

Aus der Klinik für Neurologie der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Repetition priming und off-line-learning
als Parameter der frühen prozeduralen Gedächtnisbildung
und altersabhängige Unterschiede**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der medizinischen Fakultät
Charité- Universitätsmedizin Berlin

von
Sölva Kahl-Richter
aus Berlin

Datum der Promotion: 22.06.2014

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Anliegen der Arbeit	4
1.2. Aktueller Stand der Wissenschaft	4
1.3. Fragestellung der Arbeit /Arbeitshypothesen	8
2. Methoden	9
2.1. Hard- und Software	9
2.2. Probanden und Gruppen	10
2.2.1. Probanden	10
2.2.2. Gruppen	10
2.3. Studienbeschreibung	12
2.4. Rohdatentabelle	14
2.5. Studienprotokoll	15
2.5.1. Ein- und Ausschlusskriterien	15
2.5.2. Biometrie und statistische Methoden	15
3. Ergebnisse	17
3.1. Verbesserungen der Reaktionszeiten am ersten Testtag für das sequenzspezifische Lernen (repetition priming)	17
3.1.1. Mittelwerte der einzelnen Blöcke	17
3.1.2. Blockvergleiche gegeneinander an Tag 1 für die Sequenz	18
3.1.3. Grafische Darstellung der Veränderung der Reaktionszeiten Random und Sequenz am ersten Tag Block 1 gegen Block 8 in den verschiedenen Gruppen	20
3.2. Gruppenvergleich der Reaktionszeiten am ersten Tag für die Sequenz (repetition priming)	21
3.2.1. Gruppenvergleich der Mittelwerte an Tag 1 für die Sequenz	22
3.2.2. Grafische Darstellung der Veränderung der Reaktionszeiten am ersten Tag in den 3 Gruppen	23

3.3. Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht (off-line-learning)	24
3.4. Gruppenvergleich der sequenzspezifischen Verbesserung über Nacht (off-line-learning)	26
3.4.1. Grafische Darstellung der Verbesserung über Nacht zwischen den Gruppen	28
3.4.2. Grafische Darstellungen der Verbesserungen Tag 1/ Tag 2	29
3.4.3. Regressionsgerade	32
4. Diskussion	33
4.1. Repetition Priming aller Probanden insgesamt	33
4.2. Repetition priming im Gruppenunterschied	36
4.2.1. Gruppe A (6-12 Jahre)	36
4.2.2. Gruppe B (26-39 Jahre) und Gruppe C (50-75 Jahre)	38
4.3. Verbesserung über Nacht (off-line-learning)	41
4.4. Off-line-learning im Gruppenvergleich	43
4.5. Allgemeine Betrachtungen der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Alter	45
5. Zusammenfassung	49
Literaturverzeichnis	52
Danksagung	58
Lebenslauf	60

1. Einleitung

1.1. Anliegen der Arbeit

Nach allgemeiner Erfahrung wird es mit zunehmendem Alter schwieriger, motorische Bewegungsabläufe wie beim Schwimmen und Fahrradfahren zu erlernen.

Bei der Planung unserer Arbeit haben wir uns gefragt, ob motorische Fertigkeiten von Menschen in einem unterschiedlichen Alter verschieden schnell erlernt werden. Wir wollten weiterhin wissen, ob unterschiedliche Prozesse in der frühen Gedächtnisbildung und Gedächtniskonsolidierung zu Grunde liegen könnten. Daher wollen wir in dieser Arbeit den frühen Erwerb motorischer Fertigkeiten untersuchen und uns mit der Fragestellung auseinandersetzen, ob diese mit zunehmendem Alter anders, beziehungsweise langsamer oder schneller erlernt werden.

Wir wollen mithilfe einer speziellen Reaktionszeitaufgabe drei Probandengruppen unterschiedlichen Alters an zwei aufeinanderfolgenden Tagen untersuchen.

Wir wollen dabei insbesondere untersuchen, ob sich frühe Lernprozesse validieren und darstellen lassen und ob diese Prozesse altersabhängig sind und wenn ja, inwiefern sie sich unterscheiden und sich diese in unterschiedlich feststellbaren Lerngeschwindigkeiten abbilden lassen.

1.2. Aktueller Stand der Wissenschaft

Neuroplastizität als Fähigkeit des Gehirns, „sich an die Erfordernisse der Umwelt anzupassen, zu lernen, vorhandene Funktionen zu reorganisieren und zu optimieren sowie kleine Defizite auszugleichen“, hat als Modellvorstellung zunehmend Bedeutung, auch in der Diagnose und Therapie von neurologischen sowie psychiatrischen Erkrankungen.⁹ Die Erforschung von Lernprozessen und Gedächtnis erbringt wichtige Erkenntnisse zur Organisation und Verarbeitung von Informationen im Gehirn. Gedächtnis wird hierbei verstanden als die Fähigkeit des Gehirns, Informationen zu behalten, zu speichern und gegebenenfalls abzurufen. Bereits in den frühen fünfziger

Jahren des vorigen Jahrhunderts untersuchte Brenda Milner, eine Mitarbeiterin Penfields, Patienten mit Temporallappenepilepsie und die Auswirkungen der operativen beidseitigen Entfernung des Hippocampus und dessen benachbarten Strukturen. Der erste und am besten untersuchte Fall war der des Patienten Henry M. Nach der Operation litt der Patient an einem schwerwiegenden Gedächtnisverlust, einer anterograden Amnesie. Ursprünglich ging man davon aus, dass sich das Gedächtnisdefizit gleichförmig auf alle Formen des Lernens und des Gedächtnisses erstreckte. Das stellte sich als falsch heraus. Henry M. war in der Lage, bestimmte Dinge zu lernen und für lange Zeit zu speichern wie normale Vergleichspersonen. Dazu gehörten neue motorische Fertigkeiten, auch wenn er sich darüber nicht bewusst war. Die Untersuchungen an diesen Patienten mit Temporallappenverletzungen wiesen auf mindestens zwei fundamental unterschiedliche Lern- und Gedächtnisprozesse hin.⁵⁸

Squire unterscheidet in seinem weit verbreiteten Modell zwei Langzeitgedächtnissysteme: deklarative Gedächtnisanteile, die in das Bewusstsein gelangen und hierzu im Gegensatz nicht deklarative Gedächtnisanteile, deren Inhalte nicht bewusst werden. Im deklarativen Gedächtnissystem werden Fakten und Ereignisse verarbeitet. Anatomisch werden diesem System mediale Temporallappenanteile zugeordnet. Im nicht deklarativen oder prozeduralen Gedächtnis werden Fertigkeiten und Bewegungsabläufe gespeichert, die einer bewussten Erinnerung nicht zugänglich sind. Diese Gedächtnisanteile zeichnen sich durch eine weitgehend unbewusste Leistungsverbesserung aus, die durch wiederholtes Üben erreicht werden kann. Weiterhin schließt es Prozesse wie Priming, einfache klassische Konditionierung und nicht assoziatives Lernen ein.^{66,65}

Diese Arbeit soll sich mit dem prozeduralen Gedächtnis und dem Erwerb prozeduraler Fertigkeiten beschäftigen. Unter prozeduralem Lernen wird der Erwerb neuer Handlungen bzw. Fertigkeiten sowie Gewohnheiten zusammengefasst. Prozedurales oder implizites Gedächtnis ist, wie bereits oben ausgeführt, selten bewusst, benötigt kaum aktive Willensanstrengung und Aufmerksamkeit und kann schlechter verbalisiert werden. Dieses Gedächtnissystem ist für die Wiedergabe von Fertigkeiten, Gewohnheiten und Bewegungsabfolgen verantwortlich. Beispiele dafür können sein: die Prozedur des Schuhe Zubindens, Fahrrad fahren oder aber bestimmte Tastenfolgen auf einer Tastatur zu drücken. Komplexe Bewegungen, deren Ablauf man erlernt und häufig geübt hat, werden ohne Einschaltung der bewussten Erinnerung, ohne „nachzudenken“,

wieder abgerufen. Verschiedene subkortikale Strukturen erbringen die Leistungen des prozeduralen Gedächtnisses. Anatomisch ist das nicht deklarative oder prozedurale Gedächtnissystem weniger exakt definiert. Als neurobiologische Strukturen werden insbesondere Neuronenverschaltungen der Basalganglien, des Kleinhirns, des somatosensorischen und motorischen Kortex, des Parietallappens und z.T. des Präfrontalkortex diskutiert.^{52,24}

Die Repräsentation von prozeduralen Gedächtnisinhalten scheint ein zeitkritischer Vorgang zu sein. Das bedeutet, zu unterschiedlichen Zeitpunkten scheinen jeweils verschiedene Hirnregionen in den Lernvorgang einbezogen zu sein.²⁰ Die prozedurale Gedächtnisbildung scheint hierbei ein mehrstufiger und zeitabhängiger Prozess zu sein. Prozedurale Lernprozesse und Phänomene wurden in den vergangenen Jahren genauer untersucht. Arbeitsgruppen um Karni und Hauptmann entwickelten computergestützte serielle Reaktionszeitaufgaben (SRTT) nach Nissen weiter.⁴⁴ Mithilfe dieser untersuchten sie an Probanden unterschiedliche prozedurale Lernprozesse.^{26,25} Während dieses Lernvorgangs kann man eine frühe und späte Phase voneinander abgrenzen. Während der frühen Phase wird der Proband erstmalig mit dem neu zu Lernenden konfrontiert. Unabhängig vom allgemeinen Leistungsniveau zeigen sich durch Üben während dieser ersten Phase rasch deutliche Leistungsverbesserungen, hier nachfolgend als repetition priming bezeichnet. Wenn man den Leistungszuwachs graphisch als Funktion fortschreitender Übung darstellt, wird die Leistungsverbesserung nach zunächst rascher Steigerung zu Beginn im Verlauf deutlich geringer, d.h. die Lernkurve flacht ab und nimmt gegen Ende einen asymptotischen Charakter an. Im Anschluss an diese erste frühe Lernphase folgt über weitere Trainingssitzungen eine späte Phase mit deutlich langsameren Fortschritten im Leistungserwerb.³¹ Mit Priming, also des Erlernens einer Sequenz am ersten Trainingstag, wird der Effekt bezeichnet, dass durch die Verarbeitung eines dargebotenen Reizes, hier der Sequenz, die Verarbeitung des wiederholt oder nachfolgend dargebotenen Reizes beeinflusst wird, sofern diese in Zusammenhang stehen. Die vorherige Darbietung eines Reizes (Prime) beeinflusst somit die Verarbeitungszeit des zeitlich nachfolgenden Zielreizes. Durch ständige Wiederholung der dargebotenen Sequenz kann dieser Effekt gesteigert werden. In der vorliegenden Studie werden wir zunächst dieses Merkmal des repetition primings bei drei Probandengruppen unterschiedlichen Alters vergleichen.

Weiterhin wird zwischen den einzelnen Trainingssitzungen eine weitere Phase postuliert, in der sich ein verzögerter Leistungszuwachs ohne weitere Übung im Anschluss an erfolgtes Training einstellt.²⁵ Diese Verbesserung wird als off-line-learning oder Konsolidierung bezeichnet. Diese verzögerten Leistungsverbesserungen zeigen sich dadurch, dass Probanden gleiche Reaktionszeitaufgaben nach längerer Pause, hier am folgenden Tag nach 24 Stunden, auf einem höheren Niveau beginnen, als die ihnen vorangegangenen endeten. Bereits 1996 untersuchten T. Brashers-Krug et al prozedurale Prozesse und beschrieben ein fortbestehendes Lernen nach Übungsende, welches sie mit Konsolidierungsprozessen gleichsetzten. Konsolidierung wird hierbei als hypothetischer Prozess der Verfestigung von Gedächtnisspuren verstanden. Durch die Konsolidierung wird das Gedächtnis von einer fragilen, instabilen Form in eine robustere, stabilere überführt.⁵¹

Hauptmann et al postulierten 2005, dass zunächst eine Sättigung der Lernkurve erreicht werden muss, damit verzögert auftretende Leistungsverbesserungen beobachtet werden können. Die initiale Lernphase mit schnellem Leistungszuwachs und anschließender Sättigung während der frühen Übungsphase wird hierbei, wie oben bereits beschrieben, als repetition priming verstanden. Der verzögerte Leistungszuwachs nach Übungsende in der sogenannten Off-Phase des Experimentes kann als off-line-learning, delayed performance oder Konsolidierung bezeichnet werden.²⁶

Robertson et al beschrieben 2004 das Phänomen off-line-improvement, also eine Verbesserung der Fertigkeit nach Übungsende zwischen den Testsitzungen als ein Hauptmerkmal der prozeduralen Konsolidierung.⁵¹ Auch Hauptmann und Karni verstehen den verzögerten Leistungszuwachs während der Übungspausen, also den sogenannten off-Phasen als Konsolidierungsprozesse in ihrer Arbeit 2002.²⁶

In dieser Arbeit sollen als Weiterführung der bisherigen wissenschaftlichen Ergebnisse frühe Lernprozesse wie das repetition priming sowie Konsolidierungsprozesse, hier als off-line-learning bezeichnet, an hirngesunden Probanden unterschiedlichen Alters untersucht werden. Der Einfluss des Alters auf prozedurale Konsolidierungsprozesse soll untersucht werden und hierbei im Vordergrund stehen.

1.3. Fragestellung der Arbeit /Arbeitshypothesen

In der Literatur gibt es bisher wenige Hinweise auf Untersuchungen zur Altersabhängigkeit prozeduraler Konsolidierungsprozesse bei hirngesunden Probanden. Zur modellhaften Untersuchung motorischen Fertigkeitlernens, insbesondere spezifischer prozeduraler Prozesse wie repetition priming und consolidation sind computerunterstützte serielle Reaktionszeitaufgaben (SRTT) gut geeignet. Sie wurden von Nissen eingeführt und in der Folge im Original oder modifizierten Versionen, wie oben ausgeführt, verwendet.⁴⁴

Gegenstand dieser Arbeit soll die Untersuchung prozeduraler Lernleistungen von drei hirngesunden Probandengruppen verschiedenen Alters mithilfe modifizierter Reaktionszeitaufgaben sein. In den dargebotenen Reizen, wie später noch genauer ausgeführt wird, ist eine regelhafte Abfolge von 10 Positionen (Sequenz) eingebettet, die mit Reizserien in zufälliger Positionsreihenfolge (Random) alterniert. Die Testsitzung wird nach 24 Stunden wiederholt.

Wir wollen die Altersabhängigkeit von frühen Lernprozessen untersuchen. Es soll die Frage beantwortet werden, ob hinsichtlich des Lernens der Sequenz am ersten Tag und der Konsolidierung über Nacht Unterschiede zwischen den verschiedenen Altersgruppen bestehen? Hierzu überprüfen wir folgende Hypothesen:

- Am ersten Untersuchungstag wird ein Erlernen der Sequenz im Sinne einer Verbesserung der Reaktionszeiten erwartet (repetition priming)
- Hinsichtlich des sequenziellen Lernens wird ein Gruppenunterschied erwartet.
- Über Nacht (off-Phase) findet ohne weiteres Üben eine Verbesserung der Reaktionszeiten statt. (Konsolidierung) Das bedeutet, geringere Reaktionszeiten werden zu Beginn der zweiten Testsitzung benötigt. Hinsichtlich der Verbesserung über Nacht (off-line-learning) wird ein Gruppenunterschied erwartet.

2. Methoden

2.1. Hard- und Software

Die Untersuchungen wurden durchgeführt an einem Laptop der Marke Samsung P35. Als Software wurde verwendet: Matlab 5.3. für Windows und die Psychtoolbox 2.44 für Windows von David Brainard und Denis Pelli.⁶ Die Verwaltung und Bearbeitung der erhaltenen Messwerte wurden mit dem Datenverarbeitungsprogramm Microsoft EXCEL und dem Statistikprogramm SPSS 11.0 / SPSS 17.0 für Windows durchgeführt.

Es wurden farblich codierte (von links nach rechts: blau, gelb, rot, grün), 5 cm große Quadrate auf der ansonsten schwarzen Oberfläche eines 15 Zoll Laptopmonitors dargestellt, wie in Abbildung 1 gezeigt. Die Auflösung betrug 800x600 Pixel. Die Quadrate waren horizontal angeordnet mit einem Abstand von 1,5 cm. Als Stimuli wurde ein gelbes X gewählt.

