

Aus der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie
der Medizinischen Fakultät Charité-Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Effekte eines Arbeitsgedächtnistrainings auf fluide Intelligenz
und weitere kognitive Funktionen im jungen und höheren
Erwachsenenalter

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité-Universitätsmedizin Berlin

von
Stefanie Westphal (geb. Schulte)
aus Münster

Datum der Promotion: 21.06.2020

VORWORT

Die für die Auswertung dieser Arbeit genutzten Probandendaten überschneiden sich mit bereits veröffentlichten Daten der nachstehenden Publikation: Heinzel S, Schulte S, Onken J, Duong Q-L, Riemer TG, Heinz A, Kathmann N, Rapp MA. Working memory training improvements and gains in non-trained cognitive tasks in young and older adults. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition* 2014; 21: 146 - 173. Aus einer Kohorte von initial 19 älteren Trainingsprobanden entstanden aufgrund unterschiedlicher Ein- und Ausschlusskriterien bezüglich der Altersspanne und der Testergebnisse in CERAD und MMST zwei unterschiedliche Stichproben. Der CERAD wurde in dieser Arbeit nicht verwendet. Die Ergebnisse unterscheiden sich demnach zwischen der vorliegenden und der bereits veröffentlichten Arbeit. Aufgrund der starken Überlappung der Stichproben der vorliegenden und der bereits veröffentlichten Arbeit darf die vorliegende Arbeit nicht als zusätzliche Quelle zitiert oder für Metaanalysen verwendet werden.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	II
TABELLENVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
ABKÜRZUNGEN	VIII
KURZFASSUNG	IX
ABSTRACT	XI
1 EINLEITUNG	1
1.1 Intelligenz	1
1.1.1 Kristalline (Gc) und Fluide Intelligenz (Gf)	1
1.1.2 Alltagsrelevanz.....	2
1.1.3 Plastizität	3
1.1.4 Neuroanatomie	3
1.2 Arbeitsgedächtnis (AG)	3
1.2.1 Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell	4
1.3 Gemeinsame Basis von fluider Intelligenz und Arbeitsgedächtnis	5
1.3.1 Verarbeitungsgeschwindigkeit (VG).....	5
1.3.2 Kapazitätsbeschränkung.....	5
1.3.3 Zentrale Exekutive	6
1.3.4 Neuronale Strukturen	6
1.3.5 Theorie über spezifische Korrelationen	6
1.4 Kognition im Alter	7
1.4.1 Entwicklung der fluiden und kristallinen Intelligenz im Alter	7
1.4.2 Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses im Alter	7
1.4.3 Hypothesen zu den Ursachen des kognitiven Alterns	8
1.5 Plastizität im Alter	9
1.6 Training	10
1.6.1 Arbeitsgedächtnistraining.....	10
1.6.2 Transfer	11
1.7 Aktuelle Studienlage	12

1.8	Offene Fragen	14
1.9	Hypothesen	16
1.9.1	Hypothese zum Trainingseffekt	16
1.9.2	Hypothesen zu Effekten auf die untrainierten Aufgaben	16
1.9.3	Hypothese zu den Einflüssen auf die fluide Intelligenz	18
1.9.4	Hypothese zu den Prädiktoren für das n-back-Level und die fluide Intelligenz... ..	18
2	MATERIAL UND METHODEN	19
2.1	Studiendesign	19
2.1.1	Ethikkommission.....	19
2.1.2	Rekrutierung.....	19
2.1.3	Ein- und Ausschlusskriterien	19
2.1.4	Aufklärung und Einverständniserklärung	19
2.1.5	Studienaufbau.....	20
2.1.6	Aufwandsentschädigung	21
2.2	Probandenkollektiv	21
2.3	Training	21
2.3.1	Das n-back-Paradigma	21
2.4	Neuropsychologische Testbatterie	24
2.4.1	Demenzscreening	25
2.4.2	Fluide Intelligenz.....	25
2.4.3	Kristalline Intelligenz	26
2.4.4	Verarbeitungsgeschwindigkeit	26
2.4.5	Kurzzeitgedächtnis und Arbeitsgedächtnis	27
2.4.6	Exekutivfunktionen	27
2.5	Statistische Auswertung	28
2.5.1	Allgemein	28
2.5.2	Parametrische Testverfahren (Varianzanalysen, t-Tests).....	28
2.5.3	Korrelationen.....	29
2.5.4	Regressionen	29
3	ERGEBNISSE	30
3.1	Probandenkollektiv	30
3.2	Arbeitsgedächtnistraining	30

3.2.1	Level.....	30
3.2.2	Durchläufe je Level.....	33
3.3	Neuropsychologische Tests.....	35
3.3.1	Ergebnisse zu t1	35
3.3.2	Ergebnisse zu t2 und t3	36
3.3.3	Auswertung der einzelnen Tests	38
3.4	Einflüsse auf die fluide Intelligenz.....	43
3.4.1	Fluide Intelligenz und das maximal erreichte n-back-Level.....	43
3.4.2	Fluide Intelligenz und die Verarbeitungsgeschwindigkeit.....	44
3.4.3	Fluide Intelligenz und das Arbeitsgedächtnis/Kurzzeitgedächtnis bzw. die Exekutive.....	45
3.5	Prädiktoren für das n-back-Level und die fluide Intelligenz.....	45
3.5.1	N-back-Level.....	45
3.5.2	Fluide Intelligenz.....	45
4	DISKUSSION	47
4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	47
4.2	Diskussion der statistischen Auswertung.....	47
4.3	Interpretation der Ergebnisse.....	48
4.3.1	Arbeitsgedächtnistraining.....	48
4.3.2	Untrainierte Aufgaben.....	52
4.3.3	Einflüsse auf die fluide Intelligenz.....	65
4.3.4	Prädiktoren	66
4.4	Beantwortung der offenen Fragen.....	67
4.5	Ausblick.....	68
LITERATURVERZEICHNIS		70
SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG		78
LEBENS LAUF		79
PUBLIKATIONSVERZEICHNIS		80
DANKSAGUNG		81

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Studien mit einem Arbeitsgedächtnistraining und ihre Effekte auf fluide Intelligenz.....	12/13
Tab. 2: Levelaufbau des n-back-Paradigmas.....	23
Tab. 3: Übersicht über die neuropsychologische Testbatterie.....	24
Tab. 4: Probandenmerkmale.....	30
Tab. 5: Deskriptive Daten des n-back-Trainings.....	31
Tab. 6: Deskriptive Daten der Neuropsychologie vor dem Training und Gruppenunterschiede..	35
Tab. 7: Deskriptive Daten der Neuropsychologie während und nach dem Training sowie Gruppenunterschiede	37

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Intelligenzmodell von Cattell und Horn.....	2
Abb. 2: Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell	4
Abb. 3: Studienaufbau.....	20
Abb. 4: Beispiel für das n-back-Paradigma mit der Bedingung 3-back.....	22
Abb. 5: Gliederung einer Trainingssitzung	23
Abb. 6: Trainierte n-back-Level pro Sitzung im Verlauf des Trainings	32
Abb. 7: Im Mittel benötigte Durchläufe pro n-back-Level	34
Abb. 8: Entwicklung der fluiden Intelligenz von t1 zu t3	38
Abb. 9: Entwicklung der Verarbeitungsgeschwindigkeit von t1 zu t3	41
Abb. 10: Entwicklung des Arbeits-/Kurzzeitgedächtnisses von t1 zu t3	42
Abb. 11: Zusammenhang von LPS3-Ausgangsperformanz und max. n-back-Level.....	46

ABKÜRZUNGEN

AG	Arbeitsgedächtnis
Gc	Kristalline Intelligenz
Gf	Fluide Intelligenz
ISI	Interstimulusintervall
LPS3	Leistungsprüfsystem 3
MMST	Mini Mental Status Test
MWTB	Mehrfachwahl-Wortschatz-Intelligenztest-B
n-back	Arbeitsgedächtnistrainingsparadigma
(dl) PFC	(dorsolateraler) Präfrontaler Kortex
PZ	Präsentationszeit des Stimulus
RAPM	Raven's Advanced Progressive Matrices
RSPM	Raven's Standard Progressive Matrices
t1	Zeitpunkt: vor dem Training
t2	Zeitpunkt: während des Trainings (nach 4 Sitzungen, d.h. ca. 1 Woche)
t3	Zeitpunkt: nach dem Training
VG	Verarbeitungsgeschwindigkeit
WFT-B	Wortflüssigkeitstest Kategorie Buchstaben
WFT-T	Wortflüssigkeitstest Kategorie Tiere
ZSV	Zahlenspanne vorwärts
ZSR	Zahlenspanne rückwärts
ZST	Zahlen-Symbol-Test
ZVT-A	Zahlenverbindungstest Teil A
ZVT-B	Zahlenverbindungstest Teil B

KURZFASSUNG

Einleitung: Fluide Intelligenz (Gf) ist die Fähigkeit, Lösungen für neue Probleme zu finden, ohne dass diese zuvor erlernt wurden. Fluide Intelligenz ermöglicht das Zurechtkommen im Alltag und das Erlernen neuer Sachverhalte. Trotz starker hereditärer Komponente ist es in der Vergangenheit bei jungen und alten Probanden gelungen, fluide Intelligenz durch ein Arbeitsgedächtnistraining zu modifizieren, denn Gedächtnis- und Intelligenzleistungen basieren auf gemeinsamen Prozessen und Strukturen. In dieser Studie wird erstmals ein n-back-Arbeitsgedächtnistraining an älteren Probanden untersucht.

Methodik: 15 junge (im Mittel 26 Jahre) und 16 ältere (im Mittel 65 Jahre) Probanden absolvierten ein vierwöchiges einfaches progressives n-back-Training. Trainiert wurde an der individuellen Grenze der Arbeitsgedächtniskapazität (n-back) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (Interstimulusintervall). Die Auswirkungen des Trainings auf fluide Intelligenz, Verarbeitungsgeschwindigkeit (VG), Arbeitsgedächtnis- (AG) und Exekutivfunktionen wurden mittels neuropsychologischer Testbatterien zu drei Zeitpunkten (t1-t3) erfasst.

