging schon zur Schule und konnte schon schreiben, einige der Kinder besuchten noch den Kindergarten. Daher wurde im Voraus der Intelligenztest durchgeführt, um schwerwiegende Entwicklungsunterschiede zwischen den Kindern aufzudecken. Dies erfolgte bei jedem Kind auf identische Weise und unter standardisierten Bedingungen. Keines der Kinder hatte Probleme bei der Durchführung des Intelligenztests, und die Auswertung ergab keine gravierenden Leistungsunterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen. Von den Eltern wurde für jedes Kind ein Fragebogen zur Gesundheit und zu psychologischen Eigenschaften ausgefüllt, um mögliche beeinflussende Faktoren zu ermitteln. Auch hier zeigten sich keine außergewöhnlichen Auffälligkeiten. Die Kinder mit einer Lern- oder Verhaltensstörung, mit Schlafstörungen oder chronischen Erkrankungen wurden bereits im Voraus von der Teilnahme ausgeschlossen

Um Faktoren wie die Müdigkeit, die Stimmung oder die Motivation zu prüfen, wurde von jedem Kind vor dem Versuch ein Befindlichkeitsfragebogen ausgefüllt. Dieser war auf die Anwendung bei Kindern ausgerichtet. Die Auswertung dieser Fragebögen ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Es wurde überwiegend eine gute Motivation und Stimmung angegeben. Der Faktor „Müdigkeit“ kann dennoch zu einer Beeinflussung des Versuchs geführt haben. Die Kinder benötigten ungefähr zwanzig Minuten für das Lernen. Dadurch fiel es ihnen teilweise schwer, eine dauerhafte Konzentration aufzubauen, trotz der Pausen zwischen den einzelnen Lernblöcken. Die Kinder der Schlafgruppe lernten abends unmittelbar vor dem Schlafengehen und waren folglich schon etwas müde, auch wenn dies in unserem Befindlichkeitsfragebogen meist verneint wurde. Möglicherweise wurde die Konzentration dadurch weiter eingeschränkt.

Um ein standardisiertes Vorgehen zu gewährleisten, wurde jedes Kind während der Vorbereitung auf den Versuch bestmöglich und auf die gleiche Weise motiviert. Hierfür wurde im Voraus ein Schema besprochen, das eine gleiche Behandlung jedes Kindes sicherstellen sollte. Dies wurde unter anderem durch den Aufbau der Aufgabe erreicht, in der jedem Kind ein vorgegebener Text zur Erklärung vorgelesen wurde. Zur weiteren Motivation wurde als Stimulus, der in der Aufgabe präsentiert wurde, ein Motiv gewählt, das den Kindern aus Büchern und Medien bekannt war. Zwischen den Lernblöcken wurden weitere Figuren zum Ansporn und zum Lob eingespielt. In den Pausen wurden die Kinder ebenfalls gelobt und weiter zu einer möglichst schnellen und genauen Durchführung der Aufgabe motiviert. Für die Vorbereitung auf den Versuch wurde den Kindern viel Zeit gelassen und jeder Schritt genau erklärt. Direkt vor dem Versuchsbeginn wurden die Kinder dazu aufgefordert, alle vorhandenen Fragen zu stellen, bis die Aufgabe genau verstanden war. Zur Übung erfolgte vor der eigentlichen Aufgabe eine kurze Übungssequenz. Die benötigten Tasten, die gedrückt werden sollten, waren bunt markiert. Der Umgang mit dem Computer war dem Großteil der Kinder bereits vertraut.