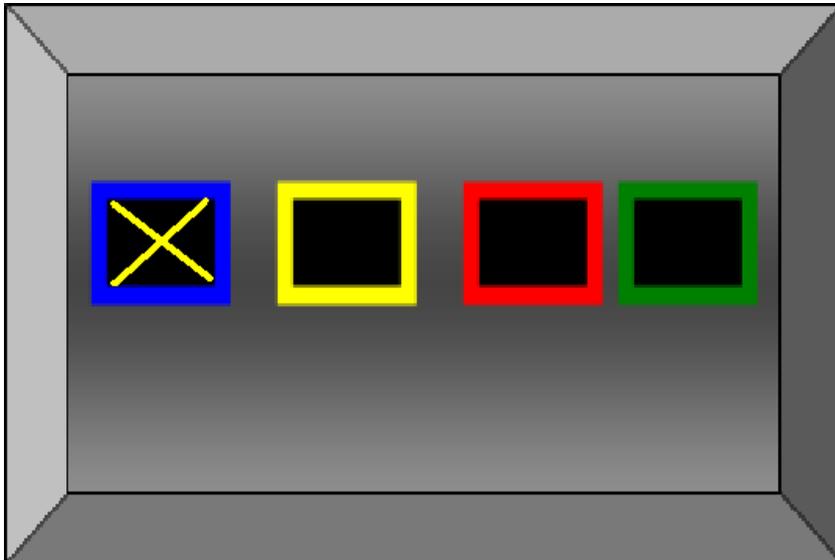


Abbildung 1: Bildschirmoberfläche zur Reizpräsentation

Zur Reizbeantwortung wurde eine Tastatur umgebaut, auf der sich die vier Tasten in der gleichen Farbanordnung wie die Quadrate bei der Reizpräsentation auf der

Laptopoberfläche befanden (von links nach rechts: blau, gelb, rot, grün). Auf der Tastatur befanden sich ausschließlich diese vier runden, farblichen Tasten mit einem Durchmesser von 4 cm. Diese waren horizontal nebeneinander angeordnet mit einem Abstand von 1,5 cm. Der Rest der Tastatur war schwarz abgeklebt, um weitere Störeinflüsse zu verhindern.

2.2. Probanden und Gruppen

2.2.1. Probanden

In dieser Studie wurden 60 hirngesunde Probanden untersucht. Diese waren während des Untersuchungszeitraumes in einem Alter von 6-75 Jahren. Es wurden 36 weibliche und 24 männliche Probanden untersucht. Alle waren normalsichtig oder die Sicht war auf normale Sehstärke korrigiert. Niemand hatte eine neurologische oder psychiatrische Erkrankung in der Vorgeschichte. Alle Probanden führten die beiden Testsitzungen mit der dominanten Hand durch. An beiden Testtagen wurde die gleiche Hand benutzt.

Die Probanden wurden vorher über das Wesen der Studie aufgeklärt und erteilten ausnahmslos ihre schriftliche Einwilligung (informed consent). In der Gruppe A (Alter 6-12 Jahre) erteilten die Erziehungsberechtigten die Einwilligung. Die Auswertung erfolgte anonym unter einer Studiennummer.

2.2.2. Gruppen

Die Probanden wurden aufgrund ihres Alters in drei Gruppen A-C eingeteilt. In der ersten Gruppe (Gruppe A) wurden 20 Kinder untersucht im Alter von 6-12 Jahren. Der Altersdurchschnitt lag bei 9 Jahren. Es wurden 12 Mädchen und 8 Jungen untersucht. Die genaue Altersverteilung der Gruppe A ist in der anhängenden Tabelle verzeichnet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Gruppe A

Alter	Anzahl weiblich	Anzahl männlich
6	1	3
7	5	1
10	1	-
11	3	3
12	2	1

In der zweiten Gruppe (Gruppe B) wurden 20 jüngere Erwachsene im Alter von 26-39 Jahren untersucht. Der Altersdurchschnitt lag bei 31 Jahren. Es gab 11 weibliche und 9 männliche Probanden in dieser Gruppe. Tabelle 2 zeigt die Verteilung der Probanden innerhalb der Gruppe B.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Gruppe B

Alter	Anzahl weiblich	Anzahl männlich
26	-	1
27	3	2
28	1	-
29	2	1
31	1	2
33	-	2
36	2	-
37	1	-
39	1	1

In der dritten Gruppe (Gruppe C, siehe Tabelle 3) wurden 20 ältere Erwachsene im Alter von 50-75 Jahren untersucht. Der Altersdurchschnitt lag bei 61 Jahren. Hier waren 13 Probanden weiblich und 7 männlich.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Gruppe C

Alter	Anzahl weiblich	Anzahl männlich
50	1	2
51	1	-
52	1	-
53	-	1
55	1	-
56	1	-
57	1	-
60	1	-
61	1	1
62	1	-
65	-	1
67	1	-
70	-	1
72	1	1
75	2	-

2.3. Studienbeschreibung

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine klinisch-experimentelle Untersuchung mit verblindeter Auswertung.

Die Leistung, hier definiert als die Reaktionszeit, wurde in zwei verschiedenen Sitzungen untersucht, mit einer Pause zwischen den einzelnen Sitzungen von mindestens 24 Stunden. Der maximale Abstand zwischen den Sitzungen betrug 28 Stunden.

Die Probanden absolvierten am Computer eine modifizierte serielle Reaktionszeitaufgabe (serial reaction time task = SRTT) nach Nissen.⁴⁵ Die Patienten wurden angewiesen, so schnell und korrekt wie möglich mit der dominanten Hand zu

antworten, indem sie die dazugehörige farbige Taste auf der Tastatur drücken sollten. Beim Drücken einer falschen Taste erklang ein akustisches Signal, die Reizpräsentation fuhr danach unverändert fort.

Nach einem Tastendruck wurde der Reiz ausgeblendet, der darauf folgende erschien nach einem Antwort-Stimulus-Intervall von 500 ms.

Für die Teilnehmer unbekannt enthielten die dargebotenen Reize eine eingebettete, regelmäßig wiederkehrende Abfolge von 10 Positionen (Sequenz). Diese lautete A-C-A-B-D-C-B-D-A-C. Diese wiederkehrende Sequenz alternierte mit Reizserien von 10 Positionen in zufälliger Positionsreihenfolge (Random). Bei der zufälligen Reizpräsentation durfte der Stimulus nicht zweimal hintereinander in der gleichen Position erscheinen.

Alle Probanden absolvierten in einer Testsitzung 8 Blöcke mit jeweils 100 Stimuli. Die 8 Blöcke wurden durch eine kurze Pause, deren Länge von den Probanden selbst bestimmt werden konnte, getrennt. Mindestens war die Pause jedoch 10 Sekunden lang. Die Blöcke wurden durch einen Tastendruck der Probanden gestartet und begannen jeweils nach einem Countdown mit der Sequenz.

In insgesamt 8 Blöcken wurden in einer Sitzung 800 Stimuli präsentiert, davon die Hälfte in der oben beschriebenen Sequenz. Durch das fehlende Wissen um eine unterliegende Sequenz erschien den Probanden ein Block als die kontinuierliche Abfolge von 100 Reizen.

Der gleiche Versuch wurde nach 24 Stunden als zweite Testsitzung erneut durchgeführt. Im Anschluss an die zweite Sitzung wurden die Probanden kurz zum Versuch befragt.

Ausgewertet wurden lediglich richtige Antworten. Die Anzahl der Fehler wurde registriert. Um die Werte besser interpretieren zu können, wurde für die einzelnen Reaktionszeiten auf die regelmäßig (Sequenz) bzw. durcheinander (Zufall) dargebotenen Reize für jeden der 8 Blöcke ein Mittelwert gebildet.

Pro Block und Regularität (Sequenz bzw. Zufall) wurde der Prozentsatz falscher Antworten berechnet. Die Fehlerraten waren während des gesamten Versuchs bei allen Probanden so gering, dass wir sie nicht gesondert betrachtet haben.

2.4. Rohdatentabelle

Eine Testsitzung bestand aus jeweils 8 Blöcken. In jedem Block wurden Sequenz und Random, die wie oben erläutert aus je 10 Stimuli bestanden, abwechselnd fünfmal präsentiert. Für jeden einzelnen Stimulus wurde bei korrekter Antwort eine Reaktionszeit gemessen. Aus je einer Sequenzabfolge bzw. Random (je 10 Reaktionszeiten) wurde ein Mittelwert gebildet. In einem Block erhielt man somit 10 Mittelwerte, fünf für die Sequenz und fünf für das Random. An einem Tag wurde mit 80 Messwerten gerechnet. So ergaben sich für jeden der 60 Probanden 160 Messwerte an den beiden Testtagen. Diese berechneten Mittelwerte wurden zunächst in eine Microsoft EXCEL-Tabelle übertragen.

Die Erfassung erfolgte in unten beschriebener Form:

- Spalte 1 Gruppe A, B oder C
- Spalte 2 Nummer fortlaufend 1-60
- Spalte 3 Alter der Probanden
- Spalte 4 Probandenindex

Fortlaufend die Mittelwerte für Sequenz und Random an den zwei Tagen, wobei die Faktoren wie folgt definiert wurden:

- X= Tag 1-2
- Y= Block 1-8
- Z= Wiederholung im Block 1-5.

Wie oben beschrieben wurden 160 Mittelwerte für jeden einzelnen Probanden in 160 Spalten erfasst.

2.5. Studienprotokoll

Für jeden Probanden wurde ein Untersuchungsprotokoll geführt. Hier wurden Studiennummer, Name, Geburtsdatum, Geschlecht, Händigkeit und Untersuchungstag registriert. Die Protokolle liegen der Verfasserin der Arbeit vor und werden vertraulich behandelt.

Die Probanden erhielten ein Informationsblatt, in welchem sie über das Wesen der Studie aufgeklärt wurden und ihr Einverständnis erteilten. Des Weiteren wurden die Antworten der deklarativen Testung hier vermerkt. In der Gruppe A (Kindergruppe) wurde die Einverständniserklärung von den Erziehungsberechtigten erteilt.

2.5.1. Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterium war das Alter beziehungsweise die passende Zugehörigkeit in eine der definierten Gruppen.

Ausschlusskriterien waren eine Erkrankung aus dem neurologischen oder psychiatrischen Formenkreis, eine unkorrigierte Sehschwäche sowie die fehlende Einverständniserklärung.

2.5.2. Biometrie und statistische Methoden

Die Auswertung wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Biometrie der Humboldt Universität zu Berlin geplant und durchgeführt. Zur statistischen Auswertung wurde SPSS für Windows, Versionen 11.0, 15.0 und 17.0 verwendet.

Die Daten wurden mit dem allgemeinen linearen Modell mit Messwiederholung ausgewertet. Mit Hilfe dieser multifaktoriellen Varianzanalyse werden statistisch signifikante Unterschiede in der abhängigen Variablen, hier den Reaktionszeiten, identifiziert, die mit den unabhängigen Variablen in Zusammenhang stehen. Als unabhängige Variablen gingen in die Varianzanalyse die Faktoren Gruppe und Zeit ein. Der Faktor Zeit wurde hierbei für jeden Tag über die acht Blöcke definiert, während der Faktor Gruppe über die drei realisierten Altersgruppen abgebildet wurde. Mögliche

Wechselwirkungen zwischen den Faktoren wurden ebenfalls untersucht. Ergebnis der Varianzanalyse ist die Feststellung, ob die Faktorenausprägungen unterschiedliche Einflüsse auf die abhängige Variable haben, ohne diese jedoch spezifizieren zu können. Um eine solche Spezifizierung vornehmen zu können und die Einflüsse der unterschiedlichen Ausprägungen der Faktoren untereinander erfassen zu können, wurden ergänzend Post-Hoc-Vergleiche durchgeführt, für die der Tukey-HSD-Test verwendet wurde. Dieser ermöglicht einen paarweisen Vergleich der Gruppenmittelwerte der einzelnen Faktorenausprägungen. So werden bspw. mittels des Tukey-HSD-Tests Unterschiede zwischen den drei Altersgruppen in den Reaktionszeiten am ersten Tag errechnet, indem immer jeweils zwei Gruppen paarweise miteinander verglichen werden (Gruppe A versus Gruppe B, Gruppe A versus Gruppe C, etc.). Weiterhin wird der T-Test für abhängige Stichproben verwendet. Die abhängige Variable ist hier die gemittelte Reaktionszeit und die unabhängige die Gruppenvariable Tag 1 / Tag 2.

Abschließend wurde zur Identifikation eines möglichen Zusammenhangs zwischen dem Alter und dem Leistungszuwachs über Nacht eine Regression über diese beiden Variablen berechnet.

In der statistischen Analyse werden ausschließlich parametrische Verfahren verwendet.

3. Ergebnisse

3.1. Verbesserungen der Reaktionszeiten am ersten Testtag für das sequenzspezifische Lernen (repetition priming)

Es sollte die Frage geklärt werden, ob es im Laufe des ersten Tages zu einer Veränderung der Reaktionszeiten für die Sequenz kommt und ob diese Veränderungen signifikant sind. Mittels multifaktorieller Varianzanalyse mit Messwiederholung ergab sich für die Mittelwerte der Reaktionszeiten für die Sequenz an Tag 1 insgesamt folgendes Ergebnis (Pillai-Spur): $F(7,000;51,000) = 13,041$.

Wir erhielten somit ein hochsignifikantes Ergebnis (p -Wert $< 0,000$) für eine Verbesserung der Reaktionszeiten, also das sequenzspezifische Lernen während des gesamten ersten Tages für alle Probanden.

3.1.1. Mittelwerte der einzelnen Blöcke

Zum Vergleich des vorhergehenden Ergebnisses dient die Darstellung der Mittelwerte der einzelnen Blöcke des ersten Tages in Tabelle 4. In der Tabelle sind die Mittelwerte für die Reaktionszeiten der Sequenz (Spalte 2) am ersten Testtag für die insgesamt 8 Blöcke (Spalte 1) für alle Gruppen zusammengefasst dargestellt. Weiterhin werden Standardfehler (Spalte 3) und die 95% Konfidenzintervalle (Spalte 4 und 5) benannt.

Tabelle 4: mittlere Reaktionszeiten für die einzelnen Blöcke am ersten Tag

Block	Mittelwert in Sek.	Standardfehler	Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
1	0,710	0,022	0,666	0,754
2	0,654	0,020	0,613	0,695
3	0,670	0,021	0,627	0,713
4	0,665	0,019	0,626	0,704
5	0,642	0,020	0,601	0,683

Block	Mittelwert in Sek.	Standardfehler	Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
6	0,641	0,020	0,602	0,680
7	0,625	0,019	0,586	0,663
8	0,621	0,020	0,581	0,661

Anmerkungen: Sek.: Sekunden

Insgesamt konnte im Verlauf der ersten Testsitzung eine Verringerung der Reaktionszeiten beobachtet werden. Die durchschnittlichen Reaktionszeiten (vergleiche Spalte 2) nehmen von rund 0,71 Sekunden auf 0,62 Sekunden ab. Damit konnte eine Leistungsverbesserung von 0,09 Sekunden im Sinne einer Abnahme der Reaktionszeiten für die Sequenz (sequenzspezifisches Lernen) am ersten Tag festgestellt werden.

3.1.2. Blockvergleiche gegeneinander an Tag 1 für die Sequenz

Um die Unterschiede noch weitergehend zu validieren, verglichen wir ebenfalls mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung die einzelnen Blöcke untereinander. Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Ergebnisse der Varianzanalyse zu den Differenzen zwischen aufeinander folgenden Blöcken am 1. Tag

Blockvergleich	F-Werte	p
Block 2 gegen 1	27,435**	0,000
Block 3 gegen 2	1,776	0,188
Block 4 gegen 3	2,492	0,120
Block 5 gegen 4	16,685**	0,000
Block 6 gegen 5	12,554**	0,001
Block 7 gegen 6	38,782**	0,000
Block 8 gegen 7	24,225**	0,000

Anmerkung: p: Irrtumswahrscheinlichkeit, **: $p < 0,05$

Wir erhielten hier folgendes Ergebnis: alle Blockvergleiche bis auf Blockvergleich 3 gegen 2 ($p = 0,188$, $F = 1,776$) und Blockvergleich 4 gegen 3 ($p = 0,120$, $F = 2,492$) ergaben ein hochsignifikantes Ergebnis. Dies bedeutet, dass sich am ersten Tag fast alle Blöcke signifikant voneinander unterscheiden im Vergleich zum vorherigen Block. Dies ist mit einem Erlernen der Sequenz von Block zu Block gleichzusetzen. In den ersten Blöcken ist der Lernsprung noch nicht sehr ausgeprägt, was sich in den nicht statistischen paarweisen Vergleichen niederschlägt. Im Verlaufe wird jedoch das Erlernen der Sequenz deutlich zu sehen, was sich wiederum in den statistisch signifikanten Vergleichen niederschlägt.