Ergebnisse: Beide Altersgruppen konnten ihre Arbeitsgedächtniskapazität signifikant steigern. Die jungen Probanden erreichten maximal den Schwierigkeitsgrad 5-back, die älteren Probanden 4-back. Im Gruppenvergleich war die Leistung der jungen Probanden in allen Tests zur fluiden Intelligenz und Verarbeitungsgeschwindigkeit signifikant besser. Zugewinne fanden sich im Bereich fluide Intelligenz im Test LPS3 (jung ab t2). In Raven's Standard Progressive Matrices fanden sich nach Bonferroni-Korrektur keine Zugewinne. Weitere Zugewinne zeigten sich im Bereich Verarbeitungsgeschwindigkeit im Zahlen-Symbol-Test (jung ab t2, alt ab t3) und Zahlenverbindungstest (jung), im Bereich Arbeitsgedächtnis in der Zahlenspanne rückwärts (jung ab t3) und im Exekutivtest Wortflüssigkeit - Kategorie Buchstaben (jung). Ein hohes n-back-Level korrelierte mit einem hohen Maß an fluider Intelligenz zu t3 (jung: RSPM, alt: LPS3). Die größten Gf-Zugewinne zeigten sich bei schwacher Ausgangsperformanz (alt: RSPM und LPS3; jung: RSPM).

Schlussfolgerung: Obwohl der Zusammenhang von fluider Intelligenz und dem Arbeitsgedächtnis durch signifikante Korrelationen bestätigt und gute Trainingseffekte in beiden Altersgruppen erzielt werden konnten, wurden Zugewinne in fluider Intelligenz, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtnis und Exekutivfunktionen vor allem bei den jungen Probanden beobachtet. Von einem Training scheinen besonders Probanden mit einem anfänglich geringen Maß an fluider Intelligenz zu profitieren. Die Ergebnisse müssen jedoch

vorsichtig interpretiert werden, denn es fehlten eine aktive Kontrollgruppe und Parallelversionen einiger Tests. Es bleibt offen, ob die kleine Stichprobe und die konservative Bonferroni-Korrektur ursächlich für die fehlenden Zugewinne in der älteren Probandengruppe gewesen sein könnten. Zukünftige Studien sollten eine größere, bezüglich der Bildung heterogenere Kohorte, eine aktive Kontrollgruppe, Parallelversionen aller Gf-Tests und eine kleinere Testbatterie umfassen, um gezielt nach Effekten auf die fluide Intelligenz zu schauen.

Wichtiger Hinweis: Siehe Vorwort

ABSTRACT

Introduction: Fluid intelligence (Gf) allows solving new problems without learning specific strategies in advance. It is essential for everyday life and learning. Although there is a strong hereditary component within Gf, former studies show that Gf is malleable by training working memory (WM) in young and old adults. Gf and WM may partly share cognitive processes and neural structures. WM-training via n-back with young and old participants is new in this study.

Methods: 15 young (mean age 26 years) and 16 old (mean age 65 years) adults took place in a four-week single progressive n-back training. Difficulty was adjusted according to individual working memory capacity (n-back) and processing speed (ISI). The impact of training on Gf, WM, processing speed, and executive functions was evaluated via neuropsychological tests at three different times (t1 - t3).

Results: Both age groups were able to increase their WM-capacity. The best young participant reached 5-back. The best old participant reached 4-back. Young participants were significantly better in all Gf- and speed-tests. Significant Gf-gains could only be found in the young group in LPS3 (t2, t3); no gains in Raven's Standard Progressive Matrices. Furthermore, gains occurred in processing speed (digit symbol: young t2; old t3 and trailmaking A: young), working memory (digit span backward: young t3) and executive functions (verbal fluency letters: young). High n-back-levels correlated with good Gf-performances (young: RSPM t3, old: LPS3 t3). Low baseline Gf-performance resulted in bigger Gf-gains (old: RSPM and LPS3; young: RSPM).

Discussion: N-back effectively trained working memory in both groups. Significant correlations between WM and Gf were found. Nevertheless, mainly young participants achieved gains in Gf, speed, WM, and executive functions. Participants with low baseline Gf-performance especially seemed to benefit from training. Interpretation of the results was difficult due to a missing active control group and no parallel version of some tests. It is possible that the small sample size and the conservative Bonferroni correction have erased significant effects in the old training group. Future studies should use a larger, more heterogeneous (or less academic) cohort and focus on Gf.

Important notice: This study partly used the same participants as in "Heinzel, S., Schulte, S., Onken, J., Duong, Q.-L., Riemer, T. G., Heinz, A., Kathmann, N., & Rapp, M. A. (2014). Working memory training improvements and gains in non-trained cognitive tasks in young and older adults. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B, Aging*,

Neuropsychology, and Cognition, 21(2), 146–173". This study must not be quoted or used as additional source in meta-analyses.

1 EINLEITUNG

1.1 Intelligenz

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts wuchs das wissenschaftliche Interesse, Intelligenz zu erforschen und einheitlich zu definieren. Es entstanden zahlreiche Intelligenzmodelle. In einer Expertenbefragung von 1986 konnte lediglich ein breiter Konsens dafür gefunden werden, „unter Intelligenz alle höheren mentalen Prozesse, wie abstraktes Denken, Repräsentation, Problemlösen und Entscheidungsfindung zu subsumieren“. „Das was in einer Kultur als wesentlich eingeschätzt wird“, „elementare Verarbeitungsprozesse“, „Wissen“ und „erfolgreiches Verhalten“ wurden ebenfalls als Merkmal der Intelligenz genannt [1]. Exemplarisch soll hier auf einzelne Modelle eingegangen werden.

1905 postulierte Binet, dass es eine allgemeine bzw. generelle („g“) Intelligenz gäbe [2]. Nahezu zeitgleich entwickelte Spearman die Zweifaktorentheorie, in der neben der allgemeinen Intelligenz auch eine spezifische Intelligenz existierte [3].

Thurstone entwickelte das Primärfaktorenmodell. Intelligenz sei das Zusammenspiel von unabhängigen Fähigkeiten (Gedächtnis, deduktives Denken, induktives Denken, Wortflüssigkeit, verbales Verständnis, numerische und räumliche Fähigkeiten und Wahrnehmungsgeschwindigkeit) [4].

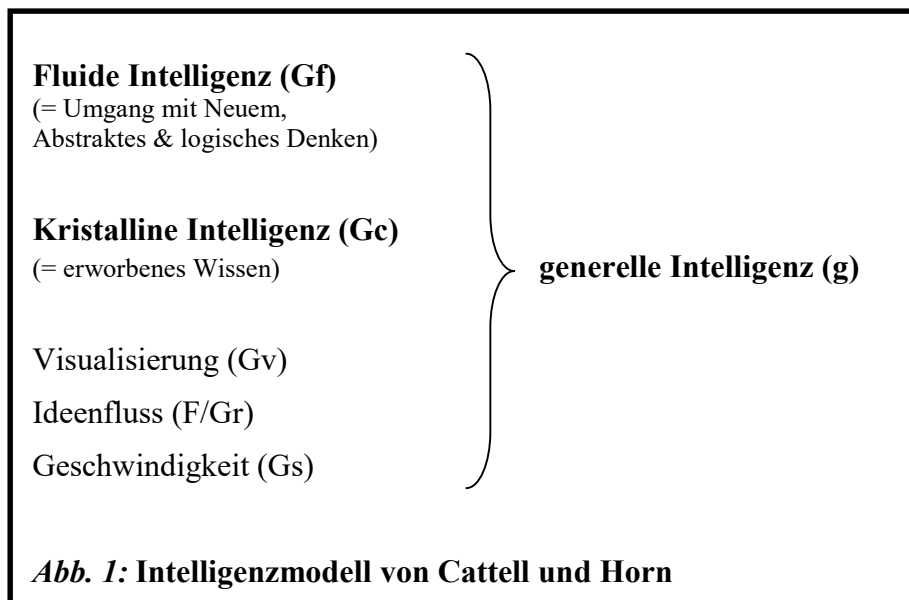
Cattell und Horn entwickelten 1943 durch Faktoranalyse das Modell der kristallinen (Gc) und fluiden (Gf) Intelligenz, die beide als Aspekte einer generellen Intelligenz angesehen wurden [5, 6] (siehe Kapitel 1.1.2).

Carroll entwickelte das Three-Stratum-Model, welches mehrere Modelle zu einem neuen Konzept mit hierarchischer Ordnung integrierte. Übergeordnet existierte eine generelle Intelligenz. Ihr folgten komplexe Fähigkeiten wie Gf, Gc, Gedächtnis, Lernen, Wahrnehmung und mentale Geschwindigkeit. Abermals untergeordnet waren weitere spezifische Fähigkeiten [7].

1.1.1 Kristalline (Gc) und Fluide Intelligenz (Gf)

Gc umfasst das erworbene Faktenwissen bzw. erlernte Strategien, welche zum Lösen bereits bekannter Probleme angewandt werden können. Sie wird durch experimentelle, erzieherische

und kulturelle Einflüsse geprägt und reflektiert somit Bildung und Erfahrung eines Individuums [6]. Gc nimmt im Laufe der Lebensspanne zu [8] und erst im hohen Alter langsam wieder ab [9]. Gf ist die komplexe Fähigkeit Lösungen für neue Probleme und unbekannte Situationen zu finden, ohne dabei auf erlerntes Faktenwissen zurückzugreifen. Sie umfasst logisches Denken, Schlussfolgern, induktives und deduktives Denken [5, 6, 9]. Gf ist unerlässlich für das Zurechtkommen im Alltag und ein zentrales Element beim Erlernen neuer Sachverhalte [9-12]. Die Investitionstheorie behauptet, erst die fluide Intelligenz ermöglicht den Erwerb von kristallinem Wissen [10, 11]. Gf hat eine starke biologische und damit hereditäre Komponente [8, 13]. Bereits um das 22. Lebensjahr erreichen die Gf-Leistungen ihren Zenit [9].