Das Tragen der EEG-Elektroden wurde zuvor in einer Probenacht getestet. Jedes Kind durfte in seiner gewohnten Umgebung schlafen. Dadurch sollten das EEG und die Schlafumgebung als Störfaktoren für die Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden. Die Versuchszeiten waren auf die normale Schlafenszeit der Kinder abgestimmt. Am Morgen wurde bei beiden Versuchsbedingungen mindestens 60 Minuten nach dem Aufwachen mit der Aufgabe begonnen. Dieses standardisierte Vorgehen und die individuelle Anpassung der Versuchszeiten an jedes Kind, macht eine Störung der Ergebnisse durch diese Faktoren unwahrscheinlich. Eine Beeinflussung durch den zirkadianen Rhythmus kann nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Die Kinder der wachen Bedingung wurden selbstverständlich nicht vom Schlaf depriviert, sondern wurden am Tag getestet. Dies führte dazu, dass die Wachgruppe am Morgen gelernt hat und abends abgefragt wurde. Dieser Ablauf erfolgte in der Schlafgruppe genau umgekehrt. Dennoch war die Leistung beider Versuchsgruppen während des Lernens vergleichbar und ohne signifikante Unterschiede. Auch in früheren Studien gab es keine Hinweise auf eine Beeinflussung des Lernens oder der Abfrage durch die Tageszeit,

sowohl bei prozeduralen als auch bei deklarativen Aufgaben (Robertson, 2004; Gais, Lucas und Born, 2006; Fischer, Drosopoulos, Tsen und Born, 2006).

In unserer Studie finden sich einige Ansätze für die Verbesserung künftiger Studien mit Kindern. Die Gedächtnisaufgaben müssen besser an das Alter und die damit verbundenen motorischen Fähigkeiten angepasst werden um den Ablauf des Lernens zu optimieren. Dies könnte beispielsweise durch geringere Anforderungen an die Feinmotorik erreicht werden, damit die Hauptaufmerksamkeit tatsächlich auf den Stimulus der Aufgabe gerichtet ist. Dadurch kann ein automatischer Bewegungsablauf entstehen.

Um die Interaktionen zwischen den Gedächtnissystemen während der Entwicklung näher zu beschreiben, sollten noch weitere Studien durchgeführt werden, insbesondere unter Einbeziehung der expliziten Aspekte bei der Abfrage. Hier könnte im Versuchsablauf variiert werden, indem das explizite Wissen zu Beginn des Abfrageblocks getestet wird.

## 6 Zusammenfassung

Der positive Einfluss des Schlafes auf die Gedächtniskonsolidierung wurde in bisherigen Studien bei Erwachsenen mehrfach nachgewiesen, sowohl für das deklarative als auch für das prozedurale Gedächtnis. Auch in den wenigen Studien, die mit Kindern verschiedener Altersgruppen durchgeführt wurden, zeigte sich eine Förderung der deklarativen Gedächtnisbildung durch den Schlaf. Im Gegensatz zu Erwachsenen wurde bei den Kindern bislang jedoch kein positiver Effekt des Schlafes auf die Konsolidierung von prozeduralen Gedächtnisinhalten beobachtet. Um diese Ergebnisse zu erklären, wurde in mehreren Studien der Einfluss von kompetitiven Interaktionen zwischen den Gedächtnissystemen diskutiert, die insbesondere beim motorischen Lernen entstehen. Das Überwiegen der Konsolidierung expliziter Aspekte einer motorischen Aufgabe während des Schlafes wurde als ein möglicher Grund für den fehlenden impliziten Effekt des Schlafes angesehen. Diese aufgeführten Studienergebnisse bilden die Grundlage dieser Studie. Wir stellten die Hypothese auf, dass aufgrund der vorrangigen Konsolidierung der expliziten Anteile der motorischen Aufgabe die Konsolidierung der impliziten Anteile gestört wird. Dies würde dazu führen, dass die implizite Leistung nach einem schlafend verbrachten Retentionsintervall nicht verbessert ist. Andererseits stellten wir die Hypothese auf, dass bei den Kindern nach dem Schlaf ein explizites Wissen über die motorische Aufgabe entsteht. Dieser Vorgang kann durch den hohen Anteil des Schlafes an SWS bei Kindern zusätzlich unterstützt werden. Daher prüften wir beim Abruf nach dem Retentionsintervall neben der prozeduralen auch die deklarative Gedächtnisleistung der Kinder.