3.1.3. Grafische Darstellung der Veränderung der Reaktionszeiten Random und Sequenz am ersten Tag Block 1 gegen Block 8 in den verschiedenen Gruppen

Grafisch wurde der Blockvergleich Block 8 gegen Block 1 des ersten Tages in Abbildung 2 dargestellt. Weiterhin kann man Abbildung 2 entnehmen, wie sich die Reaktionszeiten der Sequenz im Gegensatz zum Random in der ersten Testsitzung verhielten.

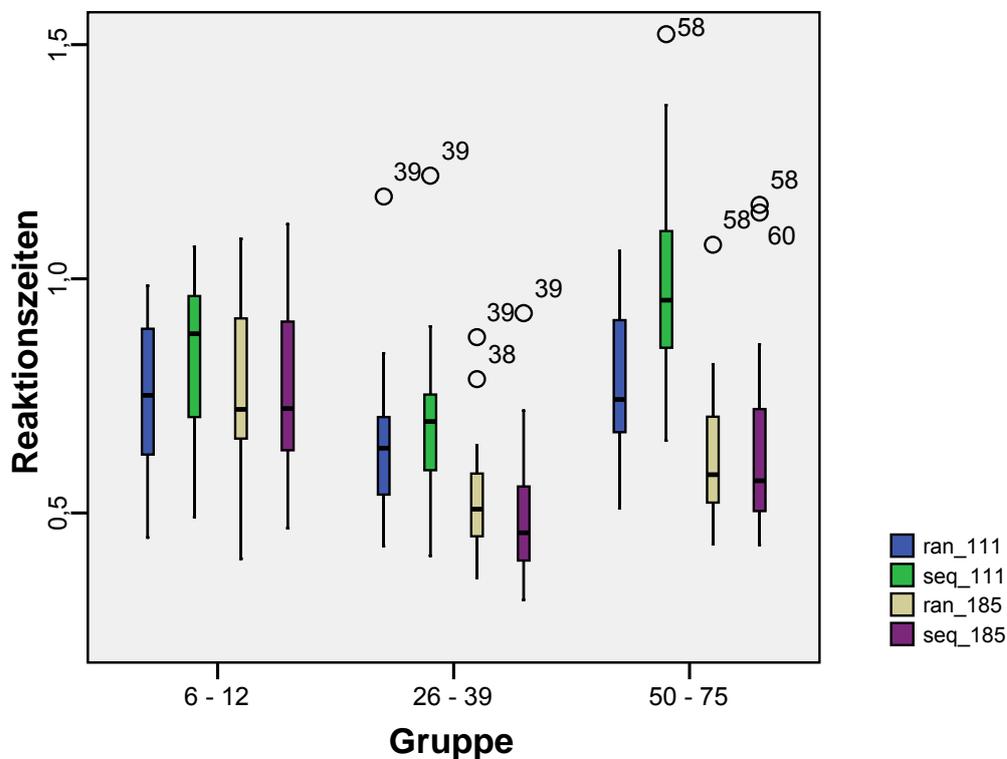


Abbildung 2: Boxplot der Reaktionszeiten in Sek. über die Gruppen. ran_111: 1. Block 1. Tag Random; ssq_111: 1. Block 1. Tag Sequenz; ran_185: 8. Block 1. Tag Random; seq_185: 8. Block 1. Tag Sequenz; Gruppen A (6-12), B(26-39) und C(50-75).

Die Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 Prozent der Daten liegen, Begrenzung durch das obere und untere Quartil. Durch die Whisker werden die außerhalb der Box liegenden Werte dargestellt. Ausreißer sind zusätzlich gekennzeichnet.

3.2. Gruppenvergleich der Reaktionszeiten am ersten Tag für die Sequenz (repetition priming)

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse hinsichtlich unserer drei Gruppen zu entnehmen. Gruppe A unterscheidet sich hinsichtlich des Lernergebnisses am ersten Tag für die Sequenz statistisch hochsignifikant von Gruppe B (p-Wert = 0,000). Gruppe A unterscheidet sich nicht statistisch signifikant von Gruppe C (p-Wert = 0,074). Gruppe B und Gruppe C unterscheiden sich ebenfalls statistisch hochsignifikant voneinander hinsichtlich des repetition priming am ersten Tag (p-Wert = 0,01). Wie erwartet, kommt es zu unterschiedlichen Ergebnissen in den unterschiedlichen Gruppen.

Tabelle 6: Ergebnisse der Vergleiche der gruppenspezifischen Reaktionszeiten für die Sequenz am ersten Tag mit Hilfe des Tukey-HSD-Tests

Gruppe I	Gruppe II	Mittlere Differenz	Standardfehler	P	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
A	B	0,248**	0,047	0,000	0,134	0,361
	C	0,105	0,047	0,074	-0,008	0,219
B	A	-0,248**	0,047	0,000	-0,361	-0,134
	C	-0,142**	0,047	0,010	-0,256	-0,029
C	A	-0,105	0,047	0,074	-0,219	0,008
	B	0,142**	0,047	0,010	0,028	0,256

Anmerkungen: Gruppe A: 6-12 Jahre, Gruppe B: 26-39 Jahre, Gruppe C: 50-75 Jahre, p: Irrtumswahrscheinlichkeit, **: $p \leq 0,01$

Bei Betrachtung der Reaktionszeitverbesserungen in Sekunden hinsichtlich der unterschiedlichen Gruppen beim Vergleich des ersten und des achten Testblockes lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen. Die Kindergruppe (Gruppe A) zeigt die geringste Verbesserung der Reaktionszeit für die Sequenz, also das geringste repetition priming. Die größte Verbesserung zeigt Gruppe C (50-75 Jahre), Gruppe B (26-39 Jahre) liegt im Ergebnis dazwischen.

3.2.1. Gruppenvergleich der Mittelwerte an Tag 1 für die Sequenz

Zum weiteren Gruppenvergleich folgt eine Statistik der Mittelwerte in Tabelle 7.

Tabelle 7: gruppenspezifische Mittelwerte in Sekunden für die 8 Blöcke des 1. Tages

Gruppe	Block	Mittelwert	Standardfehler
A	1	0,788	0,038
	2	0,765	0,036
	3	0,788	0,037
	4	0,795	0,034
	5	0,754	0,035
	6	0,779	0,034
	7	0,761	0,033
	8	0,739	0,035
B	1	0,591	0,038
	2	0,531	0,036
	3	0,536	0,037
	4	0,527	0,034
	5	0,517	0,035
	6	0,497	0,034
	7	0,488	0,033
	8	0,501	0,035
C	1	0,752	0,038
	2	0,664	0,036
	3	0,687	0,037
	4	0,673	0,034
	5	0,656	0,035
	6	0,647	0,034
	7	0,626	0,033
	8	0,622	0,035

Anmerkungen: Gruppe A: 6-12 Jahre, Gruppe B: 26-39 Jahre, Gruppe C: 50-75 Jahre

Für unsere Auswertungen bedeutet dies folgendes: bei Gruppe A wurde die Reaktionszeit für die Sequenz bei Vergleich Block 1 gegen Block 8 am ersten Tag um 0,049 s verbessert. Bei Gruppe B betrug die Verbesserung im Mittel 0,9 s. Gruppe C erreichte die größte Verbesserung um 0,130 s.

Die Wechselwirkungen zwischen Block und Gruppe sind statistisch signifikant unterschiedlich, der p-Wert betrug 0,017.

3.2.2. Grafische Darstellung der Veränderung der Reaktionszeiten am ersten Tag in den 3 Gruppen

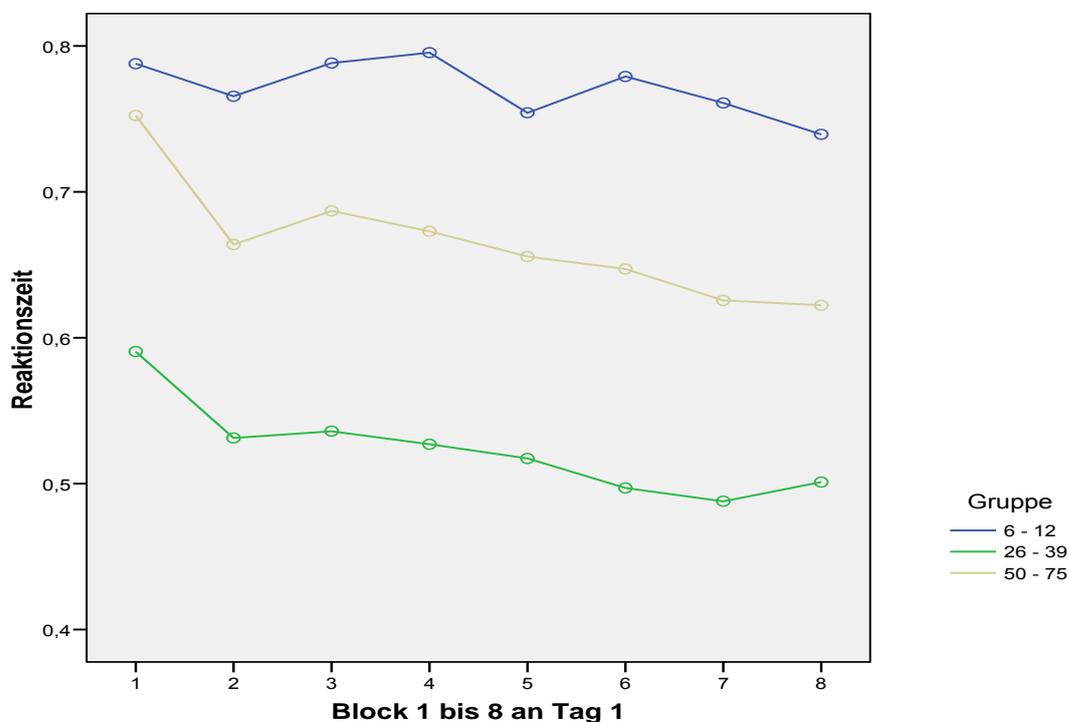


Abbildung 3: Reaktionszeiten in Sek. über die 8 Blöcke für die drei Gruppen.

Man erkennt deutlich den abfallenden Kurvenverlauf bei allen Gruppen. Die einzelnen Blöcke sind durch kleine Quadrate markiert. Der oberste Kurvenverlauf stellt die Reaktionszeiten für die Kindergruppe (6-12-jährige) dar. Die Kurve verläuft über den beiden anderen Kurven, wir sehen die langsamsten Reaktionszeiten insgesamt.

3.3. Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht (off-line-learning)

Um darzustellen, inwiefern sich die Reaktionszeiten ohne weitere Übung verändern, haben wir in Tabelle 8 die Mittelwerte für den letzten Block des ersten Tages und den ersten Block des zweiten Tages für alle Probanden gegenübergestellt.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Reaktionszeiten des letzten Blockes am 1. Tag und des ersten Blockes am 2. Tag über alle Probanden

	Mittelwert der Reaktionszeiten in Sek.	
	Tag 1 Block 8	Tag 2 Block 1
Mittelwert	0,62	0,56
Standardabweichung	0,18	0,16
Median	0,59	0,54
Minimum	0,33	0,31
Maximum	1,09	1,08
N	60	60

Anmerkungen: Sek.: Sekunden, N: Anzahl der Probanden

Man kann erkennen, wie sich die Reaktionszeiten von Block 8 an Tag 1 (0,62s) deutlich verändern und an Tag2 /Block 1 nur noch durchschnittlich 0,56s betragen, somit über Nacht deutlich abnehmen. Hier ist der von uns untersuchte Parameter des off-line-learning oder auch der Konsolidierung über Nacht für alle Probanden dargestellt und nachgewiesen.

Zum Nachweis der statistischen Signifikanz wurde hier der t-Test für gepaarte Stichproben angewandt.. Da Mittelwerte von Stichproben untereinander verglichen wurden, gingen wir von normal verteilten Daten aus.

Tabelle 9: t-Test für gepaarte Stichproben

Test	N	P
t-Test für gepaarte Stichproben	60	0,000

Anmerkungen: N: Anzahl der Probanden, p: Irrtumswahrscheinlichkeit

Es ergibt sich ein hochsignifikantes Ergebnis für den Unterschied der beiden Blöcke, $p=0,000$.

Zur grafischen Veranschaulichung der Unterschiede an den beiden Tagen dient das in Abbildung 4 benutzte Balkendiagramm.

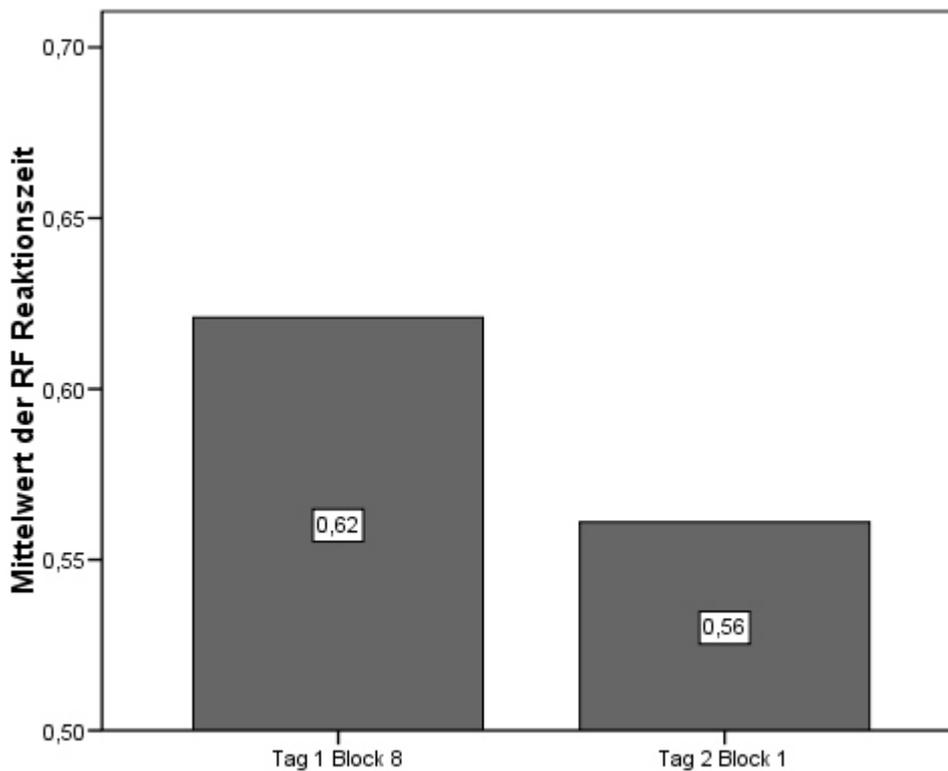


Abbildung 4: Mittelwerte der Reaktionszeiten des 8. Blockes am 1. Tag und des 1. Blockes am 2. Tag über alle Probanden.

Zur besseren grafischen Veranschaulichung der Ergebnisse bezüglich des off-line-learnings dient Abbildung 5, in welcher die Mittelwerte bezüglich des sequenzspezifischen Lernens für alle 60 Probanden für den letzten Block des ersten Tages und den ersten Block des zweiten Tages gegenübergestellt sind. Am Ende des ersten Tages wurde eine durchschnittliche Reaktionszeit von 0,62s erzielt. Nach der Trainingspause über Nacht sehen wir zu Beginn des zweiten Tages eine deutliche Verbesserung der Reaktionszeiten bezüglich des sequenzspezifischen Lernens. Die durchschnittliche Reaktionszeit beträgt zu Beginn des zweiten Testtages nur noch 0,56s.

3.4. Gruppenvergleich der sequenzspezifischen Verbesserung über Nacht (off-line-learning)

Unter 3.3. hatten wir die allgemeine Verbesserung der Reaktionszeiten für alle Probanden beschrieben, nun stellen wir in Tabelle 10 die gruppenspezifischen Differenzen bezüglich des beobachteten Merkmals off-line-learning oder Verbesserung der Reaktionszeiten bezüglich des sequenzspezifischen Lernens über Nacht dar.