1.1.2 Alltagsrelevanz

„Intelligenz verstehen bedeutet sie verbessern können“ [14] und als Mittel zum Zweck einzusetzen [12]. Dieser „Zweck“ ist allgemein formuliert Erfolg. Intelligenz ermöglicht hochrangige Denkprozesse und Entscheidungsfindungen, die den Alltag und das Sozialleben, aber auch den schulischen und beruflichen [12, 15] Erfolg beeinflussen. Ein hoher Intelligenzquotient ist häufig mit einem höheren sozioökonomischen Status und besserem Einkommen verknüpft [15] und schützt vor Arbeitslosigkeit, Armut, Sozialhilfeleistungen und (Jugend-) Kriminalität [16].

1.1.3 Plastizität

Obwohl die Genetik eine wichtige Grundlage für fluide Intelligenz darstellt, wie in Zwillingsstudien gezeigt werden konnte [17], wird sie von Umwelteinflüssen, sozialem Umfeld und körperlicher Gesundheit mit geprägt. Gene - bislang unklar welche genau- bestimmen die anatomischen Strukturen, welche den Grundstein für kognitive Fähigkeiten bzw. neuronale Effizienz legen [14]. So ist eine höhere Nervenleitgeschwindigkeit mit höheren Intelligenzscores assoziiert [15]. Zu den wichtigsten Umwelteinflüssen gehört unser Umfeld. Eine Theorie besagt, dass unser Phänotyp (Umfeld) im Laufe des Alterns immer mehr unserem Genotyp (IQ) entspricht [18]. Intellektuell Befähigte suchen sich Umgebungen, die zu ihren Ansprüchen passen und in der sie ihre Intelligenz weiterentwickeln können [19]. Ein bestimmtes soziales Umfeld, wie eine überdurchschnittlich gute Bildung, Berufe mit wenig Routine und hoher Komplexität, überdurchschnittliches Einkommen, Zufriedenheit, Ehepartner mit hohem kognitiven Status und intakte Familienverhältnisse wirken präventiv gegen kognitive Verschlechterung im hohen Alter [20]. Genauso scheint die Abwesenheit körperlicher Erkrankungen, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, neurologische Erkrankungen und ihre Risikofaktoren, einen positiven Effekt auf fluide Intelligenz im Alter zu haben [21].

1.1.4 Neuroanatomie

Fluide Intelligenz basiert auf neurobiologischen Strukturen [14], wobei umstritten ist, ob sie mit einer universalen Hirnaktivität [22] oder einer regionalen Aktivierung im präfrontalen Kortex (PFC) einher geht [23]. Der PFC ist eine sehr gut entwickelte neokortikale Hirnregion bei Primaten und koordiniert zahlreiche neuronale Prozesse [24]. Er ist zuständig für kognitive Kontrolle und abstrakte Relationen, logisches Denken, Schlussfolgern und das Lösen neuer Probleme [25]. Im Gegensatz zum Gesamthirnvolumen korreliert das Volumen des PFC signifikant mit genereller Intelligenz [26].

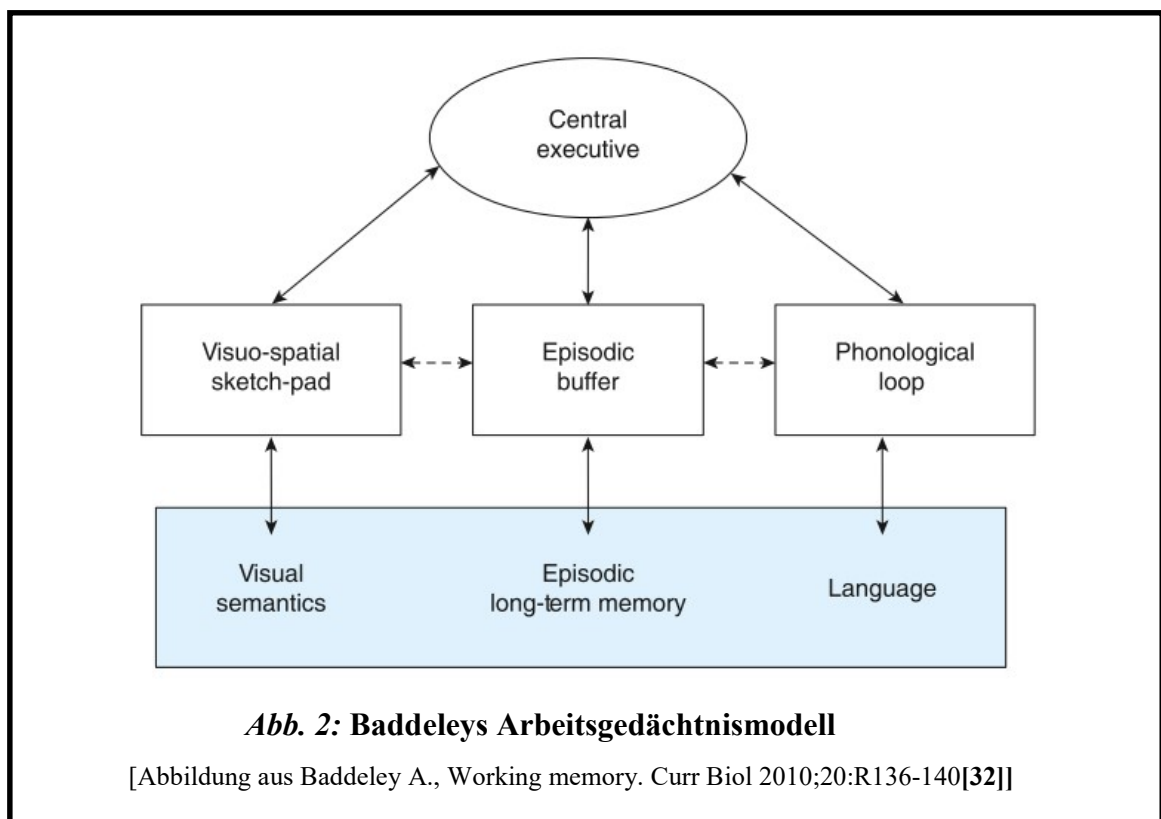
1.2 Arbeitsgedächtnis (AG)

Der Term „Arbeitsgedächtnis“ wurde 1960 von Miller entwickelt und bezeichnete ganz allgemein einen Ort oder Zustand im kognitiven System an dem kurzfristige Pläne und Ziele umgesetzt werden [27]. Es ist ein temporäres kapazitätslimitiertes Speichersystem, welches Informationen auch unter Ablenkung aktiv verfügbar hält, während simultan Informationen

verarbeitet und in kognitiven Leistungen angewandt werden können [28]. Es existieren unterschiedliche Modelle zur genauen Funktion des Arbeitsgedächtnisses. Cowan sieht im Arbeitsgedächtnis keine Struktur, sondern einen Aktivitätszustand aller mentalen Prozesse, die dafür Sorge tragen, dass ausgewählte Informationen im Rahmen einer kognitiven Leistung verfügbar sind [29]. In Engles Modell ist die Exekutive das zentrale Element, das kontrolliert auf Inhalte im Lang- und Kurzzeitspeichersystem zugreift [30]. Diese Arbeit stützt sich auf das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley [28].

1.2.1 Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell

Das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley und Hitch bestand ursprünglich aus drei Komponenten: eine zentrale Kontrollinstanz (Exekutive) und zwei modalitätsspezifische periphere Kurzzeitspeichersysteme: je ein Speicher für verbal-akustische und visuell-räumliche Informationen. Die zentrale Exekutive kontrolliert und reguliert das Arbeitsgedächtnis, indem es die Speicher koordiniert, die Aufmerksamkeit fokussiert und wenn nötig verändert [31]. Außerdem interagiert sie mit parallel arbeitenden Subsystemen (Kurz-, und Langzeitgedächtnis) [31, 32]. Später wurde eine vierte Komponente ergänzt: der episodische Puffer.



Dieser Puffer stellt einen passiven, temporären, multidimensionalen, aber kapazitätsbeschränkten Speicher dar, in dem diverse Komponenten des Arbeitsgedächtnisses kombiniert werden können und mit Informationen aus anderen Systemen wie Wahrnehmung und Langzeitgedächtnis interagieren [32]. Der episodische Puffer ist der bewussten Wahrnehmung zugänglich [28].

1.3 Gemeinsame Basis von fluider Intelligenz und Arbeitsgedächtnis

Das Arbeitsgedächtnis und hochrangige kognitive Prozesse, zu denen auch fluide Intelligenz zählt, korrelieren signifikant [33, 34]. Das Arbeitsgedächtnis formt die Basis für viele kognitive Prozesse, vor allem für komplexe Denkaufgaben [33]. Ein schwaches Arbeitsgedächtnis geht häufig einher mit einer geringen fluiden Intelligenz [35]. Einige Theorien zum Zusammenhang von Arbeitsgedächtnis und fluider Intelligenz werden im Folgenden kurz geschildert.

1.3.1 Verarbeitungsgeschwindigkeit (VG)

Cattell und Horn betrachten die Verarbeitungsgeschwindigkeit als einen Aspekt der generellen Intelligenz. Die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit korreliert nicht nur mit Intelligenztests [36], sondern auch mit komplexen Arbeitsgedächtnisaufgaben [37]. Die Korrelation nimmt zu, wenn unter Zeitlimitierung gearbeitet wird oder Gedächtnisleistungen bzw. Aufmerksamkeit stark beansprucht werden [15]. Die Abnahme der Verarbeitungsgeschwindigkeit ist maßgeblich an der Abnahme der Arbeitsgedächtnisleistungen im Alter beteiligt [38] und eine der Hauptursachen für die mentale Kapazitätsbeschränkung, da sie die Effizienz des kognitiven Systems beeinträchtigt [39].