An der Studie nahmen 29 Kinder im Alter von 6 bis 8 Jahren teil. Als Gedächtnisaufgabe verwendeten wir eine modifizierte SRTT nach Robertson. Um gezielt den Einfluss des Schlafes zu untersuchen, wurden zwei verschiedene Versuchsgruppen gebildet. Eine Gruppe der Kinder durfte nach dem Lernen schlafen, die zweite Gruppe wurde am Tag getestet und blieb somit während des Retentionsintervalls wach. Die prozedurale Gedächtnisleistung wurde anhand der Antwortgeschwindigkeiten beurteilt, die für die vorbestimmte Sequenz gegenüber den Zufallssequenzen gemessen wurden. Das explizite Wissen wurde durch die korrekt wiedergegebenen Triplets bei einem freien Abruf und einer Vorhersageaufgabe geprüft.

Aus den Ergebnissen wurde kein Leistungsunterschied zwischen den beiden Versuchsbedingungen ersichtlich, weder bei den impliziten noch bei den expliziten Aufgabenteilen. Die Auswertung der Schlafdaten ergab jedoch eine positive Korrelation zwischen dem Anteil des Schlafstadiums 4 an der Schlafdauer und der Gedächtnisleistung der Kinder bei der expliziten Vorhersageaufgabe.

Somit zeigte sich auch in dieser Studie der fehlende positive Effekt des Schlafes auf die implizite Gedächtnisleistung während der Entwicklung. Unsere Hypothese, dass der Schlaf insbesondere die expliziten Aspekte einer motorischen Aufgabe verstärkt, konnte in dieser Studie nicht bestätigt werden. Die besondere Bedeutung des Schlafstadiums 4 für die deklarative Konsolidierung wurde jedoch anhand der Korrelation der expliziten Leistung mit dem Anteil des SWS am Gesamtschlaf der Kinder deutlich.

Eine mögliche Ursache für die hypothesenkonträren Ergebnisse kann unter anderem in der Schwierigkeit der Aufgabe und deren hohen Anforderung an die Feinmotorik liegen, die bei den Kindern vermutlich noch nicht ausreichend entwickelt ist. Weiterhin diskutierten wir die Möglichkeit einer proaktiven Interferenz beim Abruf der Aufgabe, die durch die Abfrage der impliziten Leistung unmittelbar vor der expliziten Abfrage induziert wurde.

## 7 Anhang

### 7.1 Befindlichkeitsfragebogen

VPnr \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Uhr

Schlaf/Wach

Lernen/Abfrage

#### Stimmung

Wie fühlst Du Dich?



Gar nicht gut



es geht so



sehr gut

#### Müdigkeit

Wie müde bist Du?



Sehr müde



etwas müde



gar nicht müde

#### Motivation

Wie viel Lust hast Du, die Aufgaben zu machen?