Tabelle 10: Gruppenspezifische Differenzen zwischen den Reaktionszeiten des 8. Blocks am 1. Tag und des 1. Blocks am 2. Tag

	Gruppe			
	Gesamt	A	B	C
Mittelwert in Sek.	0,06	0,11	0,05	0,02
Standardabweichung in Sek.	0,10	0,12	0,08	0,08
Median in Sek.	0,05	0,09	0,04	0,04
Minimum in Sek.	-0,23	-0,06	-0,06	-0,23
Maximum in Sek.	0,44	0,44	0,23	0,10
N	60	20	20	20

Anmerkungen: Gruppe A: 6-12 Jahre, Gruppe B: 26-39 Jahre, Gruppe C: 50-75 Jahre, Sek.: Sekunden, N: Anzahl der Probanden

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass in der Gruppe A (6-12 Jahre) die Reaktionszeit über Nacht am deutlichsten abnahm, nämlich um ca. 0,11 Sekunden. Gruppe B (26-39 Jahre) folgt dahinter mit einer Abnahme der Reaktionszeiten über Nacht um ca. 0,5 Sekunden. Die geringste Verbesserung über Nacht im Gruppenvergleich zeigt die Gruppe C (50-75 Jahre). Hier nahm die Reaktionszeit um ca. 0.02 Sekunden ab. Das bedeutet, dass die größte Lernverbesserung über Nacht, im Sinne einer Konsolidierung, die Kindergruppe (A) zeigte.

Zum Nachweis, ob dieses Ergebnis als statistisch signifikant zu werten war, wandten wir die Varianzanalyse an, wie in Tabelle 11 gezeigt.

Tabelle 11: Ergebnis der Varianzanalyse zum Vergleich der Leistungsverbesserung über Nacht über alle Probanden

Test	N	P
Varianzanalyse	60	0,014

Anmerkungen: N: Anzahl der Probanden, p: Irrtumswahrscheinlichkeit

Tabelle 11 zeigt ein signifikantes Ergebnis für die Leistungsverbesserung über Nacht bei $p = 0,014$.

Um zu erfahren, welche Gruppen sich signifikant voneinander unterschieden, setzten wir wiederum ein Post-Hoc-Testverfahren ein und erhielten folgendes Ergebnis (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Post-Hoc-Vergleich mit dem Tukey-HSD-Test zwischen den Gruppen bezüglich des Leistungszuwachses über Nacht

Test	Altersgruppe1	Altersgruppe2	N	P
Varianzanalyse mit Tukey-HSD Post-Hoc-Test	A	B	40	0,152
	A	C	40	0,011
	B	C	40	0,502

Anmerkungen: Gruppe A: 6-12 Jahre, Gruppe B: 26-39 Jahre, Gruppe C: 50-75 Jahre, N: Anzahl der Probanden, p: Irrtumswahrscheinlichkeit

Gruppe A unterschied sich nicht statistisch signifikant von Gruppe B ($p = 0,152$). Gruppe A unterschied sich statistisch signifikant von Gruppe C (p -Wert = $0,011$). Gruppe B und Gruppe C unterschieden sich ebenfalls nicht statistisch signifikant voneinander (p -Wert = $0,502$).

3.4.1. Grafische Darstellung der Verbesserung über Nacht zwischen den Gruppen

In Abbildung 6 ist deutlich zu erkennen, wie die größte Verbesserung über Nacht (off-line-learning) bei der Gruppe der 6-12jährigen ($0,11s$) und geringste Verbesserung über Nacht bei der Gruppe der 50-75-jährigen ($0,02s$) vorliegt. Die Gruppe B liegt dazwischen ($0,05s$).

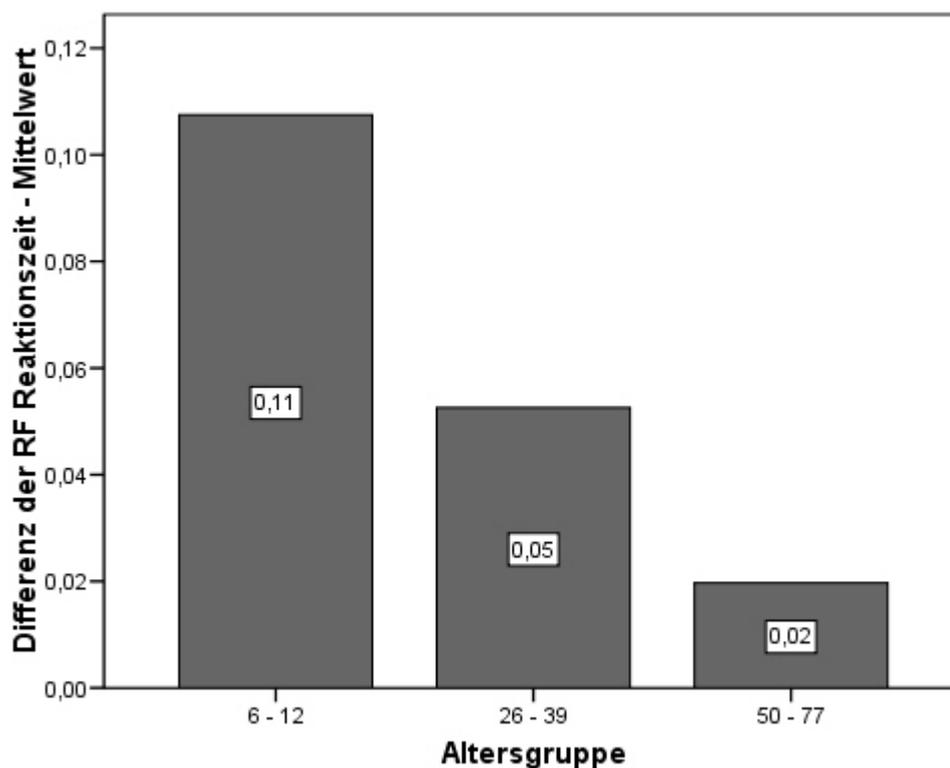


Abbildung 5: Differenz der gemittelten Reaktionszeiten Block8/Tag1 und Block1/Tag2 für die drei Probandengruppen.

3.4.2. Grafische Darstellungen der Verbesserungen Tag 1/ Tag 2

Zur grafischen Veranschaulichung der Gruppenunterschiede über Nacht bezüglich des Lernens der Sequenz sollen Abbildungen 7 bis 9 dienen.

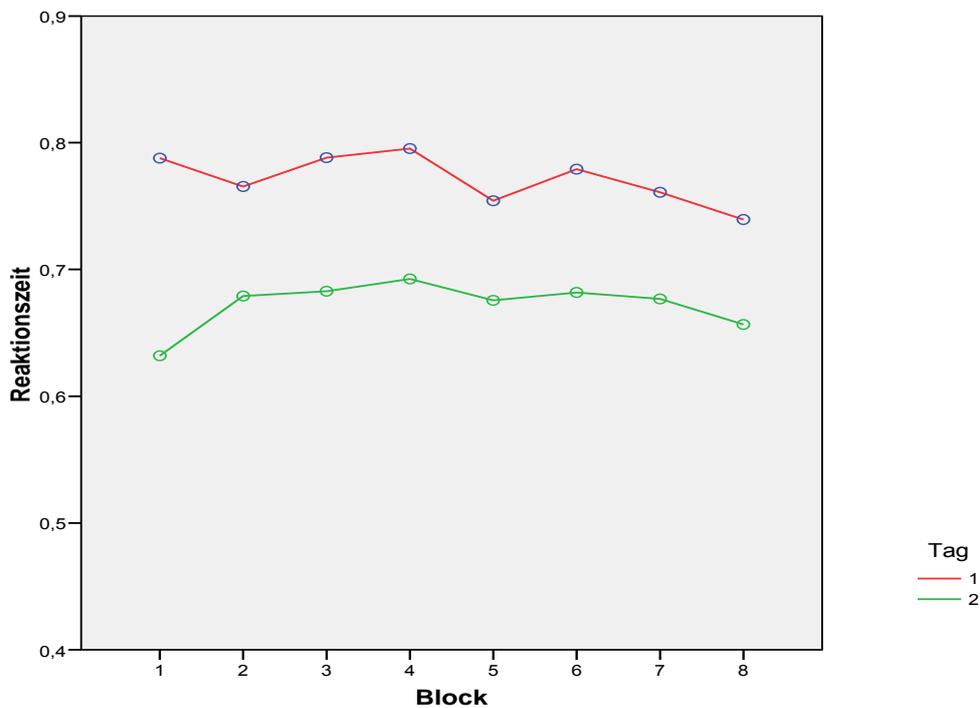


Abbildung 6: Reaktionszeiten in Sek. für die 8 Blöcke für den 1. und 2. Tag der Gruppe A.

Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Reaktionszeiten der 6-12-jährigen zwischen Tag1 und Tag 2. Deutlich zu sehen die Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht (vergleiche rote und grüne Kurve).

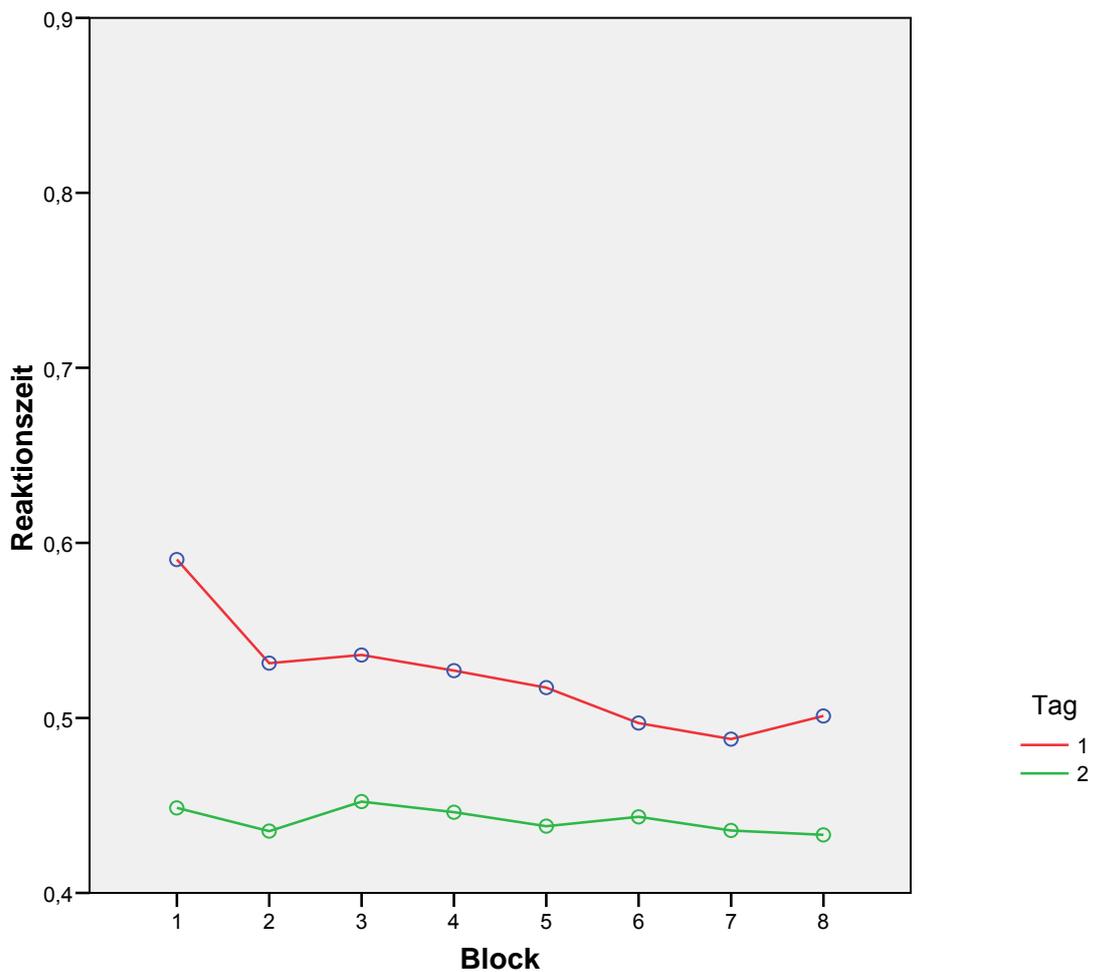


Abbildung 7: Reaktionszeiten in Sek. für die 8 Blöcke für den 1. und 2. Tag der Gruppe B.

Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Reaktionszeiten der 26-39-jährigen zwischen Tag1 und Tag 2. Deutlich zu sehen die Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht (vergleiche rote und grüne Kurve). Insgesamt hier die geringsten Reaktionszeiten an beiden Tagen im Vergleich zu den anderen beiden Gruppen.

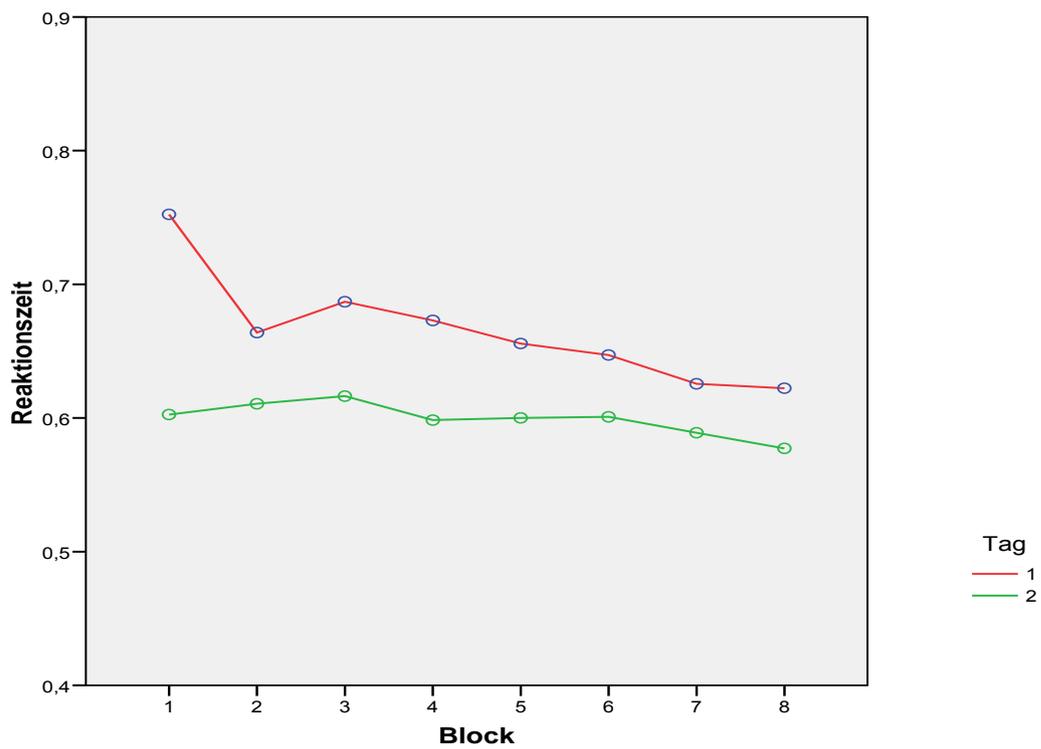


Abbildung 8: Reaktionszeiten in Sek. für die 8 Blöcke für den 1. und 2. Tag der Gruppe C.

Deutlich zu sehen ist der Abfall als Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht (vergleiche rote und grüne Kurve). Beide Kurven liegen dennoch dicht beieinander. Fast kontinuierliche Verbesserung an Tag 1 (rote Kurve).

3.4.3. Regressionsgerade

Um herauszufinden, ob das Alter generell einen Einflussfaktor darstellt, erstellen wir eine Regressionsgerade.