1.3.2 Kapazitätsbeschränkung

„Reasoning (fluide Intelligenz) ist wenig mehr als Arbeitgedächtniskapazität“, postulierte Kyllonen provokant [40]. Er hatte mit Hilfe von Faktoranalysen sehr starke Korrelationen zwischen Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis und zur fluiden Intelligenz gefunden. Die Auswahl seiner Arbeitsgedächtnisaufgaben wurde jedoch später kritisiert [33]. Vermutlich ist die Arbeitsgedächtniskapazität eher eine primäre Determinante für Intelligenz und nicht Intelligenz an sich [41], denn mehr Lösungsstrategien gleichzeitig verfolgen zu können bedingt auch eine bessere bzw. schnellere Performanz im Bereich fluider Intelligenz [42]. Kontrollierte Aufmerksamkeitsprozesse limitieren sowohl die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses als auch der

Intelligenz. Etwa vier Informationen können gleichzeitig im Gedächtnis behalten bzw. bearbeitet werden [43]. Colom sieht in der begrenzten Kapazität des Kurzzeitspeichers die Ursache für den Zusammenhang von Arbeitsgedächtnis und fluider Intelligenz [44].

1.3.3 Zentrale Exekutive

Die Exekutive ist Teil des Arbeitsgedächtnisses (siehe Kapitel 1.2.1). Sie ermöglicht das Umsetzen innerer Absichten und Pläne durch Aufmerksamkeitsfokussierung, Inhibition, Zielverfolgung, Überwachung, Evaluation und Veränderung aktueller Prozesse [45]. Gerade in komplexen Situationen sorgt sie für eine reibungslose Informationsverarbeitung, Koordination und Kontrolle mentaler Prozesse [46]. Zielführende Informationen werden trotz Ablenkung aktiv verfügbar gehalten und irrelevante Informationen blockiert [34]. Die kontrollierte Aufmerksamkeit könnte für den Zusammenhang von fluider Intelligenz und dem Arbeitsgedächtnis verantwortlich sein [34, 43]. Zu dieser Vermutung veranlasst der Fund, dass der Zusammenhang unter starker Beanspruchung der Aufmerksamkeit am stärksten ist [47].

1.3.4 Neuronale Strukturen

Das Arbeitsgedächtnis und fluide Intelligenz werden mit ähnlichen neuronalen Strukturen assoziiert, zu denen der dorsolaterale präfrontale Kortex (dlPFC) und der parietale Kortex gehören [47]. Man vermutet, dass im dPFC aktiv Informationen durch das Arbeitsgedächtnis gespeichert werden, dass die Exekutive hier ihre Interferenz-Kontrolle durch Inhibitionsmechanismen ausübt, dass die Koordination neuronaler Prozesse in dieser Region stattfindet und dass Kernaufgaben der Gf im PFC ausgeübt werden können [24, 25].

1.3.5 Theorie über spezifische Korrelationen

Diese Theorie postuliert, dass nicht fluide Intelligenz als Ganzes mit dem Arbeitsgedächtnis als Ganzem korreliert, sondern nur einzelne Arbeitsgedächtnisfaktoren mit einzelnen Faktoren der fluiden Intelligenz [33]. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass unterschiedliche Arbeitsgedächtnis- und Intelligenztests verschieden stark korrelieren.

1.4 Kognition im Alter

Kognitives Altern beschreibt ganz allgemein die Abnahme der kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter, welche bis zu einem gewissen Grad physiologisch ist. Die Grenzen zum pathologischen Stadium sind fließend [48]. Nicht alle Hirnfunktionen müssen gleichermaßen betroffen sein [48, 49]. Die kognitive Altersforschung sucht nach konkreten funktionellen oder strukturellen Veränderungen und ihren Kompensationsmechanismen (Plastizität) im Alter.

1.4.1 Entwicklung der fluiden und kristallinen Intelligenz im Alter

Fluide und kristalline Intelligenz zeigen im Alter gegensätzliche Entwicklungen. Die fluide Intelligenz erreicht im jungen Erwachsenenalter (22.LJ) ihren Gipfel und nimmt dann stetig ab. Die kristalline Intelligenz nimmt bis zum späten Erwachsenenalter zu. Dies erklärt, dass „Weisheit“ mit Alter assoziiert ist [49]. Fluide Intelligenz scheint stärker auf hereditär festgelegten anatomischen Strukturen zu basieren. Kristalline Intelligenz unterliegt mehr den Umwelteinflüssen und wird soziobiographisch geprägt [49]. Im sehr hohen Alter gewinnt auch die biologische Komponente der kristallinen Intelligenz zunehmend an Bedeutung, die dann zu Beeinträchtigungen des erworbenen Wissens führt [50].

Es wird angenommen, dass sich die Intelligenzstruktur im Laufe des Lebens verändert (Differenzierungs-Dedifferenzierungshypothese des Alterns). In der Kindheit erfolgt eine kognitive Reifung (Differenzierung) von genereller Intelligenz hin zu domainen-spezifischem Wissen, welches im Erwachsenenalter anhält. Erst im hohen Alter kommt es durch Degeneration anatomischer Strukturen zu einem reziproken Prozess erneut hin zu einer universellen Intelligenz mit Verlust einzelner kognitiver Fähigkeiten (Dedifferenzierung) [49, 51].

1.4.2 Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses im Alter

Das Arbeitsgedächtnis ist besonders anfällig für kognitives Altern [52]. Eine graduelle Verschlechterung und Verlangsamung der Arbeitsgedächtnisleistung gehören zum normalen physiologischen Altern dazu [53]. Der Alterseffekt betrifft einfache wie komplexe Arbeitsgedächtnisaufgaben [54]. Er ist jedoch ausgeprägter in komplexen Arbeitsgedächtnisaufgaben mit simultanen Speicher- und Verarbeitungsanforderungen [55]. Ob der Alterseffekt modalitätsspezifisch ist, wird kontrovers diskutiert [46, 53].

1.4.3 Hypothesen zu den Ursachen des kognitiven Alterns

Kognitives Altern umfasst funktionelle und strukturelle Veränderungen. Diese werden mittels neuropsychologischer Testbatterien und Bildgebung wissenschaftlich erforscht. Gänzlich erklärt werden können sie jedoch noch nicht. Einige Theorien zum kognitiven Altern werden im Folgenden aufgeführt.

1.4.3.1 *Reduzierte mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit*

Die Verarbeitungsgeschwindigkeit reduziert sich bereits ab dem frühen Erwachsenenalter (25.LJ). Dies führt zu einer verminderten Effizienz, mit der Arbeitsgedächtnis- und Intelligenzleistungen im Alter erbracht werden können [20, 38]. Laut Salthouse limitiert eine reduzierte Verarbeitungsgeschwindigkeit einerseits kritisch das Zeitfenster für die Ausführung relevanter kognitiver Vorgänge und behindert andererseits die simultane Verarbeitung von Stimuli, was dann zu Störungen eines reibungslosen und aktuellen Verarbeitens führen kann [38].

1.4.3.2 *Reduzierte Arbeitsgedächtniskapazität*

Im Alter stehen dem Arbeitsgedächtnis geringere Ressourcen für Speicher- und Verarbeitungsprozesse zur Verfügung, so dass ihre Kapazität reduziert ist [56]. Da die Arbeitsgedächtnisleistung an vielen kognitiven Prozessen beteiligt ist, bedeutet eine limitierte Arbeitsgedächtniskapazität auch eine Limitierung komplexer kognitiver Leistungen [33], zu denen auch fluide Intelligenz gehört [55].

1.4.3.3 *Ineffektive Inhibition*

Im Alter scheint die Fähigkeit der effizienten Inhibition nachzulassen. Neue Informationen gelangen ungefiltert ins Gedächtnis und irrelevant gewordene Informationen werden nicht in ausreichendem Maße gelöscht. Die Folge ist ein überfüllter Arbeitsspeicher, der zu schlechteren kognitiven Leistungen führt. Informationen können nur langsam und unpräzise abgerufen werden [57]. Durch Überlagerung von Informationen entstehen Fehler (proactive interference) [58]. Es kommt zu einer leichteren Ablenkbarkeit, Schwierigkeiten mit selektiver Aufmerksamkeit, Sprachverständnis- und Gedächtnisschwierigkeiten [57].

1.4.3.4 *Reduzierte Asymmetrie*

Laut HAROLD-Hypothese (hemispheric asymmetry reduction in older adults) findet sich bei älteren Menschen im präfrontalen Kortex (PFC) nicht mehr die typische hemispärische Asymmetrie beim Speichern (linkshemisphärisch) und Abrufen (rechtshemisphärisch) von

Informationen, die sich bei Jüngeren findet. Möglicherweise bewirken Kompensation und Dedifferenzierung im Alter regionale und netzwerk-bezogene Veränderungen im PFC, die dann zu einer bilateralen Verarbeitung von Informationen führen [59].

1.4.3.5 Ineffektive Nutzung der neuronalen Ressourcen

Die CRUNCH Hypothese (compensation-related utilization of neural circuits hypothesis) besagt, dass gesunde ältere Erwachsene aufgrund ineffektiver Nutzung der neuronalen Ressourcen kompensatorisch mehr neuronale Ressourcen aktivieren müssen [60]. Während sie ab einer gewissen kognitiven Beanspruchung ein Plateau erreichen, d.h. es ist keine weitere Ressourcensteigerung möglich, besitzen die jüngeren Erwachsenen noch zusätzliches Aktivierungspotential. Dieses Phänomen konnte zum Beispiel bei Arbeitsgedächtnisaufgaben im PFC festgestellt werden [61].

1.4.3.6 Frontales Altern

Im Alter scheint besonders die funktionelle Integrität des PFC beeinträchtigt zu sein [62]. Altersbezogene Veränderungen der grauen Substanz im PFC [63] werden mit einer Verschlechterung des Arbeitsgedächtnisses [64], exekutiver Funktionen [24, 45], Verarbeitungsgeschwindigkeit und fluider Intelligenz [65] in Verbindung gebracht.

1.4.3.7 Dopaminhypothese

Ein unzureichendes Dopaminbindungspotential könnte ursächlich sein für eine veränderte Aktivierung des dorsolateralen PFC mit einhergehenden Störungen in allen kognitiven Funktionen, die dem PFC zugeordnet werden (siehe oben) [66, 67].