Gar keine Lust



ein bisschen



große Lust

## 8 Literaturverzeichnis

- Albouy G, Sterpenich V, Balteau E, Vandevallée G, Desseilles M, Dang-Vu T, et al. (2008) Both the Hippocampus striatum are involved in consolidation of motor sequence memory. *Neuron* 58: 261-72.
- Backhaus J, Hoeckesfeld R, Born J, Hohagen F und 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, 76–80.
- Barrett TR, Ekstrand BR (1972) Effect of sleep on memory. 3. Controlling for time-of-day effects. *J Exp Psychol*, 96, 321-327.
- Borbély AA (1984) *Das Geheimnis des Schlafs: Neue Wege und Erkenntnisse der Forschung*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.
- Born J, Wagner U (2004) Awareness in memory: being explicit about the role of sleep. *Trends in Cognitive Science* 8: 242-244.
- Born J, Rasch B, Gais S (2006) Sleep to remember. *Neuroscientist*, 12, 410-24.
- Bower GH, Thompson-Schill S, Tulving S (1994) Reducing retroactive interference: An interference analysis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20, 51-66.
- Brehmer Y, Li SC, Müller V, von Oertzen T, Lindenberger U (2007) Memory plasticity across the life span: uncovering children's latent potential. *Dev Psychol* 43: 465-478.
- Burgess N, Maguire EA, O'Keefe J (2002) The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*; 35:625e41.
- Buzsáki G (1996) The hippocampo-neocortical dialogue. *Cereb Cortex*, 6, 81-92.
- Casey BJ, Davidson MC, Hara Y, Thomas KM, Martinez A, Galvan A, et al. (2004) Early development of subcortical regions involved in non-cued attention switching. *Developmental Science* 7: 534-542.
- Chandler S (1993) Are rules and modules really necessary for explaining language? *Journal of Psycholinguistic Research* 22: 593-606.
- Chugani HT, Phelps ME, Mazziotta JC (1987) Positron emission tomography study of human brain functional development. *Ann Neurol* 22: 487-497.
- Cleeremans A, McClelland JL (1991) Learning the structure of event sequences. *Journal of Experimental Psychology: General* 120: 235-253.
- Clohessy AB, Posner MI, Rothbart MK (2001) Development of the functional visual field. *Acta Psychologica (Amsterdam)* 106: 51-68.
- Cohen NJ, Squire LR (1980) Preserved learning and retention of pattern analyzing skill in amnesia: Dissociation of knowing how and knowing that. *Science* 210: 207-210.
- Cohen A, Ivry RI, Keele SW (1990) Attention and structure in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 16, 17-30.

- Deregnacourt S, Mitra PP, Feher O, Pytte C, Tchernichovski O (2005) How sleep affects the developmental learning of bird song. *Nature*; 433: 710e6.
- Destrebecqz A, Cleeremans A (2001) Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure. *Psychonomic Bulletin and Review* 8: 343-350.
- Doyon J, Penhune V, Ungerleider LG (2003) Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*; 41: 252e62.
- Drosopoulos S, Schulze C, Fischer S, Born J (2006) Sleep's function in the spontaneous recovery and consolidation of memories. Submitted.
- Dudai Y (2004) The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Annu Rev Psychol* 55: 51-86.
- Ekstrand BR (1977) The effect of sleep on human long-term memory. In Drucker-Colin, RR, McGaugh JL (Eds.). *Neurobiology of Sleep and Memory* New York, Academic Press: 419-438.
- Empson JAC, Clarke PRF (1970) Rapid eye movements and remembering. *Nature* 227: 287-288.
- Eysenk H (1965) A three-factor theory of reminiscence. *Br J Psychol* 56: 163-181.
- Fischer S, Hallschmid M, Elsner AL, Born J (2002) Sleep forms memory for finger skills. *Proc Natl Acad Sci USA* 99: 11987-11991.
- Fischer S, Drosopoulos S, Tsen J, Born J (2006) Implicit learning - explicit knowing: a role for sleep in memory system interaction. *J Cogn Neurosci* 18: 311-319.
- 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, 214–227.
- Fletcher J, Maybery MT, Bennett S (2000) Implicit learning differences: A question of developmental level? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 26: 246-252.
- Frank MG, Issa NP, Stryker MP (2001) Sleep enhances plasticity of in the developing visual cortex. *Neuron* 30: 275-287.
- Frankland PW, Bontempi B (2005) The organization of recent and remote memories. *Nat Rev Neurosci* 6: 119-30.
- Gabrieli JD, Stebbins GT, Singh J, Willingham DB, Goetz CG (1997) Impaired rotary pursuit and intact mirror tracing skill in patients with Huntington's disease: Evidence for dissociable skill learning memory systems. *Neuropsychology* 11:272-281.
- Gais S, Plihal W, Wagner U, Born J (2000) Early sleep triggers memory for early visual discrimination skills. *Nat Neurosci* 3: 1335-1339.
- Gais S, Lucas B, Born J (2006) Sleep after learning aids memory recall. *Learning & Memory*, 13, 259–262.
- Greenberg R, Pillard R, Perlman C (1972) The effect of REM deprivation on adaptation to stress. *Psychosom Med* 34: 237-262.