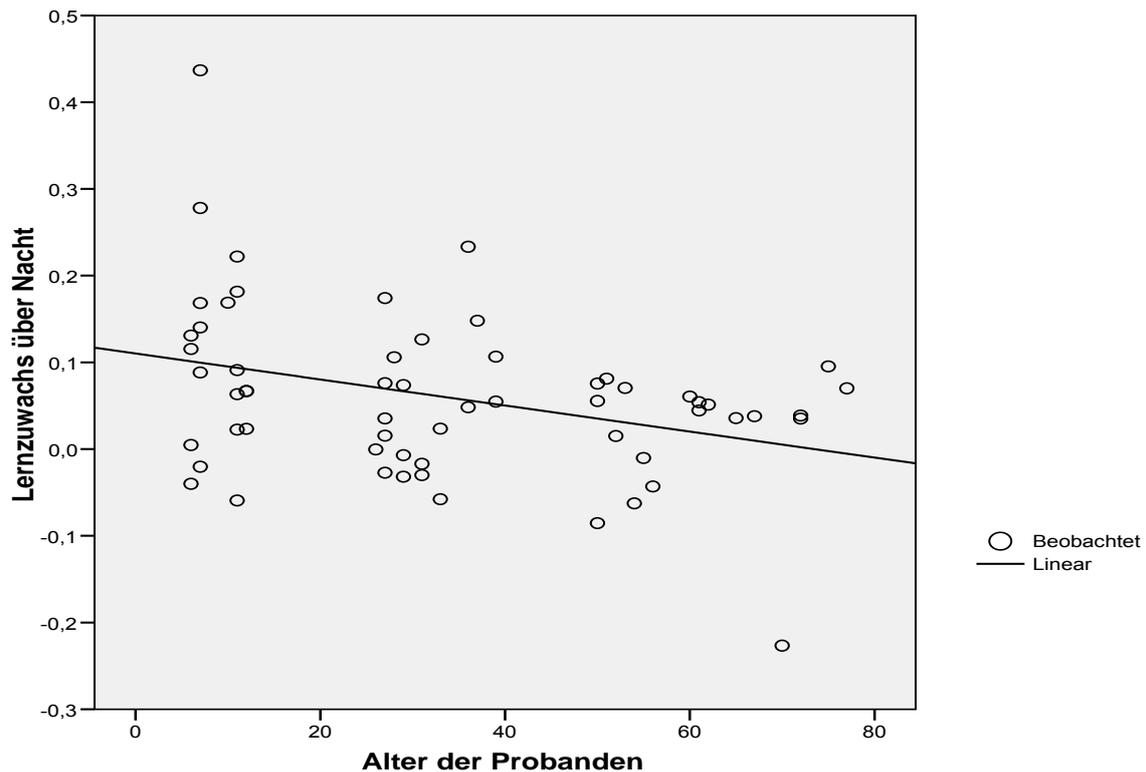


Abbildung 9: Regressionsgerade der Reaktionszeitdifferenz in Sekunden zwischen dem 8. Block am 1. Tag und dem 1. Block am 2. Tag über das Alter der Probanden.

Bei der Berechnung der linearen Regressionsgeraden ergab sich ein Steigungskoeffizient von $-0,34$, welcher sich in der sich senkenden Geraden widerspiegelt. Bei der Absicherung gegen Null erhielten wir für diesen Steigungsparameter eine t-Prüfgröße von $-2,75$, welche mit einer hochsignifikanten Wahrscheinlichkeit ($p = 0,008$) einhergeht.

4. Diskussion

4.1. Repetition Priming aller Probanden insgesamt

Wir beobachteten signifikant messbare Lerneffekte bereits während des ersten Testtages bei der Bearbeitung der seriellen Reaktionszeitaufgabe (SRTT) in allen drei Altersgruppen. Alle Probanden zeigten gemittelt insgesamt eine deutliche Verringerung der Reaktionszeiten bezüglich des sequenzspezifischen Lernens. Die Sequenz wurde erlernt mittels motorischer Übung durch Wiederholung, ohne dass den Versuchsteilnehmern dieses „Lernen“ bewusst war.

Im Vergleich mit vielen der bislang publizierten SRTT-Versionen ermöglicht die hier gewählte Variante von Beginn an eine kontinuierliche Differenzierung zwischen rein visuomotorischen und sequenzspezifischen Anteilen der zu erlernenden Fähigkeiten wie in den Studien von Karni und Hauptmann gezeigt.^{26,25} Sie benutzten beispielsweise 2002 in ihrer Studie, in welcher sie 29 gesunde Probanden im Alter von 24-59 Jahren untersuchten, eine ähnliche Reaktionszeitaufgabe.²⁵

Als Stimulus wählten sie im Gegensatz zu unserer Studie Buchstabenfolgen am Computerbildschirm, anhand derer Probanden sich entscheiden mussten, ob die repräsentierte Anzahl von Buchstaben gerade oder ungerade war und einen dazugehörigen Knopf so schnell und so korrekt wie möglich drücken sollten. In dieser Studie wurden die Probanden in fünf verschiedene Gruppen eingeteilt und die Anzahl der Blöcke zwischen drei und zehn während der ersten Testsitzung variiert. Sie konnten beobachten, dass signifikante Unterschiede zwischen dem Prime- und dem Testblock nur innerhalb der ersten sechs Testblöcke beobachtet werden konnten. Nach dem sechsten Block sättigten die Lernkurven und zeigten keine signifikante Verbesserung der Antwortzeiten mehr in den letzten vier Blöcken.

Wie in Tabelle 5 nochmals zum Vergleich ersichtlich, untersuchten wir ebenfalls die Blöcke gegeneinander am ersten Tag für alle Probanden. Wir erhielten in diesem Blockvergleich gegeneinander signifikante Unterschiede, lediglich Block 3 gegen 2 und Block 4 gegen 3 unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Dies steht im Kontrast zu den Ergebnissen von Hauptmann und Karni in der Studie aus

2002.²⁵ Allerdings stellten wir den Blockvergleich gemittelt für alle Probanden an, sodass gegebenenfalls die altersspezifischen Unterschiede und die damit einhergehenden Komponenten, wie wir unten noch genauer ausführen werden, eine Rolle spielen könnten. Es wäre vorstellbar, dass die Blockvergleiche gegeneinander unserer Gruppe B ähnlich ausfielen, wie in den Studien von Karni und Hauptmann gezeigt. Wir haben die Blockvergleiche für die einzelnen Gruppen jedoch nicht genauer untersucht. Um altersspezifische Unterschiede noch genauer herauszuarbeiten, könnte dieser Sachverhalt in nachfolgenden Studien untersucht werden. Weiterhin unterscheiden sich die Länge der gewählten Blöcke in der Vergleichsstudie von Karni und Hauptmann ebenfalls von unserer gewählten Anzahl. In unserer Studie war die Anzahl der Probanden jedoch doppelt so hoch.

Wie Hauptmann und Karni (2002) beobachteten wir während der ersten Sitzung bei all unseren Probanden einen anwachsenden kontinuierlichen Leistungszuwachs, als repetition priming zu verstehen, welches wir als Erlernen der Sequenz interpretieren. Um die Lernleistung für das sequenzspezifische Lernen während des ersten Tages spezieller vergleichen zu können, schauten wir uns die Mittelwerte für das sequenzspezifische Lernen nochmals genauer an. (vgl. Tabelle 4). Das sequenzspezifische Lernen konnte mit Abnahme der Messwertreaktionszeiten um 0,09 Sekunden hier quantifiziert werden.

Weiterhin untersuchten Karni und Kollegen, in ihrer Studie 2005 publiziert, 32 gesunde Probanden im Alter von 20-35 Jahren in drei verschiedenen Gruppen, ebenfalls mittels einer modifizierten Reaktionszeitaufgabe.²⁶ Sie führten, wie wir in unserer Arbeit, zwei Sitzungen am Computer mit einem Abstand von 24 Stunden durch. In ihrer Aufgabe sollten die Probanden wiederum entscheiden, ob eine bestimmte Anzahl von präsentierten Buchstaben gerade oder ungerade ist und dazu so schnell und korrekt wie möglich mit der nicht dominanten Hand einen von zwei Knöpfen auf einer Computertastatur drücken. Sie wechselten Prime und Testblock, in Kongruenz zu unserer Studie, ab. In jedem Paar wurde ein Block von 16 festgelegten Buchstabenfolgen repräsentiert, der sich mit einem Block abwechselte, in welchem die Buchstabenfolgen zufällig angeordnet waren. Nur der Testblock der beiden Sitzungen wurde verglichen und ausgewertet.

Im Unterschied zu unserem Versuchsaufbau wurde in ihrer Studie in Gruppe A der

Prime-Test-Block am ersten Tag so lange repräsentiert, bis die Antwortzeit unter einem bestimmten Wert lag. Dieser wurde mittels eines speziellen Algorithmus berechnet und garantierte, dass die Trainingsleistung eines jeden Einzelnen ausreichend war, um eine Sättigung der repetition-priming-Effekte zu erzielen. Die Probanden mussten also die Sitzung so lange durchführen, bis ein messbarer Lerneffekt eingetreten war und nicht mehr verbessert wurde. In Gruppe B und C wurde unabhängig von der Antwortreaktionszeit eine festgelegte Anzahl von Prime-Test-Blöcken gezeigt. In der ersten Testsitzung wurde also diesbezüglich ein Unterschied zwischen den Gruppen gemacht. Diese beruhte auf der vorher gemachten Beobachtung bei Gruppe A, nach wie vielen Blöcken in etwa durchschnittlich eine Sättigung der Lernkurve erreicht werden konnte. In der zweiten Testsitzung waren alle Blöcke bei den drei Gruppen identisch und nicht von individueller Leistung abhängig. Gruppe B und C wurden posthoc nach ihrer Leistung am ersten Tag eingeteilt. Gruppe B konnte eine Sättigung der Lernkurve erzielen. In Gruppe C wurde keine Sättigung erreicht.

Ein weiterer Unterschied zu unserem Versuchsaufbau besteht darin, dass sie einen Zwischenblock zusätzlich benutzten und nicht nur Random und festgelegte Sequenzabfolge abwechselten. Insgesamt werden als Fortführung ihrer Studienergebnisse bei unserem Versuchsaufbau bereits bei den Probanden eine Anzahl von Blöcken benutzt (acht pro Tag), die bei allen Probanden eine Sättigung der Lernkurve erwarten ließen.

In den Ergebnissen von Hauptmann und Karni 2005 wurde dargestellt, dass repetition priming ein durchgängiges Phänomen darstellt, welches nach einer begrenzten Zahl von Wiederholungen gesättigt wird. Auch wir können, wie im Vergleich in Abbildung 4 erkenntlich, einen deutlich abfallenden Kurvenverlauf und somit ein repetition priming bei den Probanden bestätigen.

Weiterhin stellten sie in dieser Arbeit dar, dass diese Sättigung nicht korreliert mit dem Leistungszuwachs zwischen den Sitzungen und der Konsolidierung (off-line-learning). Dies werden wir weiter unten aufgreifen und diskutieren.

Wir interpretieren unsere oben ausgeführten Ergebnisse am ersten Untersuchungstag, also die Verbesserung der Reaktionszeiten, als ein Erlernen der Sequenz oder stattgefundenes repetition priming in Kongruenz mit den anderen beschriebenen Studien.

4.2. Repetition priming im Gruppenunterschied

4.2.1. Gruppe A (6-12 Jahre)

Die Kindergruppe zeigte bezüglich des von uns untersuchten repetition primings die geringste Lernverbesserung am ersten Tag im Vergleich mit den anderen beiden Gruppen. Wie Tabelle 6 zeigt, unterschied sich die Lernleistung der Gruppe A hinsichtlich des repetition primings am ersten Tag hochsignifikant von Gruppe B, aber nicht von Gruppe C, obwohl diese die deutlichste Lernverbesserung insgesamt am ersten Tag erzielten. Die Gruppenmittelwerte für die acht Blöcke der Sequenz der Gruppen A (0,739-0,795 Sekunden) und C (0,622-0,752 Sekunden), (vgl. Tabelle 7), liegen in einer ähnlicheren Größenordnung wie die der Gruppe B (0,488-0,591s) und unterscheiden sich demzufolge nicht signifikant voneinander.

Wir können also die Aussage treffen, dass die Gruppen A und C am ersten Tag in etwa gleich schnell oder langsam waren und sich daher in Bezug auf das repetition priming nicht signifikant unterschieden. Wir haben uns nun gefragt, womit sich diese Unterschiede im Lernverhalten begründen lassen.

In der Gruppe der 6-12-jährigen war auffällig, dass diese hinsichtlich der allgemeinen Reaktionszeiten am ersten Tag insgesamt am langsamsten waren und weiterhin eine große Schwankungsbreite innerhalb der ersten Testsitzung aufwiesen (vergleiche hierzu Kurvenverlauf in Abbildung 4). Dies könnte hiermit zu erklären sein, dass die Tastatur für Kinderhände schwerer zu bedienen war, da die Tasten im Verhältnis weit auseinander lagen. Hier könnten die erwachsenen Probanden im Vorteil gewesen sein, was die motorische Geschicklichkeit und Körperbeherrschung betraf. Weiterhin war bei den Kindern auffällig, dass die Konzentration nicht stringent aufrechterhalten werden konnte, sie zeigten eine kürzere Aufmerksamkeitsspanne im Vergleich mit den erwachsenen Probanden, was sicherlich zu verlängerten Reaktionszeiten und Fehlern führte, vor allem im Verlauf des ersten Testtages, an welchem die Kinder mit neuem, unbekanntem Stimulusmaterial konfrontiert waren. Weiterhin zeigte sich bei den Kindern eine erhöhte Ablenkbarkeit und Reizoffenheit im Vergleich zu den erwachsenen Probanden. Die Kindergruppe war durch Misserfolge leichter demotiviert

(Misserfolgsempfindlichkeit durch akustisches Signal) und zeigte eine geringere Frustrationstoleranz, dies könnte eine weitere Auswirkung auf die nachfolgende Leistung gehabt haben. Einige junge Probanden wandten sich nach Ertönen des akustischen Signals ab, wirkten enttäuscht, demotiviert oder frustriert oder nahmen die Arbeit nur verzögert wieder auf, was sich in den Testergebnissen teilweise widerspiegelte.

Dennoch konnten wir ebenfalls wie Dorfberger und Mitarbeiter in ihrer Studie 2006 nachweisen, dass bei Kindern vor dem Einsetzen der Pubertät, wie in unserer Studie, Gewinne bei motorischen Lernaufgaben innerhalb eines Tages erzielt werden können.¹⁹ Die Autoren hatten 9-, 12-, und 17-jährige mittels Motor-Sequenz-Lernaufgaben untersucht und herausgefunden, dass bei allen drei Altersgruppen die Geschwindigkeit des Lernens während einer Trainingseinheit ansteigt. Sie verwendeten modifizierte SRTT, hier das Erlernen und Behalten einer Finger-zu-Daumen- Oppositionsbewegungssequenz. Dieses Ergebnis, dass bei jungen Probanden ein Training bezüglich einer motorischen Bewegungsabfolge verbessert wird, konnten wir bestätigen. Weiterhin gaben sie an, dass die Leistung und Genauigkeit mit zunehmendem (höherem) Alter zunahm. Zusammengefasst stellten sie fest, dass Kinder vor der Pubertät keinen Vorteil im Erwerb von motorischen Bewegungsabläufen gegenüber jungen Erwachsenen aufzeigen.¹⁹

Wir haben im Unterschied zu dieser Studie 6-12-jährige in einer Gruppe zusammengefasst und gegen andere Altersgruppen verglichen. In unserer Studie wurde eine Altersgruppe vor Beginn der Pubertät untersucht, in welcher davon auszugehen ist, dass Umbauprozesse auf neuronaler Ebene, welche in der Pubertät nachgewiesen worden sind, noch keine große Rolle spielen. Im jugendlichen Gehirn reifen Bereiche nach, die für Sprache und räumliches Denken wichtig sind, später auch Bereiche im präfrontalen Cortex.⁴⁶ In ihrer Studie untersuchten Daselaar und Kollegen mittels fMRI erwachsene Probanden mithilfe einer seriellen Reaktionszeitaufgabe daraufhin, welche Hirnregionen bei Durchführen der Aufgaben aktiviert wurden und ob sich die Gruppen diesbezüglich unterschieden. In der Aktivität der Hirnregionen fanden sie bezüglich des Unterschiedes in beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede. Beide aktivierten bilaterale, parietale und frontale Hirnregionen, Cerebellum und Regionen in den Basalganglien.¹⁷ Hier haben wir nochmals wissenschaftlich überprüfte Hinweise darauf, dass Hirnregionen in prozedurale Lernvorgänge involviert sind, die in

der Pubertät Umbauprozessen und Reifung unterliegen, die in einem bestimmten Alter erfolgen und daher Unterschiede erwartbar sind, die durch die Hirnentwicklung bedingt und zum Teil begründbar wären.