1.5 Plastizität im Alter

Plastizität bedeutet so viel wie „Formbarkeit“ oder „neuronale Reorganisation“ [68]. Diese bezieht sich auf strukturelle oder funktionelle kognitive Veränderungen, die hervorgerufen werden können durch externe Stimulation [68], worunter sowohl kognitives behavioriales [69] als auch körperliches Training [70] verstanden werden können. Strukturelle Plastizität erfolgt auf zellulärer und synaptischer Basis [71]. Funktionelle Plastizität zeigt sich durch veränderte Aktivität bestimmter Hirnareale [72]. Plastizität ermöglicht eine Leistungsanpassung an die Anforderungen der Umwelt [72].

Trotz struktureller Verluste scheint das Potential zur Plastizität auch im Alter [68, 70, 72] und im hohen Alter [73] erhalten zu sein. Dazu benötigt es allerdings einer Art „Reservekapazität“, d.h. zusätzliche Ressourcen, die genutzt werden können [74], wie zum Beispiel ein stärkeres kontralaterales Recruitment in rechts frontalen Regionen während einer Arbeitsgedächtnisaufgabe [75]. Die „scaffolding theory of aging and cognition (STAC)“ [76] geht davon aus, dass das Gehirn auf die im Rahmen des kognitiven Alterns auftretenden neuronalen und funktionellen Verluste mit kompensatorischer neuronaler Rekrutierung, d.h. Aktivität reagiert, um weiterhin ausreichende kognitive Leistungen erbringen zu können. Diese Kompensationsmechanismen können beispielweise durch ein kognitives Training gefördert werden [68].

1.6 Training

Der kognitive Leistungsabfall im Alter kann zum Verlust der Unabhängigkeit und zur Pflegebedürftigkeit führen [68, 77]. Neben Einbußen der Lebensqualität für den Betroffenen und dessen Angehörigen, stellt dieses auch ein ökonomisches Problem dar [68, 77]. Protektive Faktoren (s. Kapitel 1.1.3.) reichen oft nicht aus, um dem kognitiven Altern wirksam zu begegnen. Mittels kognitivem Training erhofft man eine Verlangsamung des kognitiven Leistungsabfalls bzw. eine Verzögerung pathologischer Prozesse erzeugen zu können [68]. Selten gelingt auch ein Wiederherstellen verlorener kognitiver Fähigkeiten [77]. Im Allgemeinen fällt der Trainingseffekt im Alter geringer aus als bei jungen Erwachsenen [78]. Ein gut konzipiertes Gedächtnis-, Geschwindigkeits- oder Intelligenztraining kann Effekte auf Funktionen im Alltag erzeugen [79]. Ein effektives Training muss individuell konstant anspruchsvoll bleiben [68], welches meist durch ein adaptives Trainingsprogramm gelingt.

1.6.1 Arbeitsgedächtnistraining

Man geht davon aus, dass nur konstante, hohe Anforderungen an Kernprozesse des kognitiven Systems, wie z.B. das Arbeitsgedächtnis, Plastizität erzeugen [68]. Ein Arbeitsgedächtnistraining kann sehr unterschiedlich aufgebaut sein und sowohl in der Wahl und Anzahl der Trainingsaufgaben variieren als auch in seinem Zeit- und Intensitätsfenster [80] (siehe Tabelle 1). Während einfache Arbeitsgedächtnisaufgaben (Spannungsaufgaben) nur die Speicherkapazität erhöhen [71], trainieren komplexe Arbeitsgedächtnisaufgaben (n-back) konstantes Merken, Abrufen, Reagieren, Ersetzen und Löschen von Informationen [80]. Dieses „Updaten“ korreliert

deutlich mit Intelligenz [81]. Ein Arbeitsgedächtnistraining hat Einfluss auf die Lateralisation [78], die Dopaminrezeptordichte [80], das Volumen [80], die strukturelle Integrität der weißen Substanz im präfrontalen und parietalen Kortex [80] und den neuronalen Aktivitätszustand [82]. Der PFC scheint stimulusunspezifisch aktiviert zu werden [82], so dass ein Training, welches Aktivität in diesem Gebiet erzeugt, auch mit verbesserter Performanz in nicht trainierten Aufgaben einhergehen könnte [71, 80, 82].

1.6.2 Transfer

Zeigen sich Zugewinne in nicht trainierten Aufgaben nach einem Training, bezeichnet man diese als Transfereffekte. Man spricht auch von Generalisierung von Fähigkeiten [71]. Grundvoraussetzung für das Entstehen von Transfereffekten ist eine Form der Überschneidung [83]. Zumeist überschneiden sich die kognitiven Prozesse wegen geteilter neuronaler Strukturen [71]. Das Ausmaß der Transfereffekte basiert auf der Wahl der Trainingsaufgabe(n), der Intensität und Dauer des Trainings und der Motivation des Teilnehmers [78, 80]. Der Term „naher Transfer“ wird verwendet, wenn Trainings- und Transferaufgabe derselben kognitiven Fähigkeit entspringen (z.B. zwei Arbeitsgedächtnisaufgaben). „Ferner Transfer“ hingegen besagt, dass beide Aufgaben wenig gemeinsam haben, aber miteinander assoziiert sind [83]. Letzterem entspricht ein Arbeitsgedächtnistraining mit Transfer auf fluide Intelligenz [69].

1.7 Aktuelle Studienlage

Studie	Alter-klasse	Training	Transfereffekte
Olesen 2004 [82]	Jung	13,3-20h adaptives AG-Training (verbale/nonverbale Aufgaben)	⊕ Transfereffekt: RAPM
Westerberg 2007 [84]	Jung	13,3-20h adaptives AG-Training (verbale/nonverbale Aufgaben)	⊕ Transfereffekt: RAPM
Jaeggi 2008 [69]	Jung	Max. 8h (8, 12, 17, 19 Tage) adaptives duales n-back (v/a).PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊕ Transfereffekt: BOMAT (12-19d) ⊖ Transfereffekt: RAPM (8d)
Jaeggi 2010 [85]	Jung	6,6h adaptives einfaches (v/a) und duales n-back. PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊕ Transfereffekt: BOMAT und RAPM (einfach +dual)
Schweizer 2011 [86]	Jung	6,6-10h adaptives duales n-back (v/a/ emotional/ neutral).PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊕ Transfereffekt: RSPM
Jaušovec 2012 [87]	Jung	30h progressives und variierendes AG-Training; u.a. einfaches und duales n-back (v/a). PZ: 1000-2000ms; ISI: 500ms	⊕ Transfereffekt: modifizierter RAPM+RCPM, PF&C
Chooi 2012 [88]	Jung	3-6h adaptives duales n-back (v/a). PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊖ Transfereffekt: RAPM
Rudebeck 2012 [89]	Jung	6,66h adaptives duales n-back (visuell-räumlich). PZ: 1000ms; ISI: 2500ms	⊕ Transfereffekt: BOMAT
Redick 2013 [90]	Jung	10-13h adaptives duales n-back (v/a). PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊖ Transfereffekt: RAPM, RSPM, 6 weitere Gf-Tests
Harrison 2013 [91]	Jung	15h adaptives AG-Training (Spannungsaufgaben)	⊖ Transfereffekt: RAPM
Thompson 2013 [92]	Jung	13,3h adaptives duales n-back (v/a). PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊖ Transfereffekt: RAPM, WASI, WASI III
Stephenson 2013 [93]	Jung	6,66h adaptives n-back (dual, einfach visuell & verbal); PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊕ Transfereffekt: RAPM, BETAI ⊖ Transfereffekt: Cattell, WASI
Minear 2016 [94]	Jung	6,66h adaptives räumliches n-back. PZ: 500ms; ISI: 2500ms	⊖ Transfereffekt: RSPM, Cattell

Dahlin 2008 [95]	Jung/ Alt	11,25h adaptives AG-Training (Updating)	⊖ Transfereffekt: RAPM
Borella 2010 [96]	Alt	6h adaptives und variierendes AG-Training (Spannungsaufgaben)	⊕ Transfereffekt: Cattell
Brehmer 2012 [97]	Jung/ Alt	Ca 15h adaptives AG-Training (verbale/nonverbale Aufgaben)	⊖ Transfereffekt: RSPM
Borella 2014 [98]	Alt/ Sehr alt	3h adaptives und variierendes AG-Training (Matrizen)	⊖ Transfereffekt: Cattell
Zinke 2014 [73]	Sehr alt	4,5h adaptives AG-Training (verbale, visuelle und exekutive Aufgaben)	⊕ Transfereffekt: RSPM
Lawler-Savage 2016 [99]	Mittel-alt	6,5h adaptives duales n-back (v/a). PZ: 500ms, ISI: 2500ms	⊖ Transfereffekt: RAPM, Cattell

Definition: jung (20-30 Jahre), mittelalt (30-60 Jahre), alt (60-70 Jahre), sehr alt (> 70 Jahre); ⊕: vorhanden; ⊖: nicht vorhanden; **BETA III:** Matrix Reasoning subtest; **BOMAT:** Bochumer Matrizen Test; **Cattell:** Culture fair intelligence test; **d:** Tage; **h:** Stunden **PF&C:** Paper folding and cutting, subtest of the Stanford-Binet IQ test; **PZ:** Präsentationszeit der Stimuli; **RAPM:** Raven's Advanced Progressive Matrices, **RCPM:** Raven's Colored Progressive Matrices; **RSPM:** Raven's Standard Progressive Matrices, **(v/a):** visuell und akustisch; **WASI:** Wechsler's Abbreviated Scale of Intelligence.

Tab. 1: Studien mit einem Arbeitsgedächtnistraining und ihre Effekte auf fluide Intelligenz

Trainingseffekte: Das Arbeitsgedächtnis ist in jedem Alter trainierbar. Als Trainingsparadigmen werden einfache [85, 87, 93, 94] oder duale n-back-Paradigmen [69, 85, 87-90, 92, 93, 99], aber auch zahlreiche andere Arbeitsgedächtnisaufgaben verwendet, wobei besonders häufig adaptive [69, 73, 82, 84, 91, 96-98] oder progressive [87] Trainingsmethoden angewandt werden.