- Greenberg R, Pearlman C, Schwartz WR, Grossman HY (1983) Memory, emotion, and REM sleep. *J Abnorm Psychol* 92: 378-381.
- Hartmann E (1966) *Nature* 212, 648-650.
- Heindel WC, Salmon DP, Shults CW, Walicke PA, Butters N (1989) Neuropsychological evidence for multiple implicit memory systems: A comparison of Alzheimer's, Huntington's and Parkinson's disease patients. *Journal of Neuroscience* 9: 582-587.
- Horne J (1988) *Why we sleep: The Functions of Sleep in Humans and Other Mammals*. Oxford University Press, Oxford, England.
- Jackson GM, Jackson SR, Harrison J, Henderson L, Kennard C (1995) Serial reaction time learning and Parkinson's disease: evidence for a procedural learning deficit. *Neuropsychologia* 33: 577-593.
- Jenkins JG, Dallenbach KM (1924) Obliviscence during sleep and waking. *Am J Psychol* 35: 605-612.
- Jiménez L, Méndez C, Cleeremans A (1996) Comparing direct and indirect measures of sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 22: 948-969.
- Ji D, Wilson MA (2007) Coordinated memory replay in the visual cortex and hippocampus during sleep. *Nature Neurosci* 10: 100-107.
- Jouvet M, Michel F (1959) *CR Soc Biol (Paris)* 153, 422-425.
- Kahn A, Dan B, Groswasser J, Franco P und Sottiaux M (1996) Normal sleep architecture in infants and children. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 13, 184-197.
- Karni A, Tanne D, Rubenstein BS, Askenasy JJM, Sagi D (1994) *Science* 265: 679.
- 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. *Proc Natl Acad Sci USA* 95: 861-868.
- Karni A, Sagi D (1993) The time course of learning a visual skill. *Nature* 365: 250-255.
- Korman M, Raz N, Flash T, Karni A (2003) Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of skilled performance. *Proc Natl Acad Sci USA* 100: 12492-12497.
- Krist H, Fieberg EL, Wilkening F (1993) Intuitive physics in action and judgment: The development of knowledge about projective motion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 19: 952-966.
- Li SC, Brehmer Y, Shing YL, Werkle-Bergner M, Lindenberger U (2006) Neuromodulation of associative and organizational plasticity across the life span: empirical evidence and neurocomputational modeling. *Neurosci Biobehav Rev* 30: 775-790.
- Markowitsch HJ (1996) Neuropsychologie des menschlichen Gedächtnisses. *Spektrum der Wissenschaft* 9: 52-61.
- Marks GA, Shaffery JP, Oksenberg A, Speziale SG, Roffwarg HP (1995) A functional role for REM sleep in brain maturation. *Brain Research, Behavioral Brain Research* 69: 1-11.

- Marshall L, Helgadottir H, Molle M, Born J (2006) Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature* 444: 610–613.
- Maquet P, Laureys S, Peigneux P, Fuchs S, Petiau C, Phillips C, Aerts J, Del Fiore G, Degueldre C, Meulemans T, Luxen A, Franck G, Van Der LM, Smith C, Cleeremans A (2000) Experience-dependent changes in cerebral activation during human REM sleep. *Nat Neurosci*, 3, 831-836.
- Maquet P (2001) The Role of Sleep in Learning and Memory. *Science*, 294, 1048-1052.
- Maybery M, Taylor M, O'Brien-Malone A (1995) Implicit learning: sensitive to age but not to IQ. *Australian Journal of Psychology* 47: 8-17.
- McGaugh JL (2000) Memory—a century of consolidation. *Science* 287: 248-251.
- Meulemans T, Van der Linden M, Perruchet P (1998) Implicit sequence learning in children. *Journal of Experimental Child Psychology* 69: 199-221.
- Murphy K, McKone E, Slee J (2003) Dissociations between implicit and explicit memory in children: The role of strategic processing and the knowledge base. *Journal of Experimental Child Psychology* 84: 124-165.
- Mölle M, Marshall L, Gais S, Born J (2004) Learning increases human electroencephalographic coherence during subsequent slow sleep oscillations. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 101, 13963–13968.
- Nissen ML, Bullemer P (1987) Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology* 19: 1-32.
- 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: 1255-1273.
- Olesen PJ, Nagy Z, Westerberg H, Klingberg T (2003) Combined analysis of DTI and fMRI data reveals a joint maturation of white and grey matter in a fronto-parietal network. *Cognitive Brain Research* 18: 48-57.
- Packard MG, Knowlton BJ (2002) Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience* 25: 563-593.
- Parkin AJ, Streete S (1988) Implicit and explicit memory in young children and adults. *British Journal of Psychology* 79: 361-369.
- Pascual-Leone A, Grafman J, Clark K, Stewart M, Massaquoi S, Lou JS, Hallett M (1993) Procedural learning in Parkinson's disease and cerebellar degeneration. *Annals of Neurology* 34: 594-602.
- Pavlov IP (1927) *Conditioned Reflexes: An Investigation of the Physiological Activity of the Cerebral Cortex*. London: Oxford University Press.
- 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, 125-134.