Wilson und Mitarbeiter untersuchten 2003 in ihrer Studie 20 Kinder im Alter von 8-12 Jahren mittels einer ähnlichen Reaktionszeitaufgabe. Bei zehn Kindern lag eine entwicklungsbedingte Koordinationsstörung vor (ermittelt durch Movement-ABC). Die anderen zehn Kinder hatten keine diagnostizierte Störung und dienten als Kontrollgruppe.⁷³ Die Kinder absolvierten an einem einzigen Testtag fünf Testblöcke. In den ersten vier Blöcken wurde die Sequenz repräsentiert, im letzten war die Reizpräsentation zufällig. Sie stellten fest, dass die Kinder in der gesunden Kontrollgruppe zwar insgesamt schneller antworteten als die Kinder mit der entwicklungsbedingten Koordinationsstörung (DCD), jedoch beide Gruppen eine Verbesserung in Relation von ihrer Ausgangsleistung zeigten, also ein repetition priming in beiden Gruppen stattfand. Genau wie sie konnten wir eine Verringerung der Reaktionszeit am ersten Testtag für die gesamte Kindergruppe beobachten.

Ähnliche Resultate erzielten Meulemans und Kollegen in ihrer Studie 1998, in der sie das Erlernen einer Sequenz bei Kindern, hier als repetition priming bezeichnet, nachwiesen.³⁸

Diese Arbeiten sind trotz unterschiedlichen Versuchsaufbaus und modifizierter SRTT's in Kongruenz mit unseren Ergebnissen zu sehen. Unsere Gruppe der 6-12-jährigen Kinder, entwicklungspsychologisch vom Alter als Phase der Latenz vor Eintritt in die Pubertät definiert, erlernte während des ersten Testtages die Sequenz.

4.2.2. Gruppe B (26-39 Jahre) und Gruppe C (50-75 Jahre)

Gruppe B verbesserte ihre Lernleistung für die Sequenz am ersten Testtag. Ihre Gruppenmittelwerte waren im Vergleich zu den anderen beiden Gruppen, insgesamt gemittelt, die schnellsten, im Bereich von 0,488-0,591 Sekunden (siehe auch Tabelle 7). Gruppe B unterschied sich hinsichtlich des repetition primings am ersten Tag hochsignifikant von beiden anderen Gruppen (siehe Tabelle 6). Bei dieser Gruppe (26-39-jährige) wurde die Reaktionszeit für das sequenzspezifische Lernen am ersten Tag im Mittel um 0,9 Sekunden verbessert. Wir sahen eine insgesamt fast konstante

Leistungssteigerung am ersten Tag (vergleiche grünen Kurvenverlauf in Abbildung 4).

Optimale Anpassung an die Testbedingungen, gute Konzentrationsfähigkeit, eine stringente Arbeitshaltung während des gesamten Testverlaufes sowie benötigte motorische Geschicklichkeit spielten hierbei, nach unserer Beobachtung eine Rolle und könnten zur Interpretation der schnellen Reaktionszeiten herangezogen werden. Die Reaktionszeiten verbesserten sich konstant während des ersten Testtages für die Sequenz sowie auch für die Randomabfolge, in der Sequenz jedoch deutlicher und erreichten am ehesten eine Sättigung, d.h. einen asymptotischen Verlauf.

Diese Ergebnisse decken sich mit sämtlichen vergleichenden Studien, welche verschiedene Altersgruppen untersuchten oder gegenübergestellt haben, wie beispielsweise in den Studien von Daselaar oder Karni.^{17,26,25} Daselaar und Kollegen beobachteten in ihrer Studie 2003 ebenfalls schon während der ersten Sitzung signifikante Lerneffekte. Sie untersuchten 26 junge (30-35 Jahre) und 40 ältere Menschen (63-71 Jahre) in zwei Gruppen und beobachteten bereits während der ersten Sitzung signifikante Lerneffekte für beide Altersgruppen, was das sequenzspezifische Lernen betraf. Sie arbeiteten ebenfalls mit einer seriellen Reaktionszeitaufgabe (SRTT). Beide Gruppen zeigten eine Reduktion der Reaktionszeiten für die Sequenz, aber der Lerneffekt für die jüngere Gruppe, hier mit unserer Gruppe B der 26-39-Jährigen zu vergleichen, war deutlicher. Sie postulierten, dass der primäre Lernzuwachs schneller erfolgt im Vergleich mit älteren Erwachsenen.¹⁷

Wir hingegen sahen im Gegensatz zu diesen Ergebnissen eine größere Reduktion der Reaktionszeiten für das sequenzspezifische Lernen bei den älteren Probanden während der ersten Testsitzung. In unserer Studie erreichten die ältere Erwachsenengruppe (50-75-jährige) die größte Verbesserung am ersten Tag hinsichtlich des repetition primings, also der frühen Lernphase innerhalb einer Trainingssitzung. Ihre Verbesserung betrug im Mittel 0,130 Sekunden für das sequenzspezifische Lernen (Vergleich Block acht gegen Block eins des ersten Tages). Die allgemeine Abnahme der Reaktionszeiten insgesamt ist hier am deutlichsten, für die Sequenz jedoch eindeutiger.

Erklärungsmodelle ausgehend von unserer Beobachtung könnten sich auf den vorsichtigen Beginn (Scheu vor dem Computer) beziehen und die deutliche Leistungssteigerung nach Eingewöhnung ab dem zweiten Block mit kontinuierlicher

Leistungsverbesserung, in Abbildung 4 am blauen Kurvenverlauf zu vergleichen. Da sie eindeutig am langsamsten begannen, konnten sie auch an Tag 1 die höchste Leistungssteigerung, erkennbar an der Abnahme der Reaktionszeiten, erzielen.

Daselaar und Kollegen stellten signifikante Lerneffekte in der ersten Testsitzung für beide Altersgruppen fest. Beide Gruppen zeigten eine deutliche Reduktion der Antwortzeiten für die Sequenz im Vergleich mit der randomisierten Tastenfolge. Der Lerneffekt für die jüngere Gruppe war größer. Sie stellten jedoch dar, dass repetition priming-Lerneffekte auch in der älteren Gruppe vorhanden sind, diese jedoch langsamer erfolgten. In Übereinstimmung mit der Studie von Daselaar und Kollegen stellen wir als Resultat fest, dass motorisches Erlernen von Fertigkeiten bei älteren Erwachsenen intakt ist und erfolgt. Wir konnten diesbezüglich in unserer Arbeit die Ergebnisse überprüfen und um eine weitere Gruppe, hier Gruppe A erweitern.

Auch Rodrigue und Mitarbeiter untersuchten in ihrer Studie 2005 Probanden zwischen 23 und 77 Jahren. Sie stellten ebenfalls dar, dass ältere Menschen erfolgreich neue motorische Aufgaben erlernen können und ihre Leistung durch Training steigern konnten. Sie führten diese Erhebung über einen Zeitraum von fünf Jahren durch. Sie machten jedoch auch weiterhin deutlich, dass für alle Probanden unabhängig vom Alter Geschwindigkeit und korrektes Arbeiten zunehmen mussten, um einen asymptotischen Lernkurvenverlauf zu erreichen.⁵⁵

Weiterhin wurden diese Lerneffekte am ersten Tag auch in den Studien von Hauptmann und Karni beobachtet, welche wir oben schon genauer ausgeführt haben.^{26,25}

Die Ergebnisse all dieser Arbeiten konnten wir insofern bestätigen, dass auch bei uns in diesen beiden Gruppen signifikante Lernverbesserungen während des ersten Tages beobachtet werden konnten, also ein repetition priming bezüglich des sequenzspezifischen Lernens stattfand.

4.3. Verbesserung über Nacht (off-line-learning)

Das off-line-learning, also die Verbesserung der Lernleistung ohne weiteres Üben in der Lernpause, stellt eine wesentliche Komponente der prozeduralen Konsolidierung dar. Dieses Phänomen haben wir ebenfalls hier in unserer Studie untersucht. Unsere Probanden verbesserten in unserer Studie über Nacht ohne weitere Übung ihre Lernleistung, welches wir hier mit off-line-learning als Parameter der prozeduralen Konsolidierung gleichsetzen.

Bereits Robertson und Kollegen bezeichneten 2001 in ihrer Studie mit Konsolidierung das Ausbilden von Erregungsleitungen zwischen Nervenzellen, im weiteren Sinne also die Verfestigung von Gedächtnisinhalten. Prozedurale Konsolidierung bildete somit einen Überbegriff, der benutzt wurde, um die Verarbeitung einer gespeicherten Struktur zu beschreiben, „nachdem diese geübt und im Gedächtnis verschlüsselt oder kodiert“ wurde.⁵¹

1996 beschrieben und beobachteten Brashers-Krug und Kollegen ebenfalls in ihren Studien ein fortbestehendes Lernen nach Übungsende, welches also weiterhin anwächst, auch nach Beendigung weiterer praktischer Übung als ein Phänomen, welches sie als Konsolidierung bezeichneten. Sie untersuchten in ihrer Studie 70 gesunde Probanden zwischen 18-35 Jahren mittels einer motorischen Lernaufgabe. Die Probanden trainierten, bestimmte Zielbewegungen zu erreichen, mithilfe eines kraftunterstützenden Manipulators. Sie unterteilten ihre Probanden in sechs verschiedene Gruppen und führten die zweite Testsitzung mit verschiedenen Abständen durch. Sie konnten eine Störung der Konsolidierung, also eine Verbesserung der motorischen Lernleistung nachweisen, wenn die zweite Sitzung mit einem Abstand stattfand, der kürzer als vier Stunden war.⁸

Bezugnehmend unter anderem auf diese Studie wurden in unserem Studiensetting Intervalle zwischen den beiden Sitzungen gewählt, die mindestens 24 Stunden lang waren und maximal 28 Stunden betragen. Der Versuchsaufbau wurde inzwischen entscheidend verändert. Galt es damals, wirklich komplexe Zielbewegungen zu erreichen, haben wir in unserer Studie die Versuchsbedingungen dahingehend wesentlich vereinfacht. Unsere umgebaute und benutzte Tastatur verlangt keinerlei

spezielle motorische Fertigkeit, die bei Kindern beispielsweise schlechter entwickelt sein kann. Dennoch werden durch die Wiederholung der Bewegungen ein bestimmtes motorisches Muster und ein festgelegter Bewegungsablauf immer und immer wieder trainiert und wie beobachtet erlernt. Das Verbessern dieser speziell trainierten Fertigkeit zwischen den Testsitzungen, wie unter anderem in den Arbeiten von Hauptmann und Kollegen beschrieben, konnten wir ebenfalls beobachten.²⁶

Dieses off-line-improvement kommt ohne weitere motorische Übung vor und ist laut Robertson und Kollegen oft abhängig vom Schlaf.^{53,54} Die Verbesserung einer Leistung ohne Übung über Nacht wird off-line-learning genannt.^{26,51} Des Weiteren zeigten Hauptmann und Karni diese Lernphänomene 2002 in ihrer Studie, in welcher sie 29 gesunde Probanden im Alter von 24-59 Jahren untersuchten. Sie benutzten eine unserem Versuchsaufbau ähnelnde Reaktionszeitaufgabe. Sie wählten dazu Buchstabenfolgen am Computerbildschirm, anhand derer der Proband sich entscheiden musste, ob die repräsentierte Anzahl von Buchstaben gerade oder ungerade war und einen dazugehörigen Knopf so schnell und so korrekt wie möglich drücken sollte. Den Versuchsaufbau hatten wir oben bereits schon einmal beschrieben. In dieser Studie wurden die Probanden in fünf verschiedene Gruppen eingeteilt und die Anzahl der Blöcke während der ersten Testsitzung variiert. Weiterhin absolvierten drei Gruppen ihre nachfolgende Sitzung im Abstand von 24 Stunden und zwei Gruppen absolvierten nach einem Abstand von 40-44 Stunden die zweite Sitzung.

Bezogen auf das off-line-improvement gelangten sie zu folgenden Ergebnissen. Sie stellten fest, dass die wie in dieser Arbeit unter 4.2.2 oben beschriebene Sättigung der Lernkurve am ersten Tag nicht korreliert mit dem Leistungszuwachs zwischen den Sitzungen und der Konsolidierung (off-line-improvement). Gleichzeitig scheint aber die Sättigung der Lernkurve notwendig zu sein, um Konsolidierungsphänomene zu zeigen.²⁵

Wir konnten in Übereinstimmung mit den Ergebnissen vorhergehender Studien ein off-line-learning bei unseren Probanden beobachten. Somit können wir diesbezüglich die Ergebnisse vorhergehender Studien, wie beispielsweise bei Press und Mitarbeitern 2005, Robertson und Mitarbeitern 2005 und Shadmehr & Brashers-Krug 1997, bestätigen.^{8,25,26,54}

4.4. Off-line-learning im Gruppenvergleich

. Der Paarvergleich der Altersgruppen 6-12 Jahre (Gruppe A) und 50-75 Jahre (Gruppe C) zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied. Im Vergleich der beiden Gruppen mit Gruppe B ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. (vgl. Ergebnisse unter 3.4.) Die 6-12 jährigen in Gruppe A konnten ihre Leistung über Nacht am meisten verbessern, sie erzielten eine quantitative Verbesserung von 0,11 Sekunden und konsolidierten somit in unserem Gruppenvergleich am besten. (vgl. Abb. 6). Gruppe B verbesserte ihre Lernleistung bezüglich des sequenzspezifischen Lernens um 0,05 Sekunden. In Gruppe C wurde die Reaktionszeit über Nacht ohne weiteres Üben um 0,02 Sekunden verbessert. Für unsere Studie ließe sich diesbezüglich folgende Aussage treffen: je jünger die Probanden sind, desto höher ist die Leistungsverbesserung über Nacht ohne weiteres Üben.

Reine Zeitabhängigkeit von impliziten Lernvorgängen wie in den Studien von Brashers-Krug und Kollegen untersucht, würde noch keine Unterschiede zwischen den Gruppen, wie wir diese hier in unserer Studie beobachten konnten, erklären können.⁸ Es muss also noch andere Parameter geben, die einen Einfluss auf Konsolidierungsphänomene und Leistungszuwachs haben könnten. Einer könnte das Alter sein. Bisher gibt es sehr wenige vergleichende Studien, die sich mit dem Einfluss des Alters auf Konsolidierungsprozesse beschäftigt haben.

In ihrer Studie 2003 untersuchten Churchill und Kollegen Ratten und den Zusammenhang des Alters auf das prozedurale Gedächtnis. Sie untersuchten 55 Tiere in drei Altersgruppen, 2-Monate alte Ratten, 6-Monate-alte Ratten und 28-30 Monate alte Ratten. Die Tiere wurden trainiert, einen erhöhten Hindernisparcour zu durchlaufen, welcher eine beachtliche motorische Koordination erforderte und maßen die Zeit. Sie trainierten die Ratten an jeweils sechs Tagen und verglichen die Zeiten miteinander. Die Tiere zeigten alle eine Leistungsverbesserung, aber zwischen den Gruppen fand sich kein statistisch signifikanter Unterschied.¹³

2010 publizierten Ferman und Karni eine Studie von 8- sowie 12-jährigen Kindern und jüngeren Erwachsenen bezüglich des impliziten Fertigkeitserwerbs und benutzten als zu erlernende Fertigkeit, eine Sprachaufgabe (AMR= Artificial Morphological Rule).

Hierbei kamen sie zu dem Ergebnis, dass keine Vorteile in der Kindheit bezüglich des Erwerbs von diesen definierten Fertigkeiten bestanden. Aber sie unterstützten die Ansicht, dass eine altersabhängige Reifung im Verlauf der Gedächtnisentwicklung erfolgt.²¹

Brown und Kollegen publizierten 2009 eine Studie, in der sie ebenfalls jüngere und ältere Erwachsene mittels einer seriellen Reaktionszeitaufgabe mit einem Abstand der zweiten Sitzung nach 24 Stunden untersucht hatten. Sie stellten in Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen schnellere Reaktionszeiten in der zweiten Testsitzung insgesamt bei der jüngeren Erwachsenenengruppe (bei uns Gruppe B) fest. Im Vergleich zu der älteren Gruppe zeigte die jüngere Erwachsenenengruppe einen größeren Anstieg bezüglich des sequenzspezifischen Lernens zwischen der ersten und der zweiten Sitzung. Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen zu sehen.¹¹

Nemeth und Kollegen untersuchten in ihrer Studie 2010 Alterungseffekte auf den zeitlichen Verlauf des impliziten Fertigkeitserwerbs. Sie untersuchten jüngere (19- und 20-jährige) und ältere (65-67-jährige) Erwachsene und führten ebenfalls eine modifizierte SRTT mit ihnen durch, welche in verschiedenen Gruppen nach Intervallen von 12 Stunden, 24 Stunden und einer Woche wiederholt wurden. Bei den jungen Erwachsenen fanden sie Verbesserungen der Konsolidierung bei allen drei Zeitintervallen. Bei den älteren Erwachsenen zeigte sich nur nach dem 12-Stunden-Intervall eine Konsolidierung im Sinne einer Gesamtverbesserung der Reaktionszeiten. Diese Verbesserung war schwächer als die der jüngeren Erwachsenen und fand sich nach den 24-Stunden-Intervallen und einer Woche nicht mehr.⁴²

Weiterhin verglichen sie noch die Gruppenunterschiede für das sequenzspezifische Lernen, wie wir dies in unserer Studie ebenfalls differenzierten. Es fanden sich in beiden Altersgruppen keine Verbesserungen im Sinne einer konsolidierten Leistung, wobei die jüngere Gruppe, ihre in der ersten Testsitzung erworbene Leistungsverbesserung, beibehalten konnte. Es gab keine Unterschiede bezüglich der Zeitintervalle. Die jüngeren Probanden zeigten insgesamt auch hier schnellere Reaktionszeiten, welches wir auch in unserer Studie beobachten konnten.⁴²

Die Ergebnisse dieser Studie stehen im Kontrast zu unseren Ergebnissen, konnten wir doch nach einem 24-Stunden-Intervall ein sequenzspezifisches Lernen im Sinne einer Konsolidierung oder eines off-line-learning für alle drei Altersgruppen ausmachen.