Transfereffekte: Nahe Transfereffekte konnten sowohl bei jungen [85] als auch älteren Erwachsenen [73, 96, 97] beobachtet werden. Ferne Transfereffekte auf fluide Intelligenz zeigten sich nur in manchen Arbeitsgedächtnistrainingsstudien bei jungen [69, 82, 84, 85, 87, 89, 93], mittelalten [99], älteren [96] und sehr alten Probanden [73]. Es gibt jedoch auch Autoren, die ihre eigenen Studienergebnisse nicht replizieren konnten [96, 98] und viele weitere Autoren, die trotz ähnlichem Studiendesign keine Transfereffekte auf fluide Intelligenz zeigen konnten [88, 90-95, 97, 99].

1.8 Offene Fragen

Das Arbeitsgedächtnis und fluide Intelligenz sind kognitive Funktionen, die eng miteinander verknüpft sind (s. Kapitel 1.3.) und deren Leistungsfähigkeit mit zunehmendem Alter aufgrund funktioneller und struktureller Veränderungen abnimmt (s. Kapitel 1.4.1 und 1.4.2). Dennoch scheint das Potential zur Plastizität auch im fortgeschrittenen Alter erhalten (s. Kapitel 1.5) und durch ein kognitives Training induzierbar zu sein (s. Kapitel 1.6.).

Können Jaeggis Ergebnisse repliziert werden?

Diese Arbeit lehnt sich methodisch insbesondere an die Studien von Jaeggi an [69, 85, 100]. Sie zeigte, dass mit einem einfachen und dualen n-back-Training bei jungen Probanden Transfereffekte auf fluide Intelligenz erzeugt werden konnten. Sternberg [101] wies auf acht Limitierungen ihrer ersten Studie von 2008 hin: 1) nur eine Trainingsaufgabe 2) nur eine Gf-Transferaufgabe, was die Gefahr beinhaltet, dass nur spezifische Fähigkeiten trainiert und getestet würden 3) fehlende aktive Kontrollgruppe 4) nur duales Training 5) fehlendes Follow-up 6) Bedeutung für den Alltag 7) Replizieren der Daten nötig 8) fehlendes älteres Probandenkollektiv. Jaušovec [87] widmete sich den ersten drei Kritikpunkten und fand ebenfalls Transfereffekte auf fluide Intelligenz. Jaeggi [85] zeigte 2010, dass auch ein einfaches n-back-Training Transfereffekte generieren kann. Borella, Dahlin, Li, Westerberg und Zinke [73, 84, 96, 102] konnten abgeschwächte, aber persistierende Effekte im Follow-up für junge und ältere Probanden zeigen. Willis [79] zeigte, dass der Trainingserfolg Auswirkungen auf Fähigkeiten im Alltag haben kann.

Diese Studie widmet sich den letzten beiden Kritikpunkten Sternbergs. Es werden junge und ältere Probanden trainiert, mit der Intention Jaeggis Ergebnisse zu replizieren.

Kann ein n-back-Training im Alter Zugewinne in fluiden Intelligenz hervorrufen?

Es gibt wenige Studien, die ältere Probanden mit n-back trainierten. Li [102] konnte zeigen, dass ältere Probanden ihre Leistung in einem fixen n-back steigern konnten. Es zeigte sich ein deutlicher Performanzunterschied zu einer jungen Vergleichsgruppe. Ihr bester älterer Proband erreichte nur das Ausgangsniveau der jungen Probanden [102]. Bedauerlicherweise wurden in ihrer Studie Transfereffekte auf fluide Intelligenz nicht analysiert. Alle anderen Arbeitsgedächtnistrainingsstudien mit älteren Probanden verwendeten alternative

Trainingsaufgaben [73, 96-98]. Während Zinke und Borella 2010 (verbale Stimuli) Transfereffekte auf fluide Intelligenz fanden, konnten Brehmer und Borella 2013 (visuell-räumliche Stimuli) keine Transfereffekte finden.

In dieser Studie soll ermittelt werden, ob durch ein 4-wöchiges n-back-Training auch im Alter Zugewinne in fluider Intelligenz erzeugt werden können. Die Testergebnisse werden mit einer jungen Vergleichsgruppe abgeglichen. Außerdem soll die Performanzentwicklung im Bereich Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtnis und Exekutivfunktionen analysiert werden. Im Gegensatz zu Li wird in dieser Studie ein progressives n-back-Paradigma verwendet, um eine Generalisation der Effekte zu fördern.

Sind die Zugewinne dosisabhängig und handelt es sich um echte Zugewinne?

Moody [103] kritisierte zwei Punkte an Jaeggis erster Studie von 2008. Bemängelt wurden das Verwenden unterschiedlicher Transferaufgaben (RAPM versus BOMAT) für unterschiedliche Interventionszeiträume (8 Tage versus 12-19 Tage) und ihre Schlussfolgerung, dass der Transfer dosisabhängig sei. Es wurde nicht in Frage gestellt, ob der andere Test (RAPM) ursächlich für den fehlenden Transfer sein könnte. Außerdem wurde die Ähnlichkeit von Trainingsparadigma (duales n-back-Paradigma bestehend aus visuellen Matrix-Mustern) und Transferaufgabe (BOMAT bestehend aus 5x3 Matrix-Konfigurationen) kritisiert. Moody stellte in Frage, ob es sich tatsächlich um fernen Transfer handelte.

In der aktuellen Studie werden die Zugewinne nach 1 Woche (t2) und nach 4 Wochen (t3) überprüft. Zu t2 wird eine kleine Testbatterie verwendet (ZSV, ZSR, ZST, LPS3). Fluide Intelligenz wird mittels LPS3 zu drei Zeitpunkten und mittels RSPM zu zwei Zeitpunkten getestet. Der RSPM ist für ein älteres Probandenkollektiv geeignet und unterscheidet sich deutlich von der Trainingsaufgabe n-back (Zahlen versus Matrizen), so dass erworbene aufgabenspezifische Fähigkeiten im n-back keinen Einfluss auf die Performanz in den Gf-Aufgaben haben dürften.

1.9 Hypothesen

1.9.1 Hypothese zum Trainingseffekt

Der Trainingseffekt in dieser Studie wird anhand des maximal erreichten n-back-Levels bestimmt. Nur bei ausreichender Leistung (über 80% Trefferquote und 0% Fehlerquote) steigt der Proband ein Level auf. Die Level unterscheiden sich in der Anzahl zu merkender Zahlenspannen und in der Geschwindigkeit, in der sie bearbeitet werden müssen. Es wird erwartet, dass die jungen Erwachsenen aufgrund ihrer größeren Arbeitsgedächtniskapazität und höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit eine schnellere und insgesamt höhere Levelprogression aufweisen werden als die älteren Erwachsenen.

1.9.2 Hypothesen zu Effekten auf die untrainierten Aufgaben

Da sich alle kognitiven Funktionen (fluide Intelligenz, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtnis und Exekutivfunktionen) im Alter verschlechtern, wird davon ausgegangen, dass die jüngeren Probanden eine bessere Leistung in allen Tests zeigen werden. Die jungen Erwachsenen werden vermutlich höhere n-back-Level erreichen und damit auf einem höheren Niveau trainieren. Außerdem wird bei den jungen Probanden ein größeres Potential zur Plastizität erwartet als bei den Älteren, so dass bei den jungen Probanden größere Effekte in den untrainierten Aufgaben erwartet werden, d.h. größere Zugewinne zu erkennen sein sollten.

2 a) Fluide Intelligenz:

Transfereffekte auf fluide Intelligenz können durch ein einfaches n-back-Training generiert werden [100]. Transfer konnte in der Vergangenheit bei jungen Probanden auf den RAPM [85, 87] und bei älteren Probanden auf den RSPM [73] gezeigt werden. Da sowohl das Arbeitsgedächtnis als auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit neuronale Strukturen mit fluider Intelligenz teilen, sollte das Training der Arbeitsgedächtniskapazität (n-back) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (kurze Interstimulusintervalle) dazu führen, dass mehr Lösungsstrategien gleichzeitig und schneller verfolgt werden können [42, 69]. Eine größere Anzahl richtiger Lösungen sollte im gleichen vorgegebenen Zeitrahmen in den nicht trainierten Aufgaben RSPM und LPS3 erzielt werden können.

2 b) Verarbeitungsgeschwindigkeit

Wie bereits erwähnt erfolgt die Adaptation des Arbeitsgedächtnistrainings neben dem n-back auch über das Interstimulusintervall. Das verkürzte Reaktionszeitfenster trainiert die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Es wird erwartet, dass die Probanden am Ende des Trainings eine beschleunigte Verarbeitungsgeschwindigkeit zeigen. Dies dürfte sich in einer größeren Anzahl richtiger Lösungen im Zahlen-Symbol-Test und einer schnelleren Vervollständigung der Zahlenverbindungstests Teil A und Teil B widerspiegeln.

2 c) Arbeits- und Kurzzeitgedächtnis

Es wird erwartet, dass durch das n-back-Training, welches einer komplexen Arbeitsgedächtnisaufgabe entspricht, auch Effekte in einer einfachen Arbeitsgedächtnisaufgabe generiert werden können. Dazu gehören die Zahlenspannen vorwärts und rückwärts. Laut Bopp testeten sie ähnliche kognitive Fähigkeiten wie das Arbeitsgedächtnisparadigma n-back [56]. Zugewinne in den Zahlenspannen konnten bereits durch Jaeggi [69] und Jausovec [87] für junge und durch Borella [96] für alte Erwachsene gezeigt werden, wobei nur Jaeggi ausschließlich mit n-back trainierte.

2 d) Exekutivfunktionen

Um ein einfaches n-back-Paradigma erfolgreich zu absolvieren, werden verschiedene exekutive Prozesse benötigt. Dazu gehören Updating, Monitoring der Zahlen-Präsentation und Inhibition falscher (lure trials) oder veralteter Ziele [104]. Als Transferaufgabe zur Exekutive werden die Wortflüssigkeitsaufgaben Kategorie Tiere und Buchstaben genutzt. Hierfür benötigt der Proband eine gute Arbeitsgedächtnis- (Merken von Instruktionen und bereits gegebenen Antworten) und Inhibitionsleistung, um irrelevante oder bereits genannte Begriffe zu unterdrücken [105]. Außerdem wird im n-back durch die verkürzten Interstimulusintervalle die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Probanden trainiert, so dass erwartet wird, dass die Probanden in den zeitbegrenzten Wortflüssigkeitstests nach dem Training mehr richtige Antworten geben werden.