- Peigneux P, Laureys S, Fuchs S, Collette F, Perrin F, Reggers J, Phillips C, Degueldre C, Del Fiore G, Aerts J, Luxen A, Maquet P (2004) Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron*, 44, 535-545.
- Perruchet P, Vinter A (1998) Learning and development. The implicit knowledge assumption reconsidered. In M. Stadler and P. Frensch (Eds.), *Handbook of implicit learning* (pp. 495-531). Thousand Oaks, CA: Sage.
- Plihal W, Born J (1997). Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *J Cogn Neurosci*, 9, 534-547.
- Plihal W, Born J (1999). Memory consolidation in human sleep depends on inhibition of glucocorticoid release. *Neuroreport*, 10:2741-2747.
- Poldrack RA, Packard MG (2003) Competition among multiple memory systems: Covering evidence from animal and human brain studies. *Neuropsychologia* 41: 245-251.
- Prehn-Kristensen A, Göder R, Chirobeja S, Breßmann I, Ferstl R, Baving L (2009) Sleep in children enhances preferentially emotional declarative but not procedural memories. *Journal of Experimental Child Psychology*, Article in press.
- Rasch B, Born J (2007) Maintaining memories by reactivation. *Curr Opin Neurobiol* 2007;17:698e703.
- Reber AS (1989) Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General* 120: 112-116.
- Rechtschaffen A, Kales A (1968) A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Maryland: N.I.H. Publication No. 204.
- Robertson EM (2004) Skill learning: putting procedural consolidation in context. *Curr Biol* 14: R1061-R1063.
- Robertson EM, Pascual-Leone A, Press DZ (2004) Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep. *Curr Biol*;14:208e12.
- Schneider W, Pressley M (1997) *Memory development between 2 and 20* (2<sup>nd</sup> ed.). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Seiger CA (1994) Implicit learning. *Psychological Bulletin* 115: 163-196.
- Shaffery JP, Sinton CM, Bissette G, Roffwarg HP, Marks GA (2002) Rapid eye movement sleep deprivation modifies expression of long-term potentiation in visual cortex of immature rats. *Neuroscience* 110: 431-443.
- Shanks DR, John MF (1994) Characteristics of dissociable learning systems. *Behavioral and Brain Sciences* 17: 367-395.
- Sidman RL, Rakic P (1982) Development of the human central nervous system. In W Haymaker and RD Adams (Eds.), *Histology and histopathology of the nervous system* (pp. 3-145). Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Siegel JM 2005 Clues to the functions of mammalian sleep. *Nature* 437: 1264-71.
- Smith C (1995) Sleep states and memory processes. *Behav Brain Res*,69: 137-145.