Bezüglich der Konsolidierung über Nacht für das sequenzspezifische Lernen fand sich bei uns zwischen Gruppe B und C kein signifikanter Unterschied.

Dennoch ist laut der aktuellen Studienlage davon auszugehen, dass nicht nur zeitabhängige Variablen, sondern auch das Alter und weitere Faktoren wie beispielsweise kognitive und soziale Kompetenzen einen Einfluss auf Lernprozesse haben könnten.

4.5. Allgemeine Betrachtungen der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Alter

Unsere Probanden verbesserten, wie erwartet, ihre Leistungen beim Ausführen der seriellen Reaktionszeitaufgabe. Darüber hinaus konnten verzögert auftretende Leistungsverbesserungen über Nacht ohne zusätzliche Übung nachgewiesen werden.

Wie in den Studien von Hauptmann und Mitarbeiter 2002 und 2005 begann der prozedurale Fertigkeitserwerb zunächst mit einer ausreichenden Anzahl notwendiger Expositionen gegenüber der zu erlernenden Aufgabe und setzte sich in einer späteren Phase mit Konsolidierungsphänomenen im übungsfreien Intervall fort.^{26,25} Für unsere Probanden konnten verzögerte Leistungsverbesserungen über Nacht nachgewiesen werden, sodass die Trainingsdauer anscheinend ausreichend war, um diese als Ausdruck von stattgehabten Konsolidierungsprozessen zu triggern.²⁶

Wir konnten aus den hier gewonnenen Daten Unterschiede zwischen den Altersgruppen für frühe Lernprozesse ausmachen. Die Verbesserung der Reaktionszeiten als Funktion fortschreitender Übung entsprach der modellhaften Lernkurve mit initial schnellen Leistungsverbesserungen, die im Verlauf des Trainings einer Sättigung unterliegen und so geschaffene Voraussetzungen für angestoßene Konsolidierungsprozesse anzeigen. Bei der alternierenden Präsentation der Stimuli in zufälligen und regelmäßigen Sequenzen, wie 1993 von Stadler postuliert, dissoziieren die Kurven mit fortschreitendem Erlernen der Sequenz, da die regelhafte Sequenz unbewusst erlernt und die Reaktionszeiten somit schneller werden.⁶⁷ Dieser Versuchsaufbau im Gegensatz zum klassischen Aufbau bei Nissen und Bullemer⁴⁴ erscheint realitätsnäher, da auch im alltäglichen Leben das Erlernen von motorischen Fähigkeiten immer wieder durch andere Dinge unterbrochen wird und auch im Alltag

nicht stringent hintereinander geübt wird und wurde daher unter Anderem in dieser Studie benutzt.

Methodenkritisch ist zu bedenken, dass es „Alterslücken“ in unserer Arbeit gibt. Probanden unter sechs Jahren wurden aufgrund der nicht ausreichend entwickelten motorischen Fertigkeiten nicht berücksichtigt. Zusätzlich können in der Gruppe der 6-12-jährigen auf der Ebene der basal-kordinativen Funktionen Probleme mit dem Timing von Bewegungen oder Motivationsprobleme auftreten. Diese ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. In diesem Alter gibt es häufig auf der Ebene der motorischen Organisation, d.h. bei der Planung und Integration von Bewegungen noch Schwierigkeiten, ohne dass hier ein Störungsausmaß erreicht werden muss, welchem Krankheitswert zuzuordnen ist.⁷³

Bei der Testung von Kindern im Grundschulalter müssen laut unserer Beobachtung weiterhin Probleme, wie: keine stetige Arbeitshaltung, deutliche Motivationsschwankungen, kürzere Aufmerksamkeitsspanne, höhere Misserfolgsempfindlichkeit, geringere Frustrationstoleranz und Unsicherheiten gegenüber den fremden Testbedingungen mitbeachtet werden.

Die Unterschiede der psychologischen und sozialen sowie kognitiven Kompetenzen müssen in der Betrachtung unserer Ergebnisse eine Rolle spielen, da die Testergebnisse hierdurch entscheidend mitbeeinflusst werden könnten, ohne dass hierfür unser Studiendesign verantwortlich wäre. Beispielsweise durch den Aufbau unserer Tastatur können Unterschiede, die altersbedingt auftreten können, wie Kraftkontrolle und –dosierung weitestgehend ausgeschlossen werden. Wir testeten sämtliche Probanden, explizit die Kinder, in einer ihnen vertrauten Umgebung (bei den Kindern im Klassenraum), um Störeinflüsse wie Unsicherheiten gegenüber einer fremden Umgebung oder ähnliches möglichst gering zu halten.

Das Alter 0-5 Jahre, 13-19 Jahre, 41-49 Jahre und über 75 Jahre ist in unserer Arbeit nicht berücksichtigt. Für die Zukunft wäre zu wünschen, dass diese Alterslücken durch Folgestudien geschlossen werden können. Es wäre jedoch erwartbar, dass der von uns in dieser Studie aufgezeigte Trend, dass früher Lernfertigkeitserwerb und Konsolidierungsprozesse einen Bezug zum Alter erwarten lassen, sich auch dann darstellen ließe.

In Abbildung 10 ist die Abhängigkeit der Konsolidierung vom Alter grafisch dargestellt.

Wir konnten insgesamt einen signifikant messbaren Zusammenhang mit dem Alter nachweisen. Um die Bedeutung dieser Grafik zu verdeutlichen, möchten wir nun im Kontext dieser Arbeit auch neuroanatomische Aspekte und deren Entwicklung kurz beleuchten. Diese Unterschiede in der Gedächtnisentwicklung könnten neben anderen Faktoren auch altersspezifische Unterschiede, die in unserer Studie untersucht wurden, wie das Erlernen der Sequenz am ersten Tag und Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht, erklären. Entwicklungsaspekte beziehen sich beispielsweise auf die neuronale Reifung, wie Munakata 2004 in seinen Arbeiten erläuterte.⁴¹ Die Frage nach der lokalen Zuordnung von Funktionsbereichen innerhalb des Gehirns versus der Vorstellung, dass letztendlich alle Bereiche ihren Anteil an allen Prozessen beitragen wird bis heute kontrovers diskutiert. Eine weitere ungeklärte Frage ist, inwieweit die Spezialisierung bereits angelegt ist oder durch Erfahrungen erlernt werden kann, wie verschiedene Autoren in ihren Arbeiten diskutieren.^{61,18}

Wir konnten nachweisen, dass spezielle Gedächtnisleistungen, wie beispielsweise Priming und Konsolidierung, Lernprozesse sind, welche einer messbaren Veränderung unterliegen. Für den Bereich der Gedächtnisleistungen legen die Befunde von Patienten mit nachweislichen Hirnschädigungen, Erkenntnisse aus Bildgebung und elektrophysiologischen Zellaufzeichnungen nahe, dass vor allem drei anatomische Kernbereiche existieren: der posteriore Kortex für das semantische Wissen (Faktenwissen, z.B. Begriffe oder Merkmale von Objekten), hippocampale Strukturen für episodisches Wissen (Erinnerung für Erlebnisse, beispielsweise in bestimmten Situationen geführte Gespräche) und der präfrontale Kortex für Arbeitsgedächtnisleistungen.⁴¹ Der Hippocampus ist auch für die Gedächtniskonsolidierung, bei der Wissen vom Kurz- ins Langzeitgedächtnis überführt wird, wesentlich. Das implizite oder prozedurale Gedächtnis (Konditionierung, Priming, Erlernen von Fertigkeiten) wird dagegen von Teilen des Striatums, Cerebellum und Stammhirn verantwortet.^{24,52} Gedächtnisleistungen erfordern ein komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Hirnregionen und Funktionen. Die enge Verknüpfung des Gedächtnisses mit anderen kognitiven Funktionen wie z.B. Sprache, strategisches Denken, raumanalytische Leistungen und Aufmerksamkeitsprozesse erlauben ohnehin keine unabhängige Betrachtung der Gedächtnisentwicklung. Es lassen sich aber Entwicklungsphasen beschreiben, in denen die neuroanatomischen Voraussetzungen für bestimmte kognitive Operationen entstehen. Im Verlauf entwickeln sich die

sekundären Assoziationsfelder und die Hemisphärendominanz. Im Alter von etwa fünf bis acht Jahren gewinnen die Funktionen des Parietallappens an Bedeutung. Das Schlusslicht in der Reifung stellen die präfrontalen Strukturen da. Die durch Hippocampus und Frontalhirn gesteuerten metakognitiven und exekutiven Fähigkeiten entwickeln sich demnach vergleichsweise spät³⁷.

Aktuelle Studien erhärten die Annahme, dass über das Jugend- hinaus bis ins Erwachsenenalter eine weitere Entwicklung stattfindet.²¹ Brahmhatt und Kollegen fanden in ihren Arbeiten 2008 eine herabgesetzte Aktivität des linken superiores Parietallappens bei Jugendlichen im Vergleich zu Erwachsenen und für Erwachsene eine Bevorzugung verbaler Strategien sowohl beim Einprägen visueller als auch verbaler Informationen.⁷ Es entspricht auch klinischer Erfahrung, dass Kinder und Jugendliche eher auf bildhafte Merkhilfen zurückgreifen als Erwachsene.

Die kognitive Entwicklung von der Kindheit bis ins hohe Alter wird durch das Zusammenwirken domänenspezifischer Veränderungen, wie beispielsweise Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit, Strategiegebrauch, exekutive Funktionen sowie metakognitive Kontrolle, vorangetrieben und beeinflusst. Zusammengefasst kann man davon ausgehen, dass spezifisches Wissen sich kontinuierlich verbessert und sowohl die Gedächtnisleistung an sich als auch die anderen Motoren der Gedächtnisentwicklung unterstützt. Für unsere Studie bedeutet dies, dass schon aufgrund der Gedächtnisentwicklung altersspezifische Unterschiede erwartbar gewesen wären und auch dargestellt werden konnten. Da mit zunehmenden Alter von einer Verbesserung in Teilbereichen, wie oben beschrieben wurde, auszugehen ist, bietet sich hier ein weiteres Erklärungsmodell für die unterschiedlichen Leistungen in den Altersgruppen an. Nachfolgende Studien könnten weitere Unterschiede noch deutlicher machen.

Insgesamt gehen wir davon aus, dass für den impliziten Fertigkeitserwerb nicht nur motorische, sondern eben auch kognitive und soziale Kompetenzen eine Rolle spielen und für die Betrachtung und Einschätzung der Ergebnisse mit herangezogen werden müssen, da sie wichtige Aspekte bei Lernprozessen bieten. All diese Faktoren unterliegen einer ständigen Entwicklung von der Kindheit bis ins hohe Alter und könnten daher mitverantwortlich sein für die unterschiedlichen Resultate in den verschiedenen Gruppen in unserer Studie.

5. Zusammenfassung

Anliegen dieser Arbeit ist, frühe Lernprozesse der prozeduralen Gedächtnisbildung wie das Erlernen einer Sequenz während einer ausreichend langen Testsitzung, hier bezeichnet als repetition priming, und den verzögert eintretenden Leistungszuwachs über Nacht ohne weitere Übung, bezeichnet als off-line-learning, darzustellen.

Weiterhin wollten wir durch das Altern bedingte Unterschiede nachweisen und vergleichen.

Hierzu untersuchten wir insgesamt 60 hirngesunde Probanden. 36 davon waren weiblich, 24 männlich; sie befanden sich insgesamt in einem Alter von 6-75 Jahren.

Sämtliche Probanden führten eine modifizierte, computerunterstützte serielle Reaktionszeitaufgabe (SRTT) durch. Die Probanden wurden aufgrund ihres Alters in drei Gruppen, A-C, eingeteilt.

In Gruppe A wurden 20 Kinder untersucht im Alter von 6-12 Jahren (12 weiblich, 8 männlich; Altersdurchschnitt 9 Jahre). In Gruppe B wurden 20 jüngere Erwachsene im Alter von 26-39 Jahren untersucht (11 weiblich, 9 männlich; Altersdurchschnitt 31 Jahre). In Gruppe C wurden 20 ältere Erwachsene im Alter von 50-75 Jahren untersucht, (13 weiblich, 7 männlich; Altersdurchschnitt 61 Jahre).

Wir führten mit allen Probanden zwei identische Testsitzungen in einem Abstand von mindestens 24 Stunden durch.

In unserer Reaktionszeitaufgabe wurde in den dargebotenen Reizen (gelbes Kreuz in einem von vier unterschiedlich farbigen Quadraten) eine definierte Sequenz eingebettet, die mit Reizserien in zufälliger Positionsreihenfolge alternierte.

Diese festgelegte Sequenz war für die Probanden unbekannt.

Während solcher Reaktionszeitaufgaben sollen Probanden, so schnell und so korrekt wie möglich, auf einem Computerbildschirm erscheinende Reize reagieren, indem sie die zur Reizposition korrespondierende Taste drücken. Die hier verwendete SRTT erlaubte durch die alternierende Präsentation von Reizsequenzen aus zehn festgelegten Positionen und zufälligen Reizfolgen die kontinuierliche Differenzierung in rein zufällige und sequenzspezifische Anteile der zu erlernenden Fertigkeiten, sodass

es möglich war, nur das sequenzspezifische Lernen zu erfassen und zu vergleichen.

Wir konnten zunächst erstens übereinstimmend mit früheren Arbeiten nachweisen, dass sich die Reaktionszeiten am ersten Tag für die Sequenz statistisch signifikant insgesamt bei allen Probanden verbesserten. Das erwartete unbewusste Erlernen der Sequenz, hier als repetition priming bezeichnet, fand statt und konnte daher von uns bestätigt werden.

Zweitens stellten wir einen Gruppenvergleich für das Erlernen der Sequenz während des ersten Tages an. Hier konnten wir statistisch signifikante Unterschiede zwischen Gruppe A und Gruppe B sowie zwischen Gruppe B und Gruppe C finden. Gruppe A und Gruppe C, also Kinder und ältere Erwachsene, unterschieden sich nicht statistisch signifikant voneinander hinsichtlich des sequenzspezifischen Lernens in der ersten Testsitzung. Ihre Reaktionszeiten lagen in einer ähnlichen Größenordnung. Gründe hierfür könnten Unterschiede in der Arbeitshaltung, mangelnde Bewegungs- und Handlungsorganisation, leichte Ablenkbarkeit sowie Misserfolgsempfindlichkeit in der Kindergruppe sowie Scheu vor dem Computer und langsamere Reaktionszeiten insgesamt bei Gruppe C gewesen sein.

Die jüngere Erwachsenenengruppe, Gruppe B verbesserte ihre Lernleistung während des ersten Tages am deutlichsten, zeigte also das auf unseren Messskalen erfassbare deutlichste repetition priming. Vereinfacht zusammengefasst glauben wir, dass junge Erwachsene am besten während einer einzelnen Lernsitzung ihr Leistungsverhalten steuern und kontrollieren können und die optimalsten biopsychosozialen Voraussetzungen hierfür haben.