1.9.3 Hypothese zu den Einflüssen auf die fluide Intelligenz

Im n-back-Paradigma werden das Arbeitsgedächtnis und die Verarbeitungsgeschwindigkeit trainiert. Es wird angenommen, dass Arbeitsgedächtnisleistungen und fluide Intelligenz auf gemeinsamen Eigenschaften basieren (s. Kapitel 1.3.). Daher müssten die Ergebnisse der Gf-Tests am Ende des Trainings mit dem maximal erreichten n-back-Level korrelieren und darüber hinaus möglicherweise auch mit den Tests zur Verarbeitungsgeschwindigkeit, zum Arbeitsgedächtnis und zur Exekutive.

1.9.4 Hypothese zu den Prädiktoren für das n-back-Level und die fluide Intelligenz

Da Arbeitsgedächtniskapazität und fluide Intelligenz wie in Kapitel 1.3. beschrieben eine gemeinsame Basis aufweisen, wird die Hypothese aufgestellt, dass bereits vor dem Training (Zeitpunkt t1) anhand der Leistung in den Gf-Aufgaben (RSPM und LPS3) der Trainingserfolg im n-back vorhergesagt werden kann. Des Weiteren wird vermutet, dass anhand des Trainingserfolges der Effekt auf die fluide Intelligenz vorhergesagt werden könnte.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Studiendesign

Es handelt sich um eine prospektive experimentelle Studie mit 15 gesunden jungen und 16 gesunden älteren Probanden.

2.1.1 Ethikkommission

Diese Studie wurde unter Berücksichtigung der Deklaration von Helsinki zur biomedizinischen Forschung am Menschen von der zuständigen Ethikkommission der Charité genehmigt.

2.1.2 Rekrutierung

Die Rekrutierung der jungen Probanden erfolgte über Aushänge an den Kliniken der Charité-Universitätsmedizin Berlin und per Email über den Semesterverteiler der Charité im Januar und Februar 2009. Die älteren Probanden wurden über Informationsblätter in Seniorensportverbänden im Januar 2009 und ein Inserat im Tagesspiegel im August 2009 über die Studie informiert und rekrutiert.

2.1.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien: 20 - 30 Jahre (jung), 60 - 72 Jahre (alt), normaler oder korrigierter Visus.

Ausschlusskriterien: Schädel-Hirn-Trauma, Apoplex, Hirntumor, Epilepsie, Psychose, Schwindel, Depression, Parkinson, vigilanz-beeinflussende Medikamente, Psychologiestudium, MMST < 28 Punkte, da in diesen Fall von einer leichten kognitiven Einschränkung (MCI) ausgegangen wurde [106], und Versäumnis zweier aufeinanderfolgender Trainingstermine.

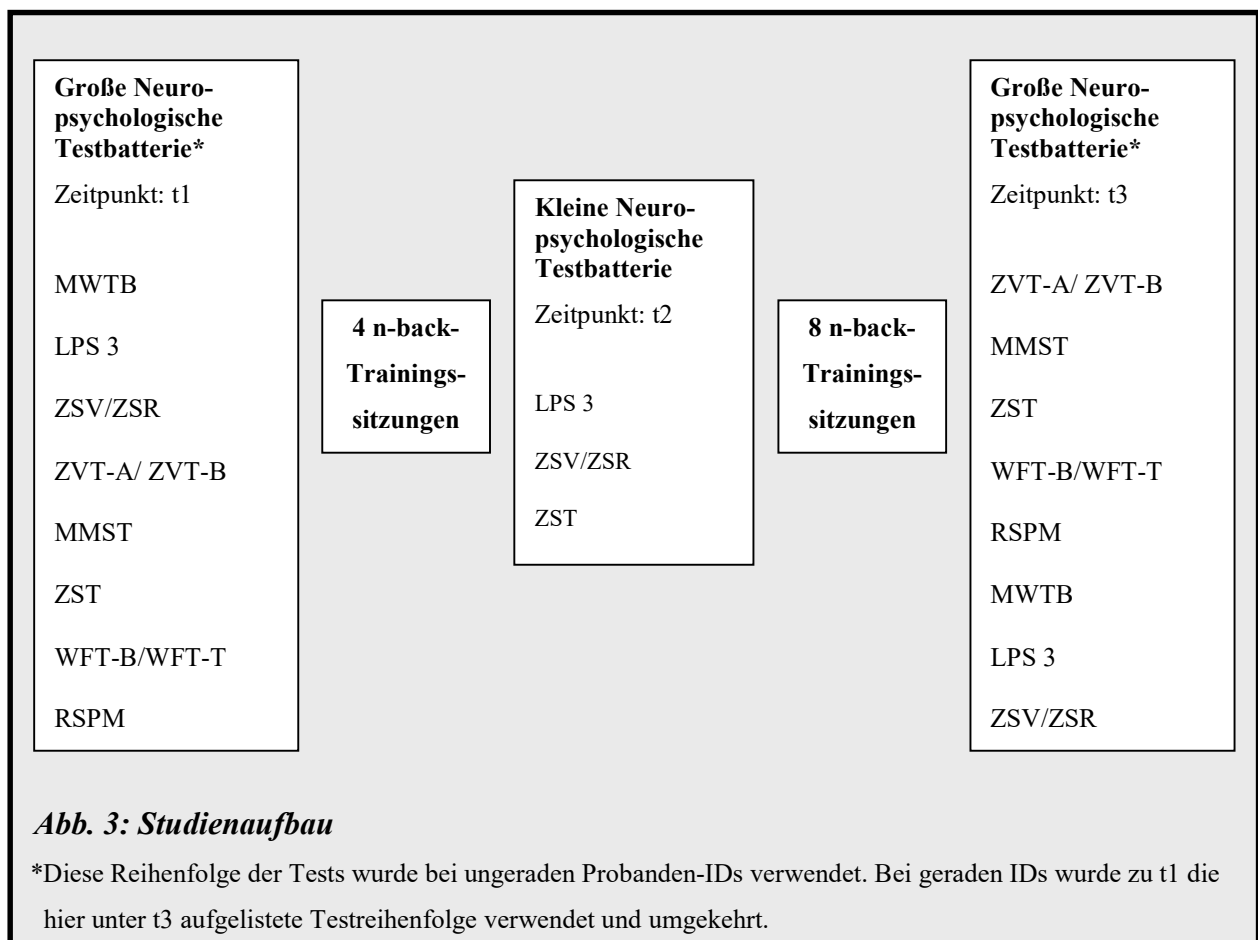
2.1.4 Aufklärung und Einverständniserklärung

Alle Probanden erhielten eine mündliche und schriftliche Aufklärung über den Hintergrund und das Ziel der Studie, Teilnahmevoraussetzungen, Studienablauf, mögliche Risiken und möglichen Nutzen, Studienabbruch, Umgang mit personenbezogenen Daten, Versicherungsschutz, ethisch rechtliche Grundlagen, Freiwilligkeit und Aufwandsentschädigung. Eine Einwilligungserklärung, freiwillig an dieser Studie teilzunehmen, wurde unterschrieben. Die

Möglichkeit des unbegründeten Studienabbruchs bestand zu jeder Zeit. Alle Daten wurden pseudonymisiert. Der Studienleiter verpflichtete sich zur Schweigepflicht.

2.1.5 Studienaufbau

Alle Sitzungen fanden im St. Hedwig-Krankenhaus Berlin in einem gut beleuchteten Raum statt und wurden einzeln betreut. Nach einer neuropsychologischen Eingangstestung (siehe Abbildung 3) erfolgte ein 4-wöchiges Training (3 Termine pro Woche) in dem junge und ältere Probanden dasselbe adaptive visuell-numerische n-back absolvierten. Der individuelle Termin fand immer zur selben Uhrzeit statt. Nach 4 Trainingsterminen und am Ende des Trainings fanden erneut neuropsychologische Testungen statt (siehe Abbildung 3). Die große neuropsychologische Testung vor und nach dem Training erfolgte in einem ein- bis viertägigen Abstand zum Training. Um systematische Verzerrungen wie Sequenzierungseffekte auszuschließen, gab es innerhalb der Testbatterie zwei verschiedene Abfolgen der Tests.



2.1.6 Aufwandsentschädigung

Alle Probanden erhielten als Aufwandsentschädigung am Ende des vollständigen Trainings 140€ (10€ pro Sitzung).

2.2 Probandenkollektiv

Der gesundheitliche Zustand der Probanden wurde mittels eines schriftlichen Fragebogens und des Mini Mental Status Tests (MMST) eruiert [107]. Drei ältere Probanden mussten aufgrund einer zu geringen Punktezahl im MMST von der Studie ausgeschlossen werden. Nach dem Screening wurden 15 junge (6 Männer, 9 Frauen, mittleres Alter = 25.9 Jahre, SD = ± 1.94 , Spanne: 24-30 Jahre) und 17 ältere Probanden (7 Männer, 10 Frauen, mittleres Alter: 65.47 Jahre, SD = ± 4.14 , Spanne 60-72 Jahre) in die Studie eingeschlossen. Die Probanden-IDs wurden randomisiert zugeordnet. Während des Trainings schied ein weiterer älterer Proband aus, da er zwei aufeinander folgende Trainingssitzungen versäumte, so dass insgesamt 15 junge und 16 ältere Probanden in die Auswertung eingeschlossen wurden.

2.3 Training

2.3.1 Das n-back-Paradigma

Das n-back-Paradigma wurde als Trainingsaufgabe gewählt, da es paralleles Speichern und Verarbeiten erfordert und damit nach dem Modell von Baddeley den Kernaufgaben des Arbeitsgedächtnisses entspricht [28]. Außerdem kann es in seinem Schwierigkeitsgrad variiert werden, so dass eine Adaptation an das individuelle Können des Probanden möglich ist. N-back ist ein Computerprogramm, welches Stimuli (z.B. Zahlen) präsentiert. Die Aufgabe besteht darin, sich diese Zahl zu merken und zu reagieren, wenn sich die Zahl in einem vorher festgelegten Intervall (n-Stellen später) wiederholt. Der Proband muss also zeitgleich Stimuli enkodieren, abrufen, aktualisieren bzw. löschen [80, 108].