- Sowell ER, Thompson PM, Holmes CJ, Jernigan TL, Toga AW (1999) In vivo evidence for post-adolescent brain maturation in frontal and striatal regions. *Nature Neuroscience* 2: 859-861.
- Squire LR, Zola-Morgan S (1991) The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253, 1380-1386.
- Squire LR (1992) Memory and the hippocampus: a synthesis from findings with rats, monkeys, and humans. *Psychol Rev* 99: 195-231.
- Squire LR, Zola SM (1996) Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 93, 13515-13522.
- Stern CE, Corkin S, González RG, Guimaraes AR, Baker JR, Jennings PJ, Carr CA, Sugiura RM, Vedantham V, Rosen BR (1996) The hippocampal formation participates in novel picture encoding: evidence from functional magnetic resonance imaging. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1996 Aug 6;93(16):8660-5.
- Stickgold R, James L, Hobson JA (2000) Visual discrimination learning requires sleep after training. *Nature Neurosci* 3: 1237-1238.
- Stickgold R, Whidbee D, Schirmer B, Patel V, Hobson JA (2000) Visual discrimination task improvement: a multi-step process occurring during sleep. *J Cogn Neurosci*;12: 246e54.
- Stickgold R (2005) Sleep-dependent memory consolidation. *Nature* 437: 1272–1278.
- Sutherland GR, McNaughton B (2000) Memory trace reactivation in hippocampal and neocortical neuronal ensembles. *Curr Opin Neurobiol* 10: 180-186.
- Thomas KM, Nelson CA (2001) Sereal reaction time learning in preschool- and school-age children. *Journal of Experimental Child Psychology* 79: 364-387.
- Thomas KM, Hunt RH, Vizueta N, Sommer T, Durston S, Yang Y, Worden MS (2004) Evidence of developmental differences in implicit sequence learning: An fMRI study of children and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1339–1351.
- Tilley AJ, Empson JAC (1981) Picture recall and recognition following total and selective sleep deprivation. In: Koella WP (ed.). *Sleep '80*. Basel: Karger, 367-369.
- Tulving E, Schacter DL (1990) Priming and human memory systems. *Science*, 247,301-306.
- Underwood BJ (1957) Interference and forgetting. *Psychological Review*, 64, 49-60.
- Ungerleider LG, Doyon J, Karni A (2002) Imaging brain plasticity during motor skill learning. *Neurobiology of Learning and Memory* 78: 553-564.
- Vinter A, Perruchet P (2000) Implicit learning in children is not related to age: Evidence from drawing behaviour. *Child Development* 71: 1223-1240.
- Vinter A, Detable C (2003) Implicit learning in children and adolescents with mental retardation. *American Journal of Mental Retardation* 108: 94-107.
- Wagner U, Gais S, Born J (2001) Emotional memory formation is enhanced across sleep intervals with high amounts of rapid eye movement sleep. *Learn Mem*, 8:112-119.

Wagner U, Fischer S, Born J (2002) Changes in emotional responses to aversive pictures across periods rich of slow wave sleep versus rapid eye movement sleep. *Psychosom Med*, 64: 627-34.

Walker MP (2005) A refined model of sleep and the time course of memory formation. *Behav Brain Sci*;28:51e64.

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

Walker MP, Stickgold R (2004) Sleep-dependent learning and memory consolidation. *Neuron* 44: 121-133.

Walker MP, Stickgold R (2006) Sleep, memory and plasticity. *Annual Review of Psychology* 57:139-166.

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

Willingham DB (2001) Becoming aware of motor skill. *Trends in Cognitive Sciences* 5: 181-182.

Willingham D, Goedert-Eschmann K (1999) The relation between explicit and implicit learning: Evidence for parallel learning. *Psychological Science* 10: 531-534.

Wilson MA, McNaughton BL (1994) Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science* 265, 676-679.

Yakovley PA, Lecours IR (1967) The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. In A. Minkowski (ED.), *Regional Development of the brain in early life* (pp.3-70). Oxford: Blackwell.

Yaroush R, Sullivan MJ, Ekstrand BR (1971) Effect of sleep on memory. II. Differential effect of the first and second half of the night. *J Exp Psychol* 88: 361-366.

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. *Learn Mem* 15: 508-515.