Nach der ersten Exposition in einer Testsitzung erfolgte ein erneutes Absolvieren der exakt gleichen SRTT nach einem übungsfreien Intervall über Nacht. Das übungsfreie Intervall war mindestens 24 und maximal 28 Stunden lang. Wie bereits bei anderen Autoren postuliert, konnten wir den verzögerten Leistungszuwachs ohne weitere Übung über Nacht, hier als off-line-learning bezeichnet, insgesamt bestätigen. Dies zeigte sich in einer Verbesserung der Reaktionszeiten über Nacht für alle Probanden. Diese verzögerten Leistungsverbesserungen werden mit Konsolidierungsphänomenen in Zusammenhang gebracht und zeigen sich dadurch, dass nach einer Trainingspause am nächsten Tag absolvierte Aufgaben auf einem höheren Niveau beginnen, als die ihnen vorausgegangenen endeten. Der Unterschied war für alle 60 Probanden statistisch

signifikant nachweisbar.

Als viertes Teilergebnis erbrachte der Gruppenvergleich bezüglich des off-line-learnings, also der Verbesserung der Reaktionszeiten ohne weiteres Üben über Nacht, einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen A und C. Gruppe A und B sowie B und C unterschieden sich hinsichtlich dieses Merkmals nicht statistisch signifikant voneinander.

Die Kindergruppe A konsolidierte, verbesserte ihre Lernleistung über Nacht insgesamt am deutlichsten, und zeigte somit den höchsten Leistungszuwachs über Nacht. Vereinfacht: ohne willentliche Kontrolle haben Kinder die günstigsten Voraussetzungen, ihre Lernleistungen zu verbessern im Gegensatz zu den beiden anderen gewählten Gruppen.

Insgesamt bestätigten sich die erwarteten Verbesserungen der Reaktionszeiten und darüber hinaus konnten wir einen statistisch signifikanten Zusammenhang zum Alter aufzeigen.

Unterschiede in der neuroanatomischen Gedächtnisentwicklung und neuropsychologische Akzentuierungen könnten altersspezifische Unterschiede erklären. Zusammenfassend gehen wir davon aus, dass für den impliziten Fertigkeitserwerb nicht nur motorische, sondern auch kognitive und soziale Kompetenzen eine Rolle spielen und daher wichtige Aspekte bei Lernprozessen sind. Nachfolgende Studien müssen sich mit diesen Unterschieden genauer befassen, um diese Einflüsse auf den Lernerwerb sichtbar zu machen und gegebenenfalls diagnostische oder therapeutische Konsequenzen daraus abzuleiten.

Literaturverzeichnis

- ¹ Adam K, Oswald I: Sleep is for tissue restoration. *J.R.Coll.Physicians Lond* 1977, 11 (4): S.376-388.
- ² Atsushi Y, Takashi Y, Mori E et al.: Neurological basis of skill learning. *Cognitive Brain Research* 1996, 5: S.49-54.
- ³ Backhaus, Erichson, Plinke et al.: *Multivariate Analysemethoden*. Springerverlag, 11, ISBN 3-540-27870-2: S.120
- ⁴ Barnes KA, Howard JH, Howard DV et al.: Two forms of implicit learning in childhood ADHD. *Dev Neuropsychol* 2010, 35(5): S.494-505.
- ⁵ Brahmhatt SB, McAuley T, Barch DM: Functional developmental similarities and differences in the neural correlates of verbal and nonverbal memory tasks. *Neuropsychologia* 2008, 46(4): S.1020-31
- ⁶ Brainard D, Pelli D: *Psychtoolbox 2.44*, 2000
- ⁷ Brahmhatt SB, McAuley T, Barch DM: Neuropsychologische Befunde zu Kindern mit Lern- und Merkstörungen. *Zeitschrift für Kinder-und Jugendpsychiatrie* 2008, 36: S.389-400.
- ⁸ Brashers-Krug T, Shadmehr R, Bizzi E: Consolidation in human motor memory. *Nature* 1996, 382(6588): S.252-254.
- ⁹ Braus DF: Neurobiology of learning- the basis of an alteration process. *Psychiat Prax* 2004, 31(2): S. 215-13:
- ¹⁰ Brown AS, Jones TC, Mitchell T: Single and multiple test repetition priming in implicit memory. *Memory* 1996, 4(2): S.159-173.
- ¹¹ Brown R, Robertson EM, Press DZ: Sequence Skill Acquisition and Off-line Learning in normal Aging. *PLoS One* 2009, 19;4(8): e6683.
- ¹² Calabrese P, Markowitsch HJ: Memory and brain-neurobiological correlates of memory disturbances. *Fortschr Neurol Psychiat* 2003, 71(4): S. 211-219.
- ¹³ Churchill JD, Stanis JJ, Press C et al.: Is procedural memory relatively spared from age effects? *Neurobiol Aging* 2003, 24(6): S.883-892.

- ¹⁴ Cohen DA, Pascual-Leone A, Press DZ et al.: Off-line learning of motor skill memory: a double dissociation of goal and movement. *Proc Natl Acad Sci* 2005, Dec 13, *102(50)*: S.18237-18241.
- ¹⁵ Cohen NJ, Poldrack RA, Eichenbaum H: Memory for items and memory for relations in the procedural/declarative memory framework. *Memory* 1997, *5(1-2)*: S.131-178.
- ¹⁶ Curran T: Effects of aging on implicit sequence learning: accounting for sequence structure and explicit knowledge. *Psychol Res* 1997, *60(1-2)*: S.24-41.
- ¹⁷ Daselaar SM, Rombouts SA, Veltman DJ et al.: Similar network activated by young and old adults during the acquisition of a motor sequence. *Neurobiol Aging* 2003, *24(7)*: S.1013-1019.
- ¹⁸ Dennis NA, Cabeza R: Age-related dedifferentiation of learning systems: an fMRI study of implicit and explicit learning. *Neurobiol Aging* 2010 May 12 (epub ahead of print).
- ¹⁹ Dorfberger S, Adi-Japha E, Karni A: Reduced susceptibility to interference in the consolidation of motor memory before adolescence. *PLoS* 2006, *2(2)*: S e240.
- ²⁰ Doyon J, Benali H: Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr Opin Neurobiol* 2005, *15(2)*: S.161-167.
- ²¹ Ferman S, Karni A: No childhood advantage in the acquisition of skill in using an artificial language rule. *PLoS* 2010, *5(10)*: S.e13648.
- ²² Grant SC, Logan GD: The loss of repetition priming and automaticity over time as a function of degree of initial learning. *Mem Cognit* 1993, *21(5)*: S.611-618.
- ²³ Gutman GM: The effects of age and extraversion on pursuit rotor reminiscence. *Gerontology* 1965, *20*: S.346-350.
- ²⁴ Halsband U, Freund HJ: Motor learning. *Curr Opin Neurobiol* 1993. *3(6)*: S.940-949.
- ²⁵ Hauptmann B, Karni A: From primed to learn: the saturation of repetition priming and the induction of long-term memory. *Brain Res Cogn Brain Res* 2002, *13(3)*: S.313-322.

- ²⁶ Hauptmann B, Reinhart E, Brandt SA et al.: The predictive value of the levelling off of within-session performance for procedural memory consolidation. *Brain Res Cogn Brain Res* 2005, *24*(2): S.181-189.
- ²⁷ Hermer L, Spelke E: Modularity and development: the case of spatial reorientation. *Cognition*, 1996, *61*(3): S. 195-232.
- ²⁸ Kandel E, Schwartz J, Jessel T: *Neurowissenschaften: eine Einführung*, 1996, Spektrum, Heidelberg Berlin, 19963-86025-391-3
- ²⁹ Karni A: The acquisition of perceptual and motor skills: a memory system in the adult human cortex. *Brain Res Cogn Brain Res* 1996, *5*(1-2): S. 39-48.
- ³⁰ Karni A, Meyer G, Rey-Hipolito C et al. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc.Natl.Acad.Sci.USA* 1998, *95*(3): S. 861-868
- ³¹ Karni A, Meyer G, Rey-Hipolito G et al. The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience driven changes in primary motor cortex: *Proc.Natl.Acad.Sci.USA* 1998, *95*(3): S. 861-868
- ³² Karni A, Sagi D. The time course of learning a visual skill. *Nature* 1993, *365*: S. 250-252
- ³³ Karni A, Bertini G. Learning perceptual skills: behavioural probes into adult cortical plasticity. *Curr Opin.Neurobiol* 1997, *7*(4): S. 530-535.
- ³⁴ Kirsner K, Speelman P. Skill acquisition and repetition priming: one principle, many processes? *J Exp Psych Learn Mem Cogn* 1996, *22*1: S. 563-575.
- ³⁵ Kolb B, Whishaw IQ: *Neuropsychologie 2*, Spektrum 1996, Heidelberg, Berlin, 3-8274-0052-X
- ³⁶ Lechner H, Squire LR, Byrne JH. 100 Years of consolidation-Remembering Müller and Pilzecker. *Learn Mem* 1999, *6*, S: 77-87.
- ³⁷ Lepach, Ginger, Petermann. Neuropsychologische Befunde bei Merk- und Lernstörungen bei Kindern anhand des Basic-MLT. *Z Kinder-Jugendpsychiatr Psychother* 2008, *36*.
- ³⁸ Meulemans T, van der Linden M, Perruchet P. Implicit sequence learning in children. *J Exp Child Psych* 1998, *68*(3), S: 199-221.

- ³⁹Muellbacher W, Ziemann U, Wissel J et al. Early consolidation in human primary cortex. *Nature* 2002, 415, S: 640-644
- ⁴⁰Munakata Y. Computational cognitive neuroscience of early memory development. *Develop Rev* 2004.
- ⁴¹Munakata Y, Pfaffly J. Hebbian learning and development. *Dev Sci* 2004, 7(2): S. 141-148.
- ⁴²Nemeth D, Janascek K. The dynamics of implicit skill consolidation in young and elderly adults. *J Geront B Psychol Sci Soc Sci* 2011, 66(1): S: 15-22. Epub 2010 Oct 7.
- ⁴³Nemeth D, Janascek K, Balogh V et al.. Learning in autism: implicitly superb. *PLoS One* 2010, 22(5), e11731
- ⁴⁴Nissen MJ, Bullemer P. Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cogn Psychol* 1987, 19, S: 1-32.
- ⁴⁵Nissen MJ, Knopman DS, Schacter DL. Neurochemical dissociation of memory systems. *Neurol* 1987, 37(5), S: 789-794.
- ⁴⁶Petermann F, Niebank K, Scheithauer H. *Entwicklungswissenschaft*, Springer, Berlin Heidelberg 2004, 3-540-44299-5
- ⁴⁷Petersen M, Raichle M, Fiez J et al.. Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cereb Cortex* 1994, 4, S:8-26.
- ⁴⁸Poldrack R, Selco S, Field J et al.. The relationship between skill learning and repetition priming: experimental and computational analyses. *J.Exp.Psych* 1999, 25, S: 208-235.
- ⁴⁹Richmond, Nelson. Accounting of change in declarative memory: a cognitive perspective. *Develop Rev* 2007, 27,S: 349-373.
- ⁵⁰Robertson EM. Skill Learning. *Current Biol* 2004, 14, S: 61-63.
- ⁵¹Robertson EM, Pascual-Leone A, Miall RC. Current concepts in procedural consolidation. *Nat Rev Neurosci* 2004, 5(7), S: 576-582.
- ⁵²Robertson EM, Tormos JM, Maeda F et al.. The role of dorsolateral prefrontal cortexcerebral cortex during sequence learning is specific for spatial information. *Cereb Cortex* 2001, 11(7), S: 628-635.

- ⁵³Robertson EM, Pascual-Leone A. Prefrontal cortex:procedural sequence learning and awareness. *Current Biol* 2003, 13, S: 65-76.
- ⁵⁴Robertson EM, Press DZ, Pascual-Leone A. Off-line learning and the primary motor cortex. *J Neurosci* 2005, 27, S: 6372-6378.
- ⁵⁵Rodrigue K, Kennedy KM, Raz N. Aging and longitudinal change in perceptual-motor skill acquisition in healthy adults. *J Geront* 2005, 4, S: 74-181.
- ⁵⁶Schacter DL. Implicit memory:a selective review. *Neurosci* 1993, 16.
- ⁵⁷Schacter DL, Buckner R. Priming and the Brain. *Neuron* 1998, 20, S: 185-195.
- ⁵⁸Scoville WB, Milner B. The loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *J Neurol Neurosurg Psych* 1957, 20, S: 11-21.
- ⁵⁹Shadmehr R, Brashers-Krug T. Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *J Neurosci* 1997, 17, S: 409-419.
- ⁶⁰Shadmehr R, Holcomb H. Neural correlates of motor memory consolidation. *Science* 1997, 277, S: 821-825.
- ⁶¹Simon J, Howard JH, Howard DV. Age differences in implicit learning of probalistic unstructured sequences. *J Gerontol* 2010, 10, S:1093.
- ⁶²Song S, Howard JH, Howard DV. Perceptual sequence learning in a serial reaction time task. *Exp Brain Res* 2008, 189(2), S: 145-158.
- ⁶³Sosnik R, Hauptmann B, Karni A et al. When practice leads to coarticulation:the evolution of geometrically defined movement primitives. *Exp Brain Res* 2004, 156, S: 422-438.
- ⁶⁴Squire LR. Declarative and nondeclarative memory: multiple brain systems supporting learning and memory? MA MIT 1994, S: 203-231.
- ⁶⁵Squire LR. Memory systems of the brain:a brief history and current perspective. *Neurobiol Learn.Mem* 2004, 82(3), S: 171-177.
- ⁶⁶Squire LR, Kandel ER. *Gedächtnis:Die Natur des Erinnerns*, Spektrum 1999, Berlin Heidelberg.
- ⁶⁷Stadler MA. Impilcit serial learning:questions inspired by Hebb(1961). *Mem Cognit* 1993, 6, S: 819-827.

- ⁶⁸Stefanova ED, Kostic VS, Ziropadja L et al. Visuomotor skill learning on serial reaction time task in patients with early Parkinsons disease. *Mov Disorder* 2000, 15, S: 1095-1103.
- ⁶⁹Timischl W. *Biostatistik-Eine Einführung für Biologen und Mediziner*. Springer Wien, 2000, 978-3-211-83317-92.
- ⁷⁰Tulving E, Schacter D. Priming and human memory systems. *Science* 1990, 247, S: 301-306.
- ⁷¹Tumin FJ. Reminiscence as a function of chronological and mental age. *Geront* 1962, 17, S. 393-396.
- ⁷²Walker MP, Brakefield T, Hobson JA et al. Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature* 2003, 425, S: 616-620.
- ⁷³Wilson P, Maruff P, Lum J. Procedural learning in children with development coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2003, 22, S: 515-526.
- ⁷⁴Wright BM, Payne BR. Effects of aging on sex differences in psychomotor reminiscence and tracking proficiency. *Geront* 1985, 40, S. 179-184.
- ⁷⁵Dorfberger S, Adi-Japha E, Karni A: Sequence specific motor performance gains after memory consolidation in children and adolescence., [PLoS One](#). 2012; 7(1):e28673. doi: 10.1371/journal.pone.0028673. Epub 2012 Jan 19, Source: The Edmond J. Safra Brain Research Center for the Study of Learning Disabilities and Learning Disabilities Department, University of Haifa, Haifa, Israel, shoshke16@gmail.com

Danksagung

Ich danke meiner Großmutter Ursula Maria Steiner, die mich immer positiv beeinflusst hat und vorbehaltlos stolz auf mich war. Dir widme ich diese Arbeit.

Ich bedauere, dass du die Vollendung nicht miterlebst.

Ich danke meinen vier Eltern, die mir meine Schulausbildung und mein Studium ermöglicht haben.

Für die Überlassung des Themas, die Betreuung und Geduld möchte ich Herrn Prof. Dr. med. G. Arnold danken. Ich danke Herrn Dr. B. Hauptmann für seine Unterstützung und Beratung.

Ich danke dem Kollegium und den Schülern der „Grundschule im Grünen“ in Berlin sowie allen Probanden für die Mitarbeit.

Ich danke Schach -Peter- Müller für die Hilfe bei technischen Problemen. Ich danke Frau Dr. Kuchler und Herrn Wierer für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

Danke meine liebe Judith, dass du immer für mich da warst.

Martin, ich danke dir für deine statistischen Bereicherungen, deine Zuversicht und deine emotionale Unterstützung.

Meine liebe Familie, insbesondere Tare und Tané; ich hoffe, ihr seid stolz auf mich.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Sölva Kahl-Richter, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

"Repetition priming und off-line-learning als Parameter der frühen prozeduralen Gedächtnisbildung und altersabhängige Unterschiede"

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version nicht veröffentlicht.