In dieser Arbeit wurde ein visuell-numerisches n-back-Paradigma verwendet [109], welches weiße Zahlen von „0“ bis „9“ (Schriftgröße 120 pt) auf einem ansonsten schwarzen Bildschirmhintergrund präsentierte. Die Zahlen erschienen einzeln in randomisierter Reihenfolge für 500 ms [85]. Der schwarze Bildschirm zwischen den Stimuli (Zahlen) wird als Interstimulusintervall (ISI) bezeichnet und variierte je nach Level von 1000 - 1800 ms. Ein

Stimulus, bei dem eine Reaktion erwartet wird, da die n-back-Bedingung erfüllt ist, wird als Ziel bezeichnet (siehe Abbildung 4). Auch die Anzahl der präsentierten Stimuli und Ziele variierten je nach Schwierigkeitsstufe (Level) (siehe Tabelle 2). Das Reaktionszeitfenster der Probanden entsprach der Präsentationszeit (500 ms) + ISI (1000 - 1800 ms). Die n-back-Bedingungen variierten von 0- bis 5-back. Welche Bedingung erfragt war, wurde dem Probanden jeweils vorher angezeigt. 0-back blieb in allen Leveln erhalten und testete nur die Aufmerksamkeit der Probanden, da lediglich auf den Stimulus „0“ reagiert werden musste [108]. Bei 1-back musste der Stimulus mit dem direkt davor präsentierten Stimulus übereinstimmen; bei 2-back mit dem zwei Stellen vorher präsentierten Stimulus u.s.w.. Reagierte der Proband richtig, war dies ein Treffer. Reagierte er falsch, war dies ein Fehler. Das Training war in Level und Blocks eingeteilt (siehe Abbildung 5 und Tabelle 2). Nach jedem Block gab es ein Feedback über die eigene Performanz (Treffer und Fehler). Der Proband reagierte per Klick auf die linke Maustaste. Irrelevante Stimuli erforderten keine Reaktion.



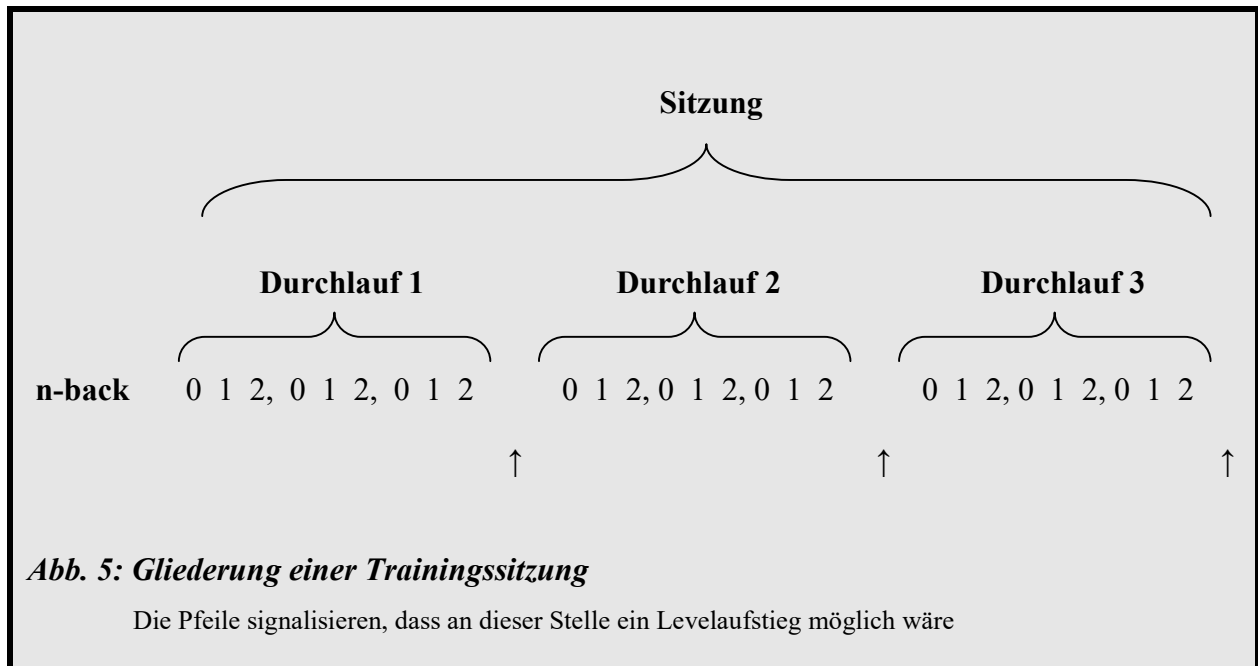
2.3.1.1 Sitzungsaufbau

Ein Trainingstermin dauerte ca. 45 min (ca. 30 min Training mit ca. 15 min Pause dazwischen) und wurde als „Sitzung“ bezeichnet. Eine Sitzung bestand aus drei Durchläufen, in denen jeweils ein Level trainiert wurde. Zwischen den Durchläufen war ein Levelaufstieg möglich (siehe Abbildung 5).

2.3.1.2 Adaptation

Wenn stets am Performanzmaximum, d.h. an der Arbeitsgedächtniskapazitätsgrenze gearbeitet und Automatismen verhindert werden [82], sind Transfereffekte wahrscheinlich. Daher wurde

ein progressives Training mit Levelaufstiegen durchgeführt. Für einen Levelaufstieg mussten 80 Prozent der Ziele erkannt und keine Fehler gemacht werden. Die Adaptation erfolgte zunächst über die Reduktion des Interstimulusintervalls in 200 ms - Schritten von 1800 ms auf bis zu 1000 ms. Danach wurde das Interstimulusintervall wieder auf 1800 ms zurückgesetzt und ein schwierigerer n-back-Modus gewählt [110] (siehe Tabelle 2).



Level	n-back	ISI	Stimuli	Ziele	Level	n-back	ISI	Stimuli	Ziele
1	0, 1, 2	1800	20	5	11	0, 3, 4	1800	20	5
2	0, 1, 2	1600	20	5	12	0, 3, 4	1600	20	5
3	0, 1, 2	1400	24	6	13	0, 3, 4	1400	24	6
4	0, 1, 2	1200	24	6	14	0, 3, 4	1200	24	6
5	0, 1, 2	1000	28	7	15	0, 3, 4	1000	28	7
6	0, 2, 3	1800	20	5	16	0, 4, 5	1800	20	5
7	0, 2, 3	1600	20	5	17	0, 4, 5	1600	20	5
8	0, 2, 3	1400	24	6	18	0, 4, 5	1400	24	6
9	0, 2, 3	1200	24	6	19	0, 4, 5	1200	24	6
10	0, 2, 3	1000	28	7	20	0, 4, 5	1000	28	7

Tab. 2: Levelaufbau des n-back-Paradigmas

2.3.1.3 Ergebnisparameter des n-back-Trainings

Im n-back-Paradigma wurden Arbeitsgedächtniskapazität (n-back ↑) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (ISI ↓) trainiert. Die Arbeitsgedächtniskapazität wurde anhand des „maximal erreichten n-back-Levels“ ermittelt. Der Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit sollte mit der Variable „Durchläufe pro Level“ erfasst werden. Jedoch gab es ältere Probanden, die kaum Levelaufstiege schafften. Somit ergab sich eine inkongruente Probandenanzahl für die einzelnen Level. Um dennoch die Performanz der jungen und älteren Probanden vergleichen zu können, wurden nur die älteren Probanden in diese Berechnung eingeschlossen, die Level 5 erreichten (n = 12). So konnten die Level 1 bis 5 miteinander verglichen werden. Richtige und falsche Reaktionen [Trefferquote (Treffer / Ziele * 100) und Fehlerquote (Fehler / irrelevante Stimuli * 100)] (siehe Tabelle 5) dienten in dieser Studie nur als Hinweis, dass die Probanden bis zum Ende des Trainings an ihren Kapazitätsgrenzen trainierten.

2.4 Neuropsychologische Testbatterie

Die neuropsychologischen Tests wurden zu drei Zeitpunkten durchgeführt (siehe Abbildung 3).

Funktion	Tests	Medium	Zeitbegrenzung
Demenzscreening	MMST	Papier	Zeit unbegrenzt
Gf	LPS3	Papier	3 min.
	RSPM	Papier	7,5 min./ 30 Matrizen
Gc	MWT-B	Papier	Zeit unbegrenzt
VG	ZST	Papier	1 min.
	ZVT-A/-B	Papier	Zeit wurde gemessen
Kurzzeitgedächtnis/ AG	ZSV	Akustisch	Zeit unbegrenzt
	ZSR		
Exekutivfunktion	WFT-B/ WFT-T	Verbal	1 min. je Kategorie

Tab. 3: Übersicht über die neuropsychologische Testbatterie

2.4.1 Demenzscreening

Der MMST ist ein gängiger Test zur Demenzfrüherkennung, dessen Vorteil in seiner kurzen Dauer, leichten Administration und leichten Auswertung liegt und von Folstein entwickelt wurde [107, 111]. Der MMST testet die örtliche und zeitliche Orientierung, Aufmerksamkeit, Rechnen, Sprache und das Kurz- und Langzeitgedächtnis [111]. Die maximale Punktzahl beträgt 30. Nur Probanden mit einer Punktzahl über 28 wurden zur Studie zugelassen [106].

2.4.2 Fluide Intelligenz

Die Schwierigkeit der Messung von fluider Intelligenz besteht darin, dass „das Potential einer Person“ [112] erfasst werden soll und nicht das erlernte Wissen (kristalline Intelligenz), welches - wie bereits erwähnt - kulturabhängig ist [6]. Da es unmöglich ist einen Intelligenztest ohne Beteiligung der kristallinen Intelligenz zu konstruieren, bezeichnet Cattell diese Tests nur als „culture fair“ statt „culture free“ [113]. Culture fair tests sind figural-bildhaft, während Tests, die kristalline Intelligenz testen meist verbal oder numerisch sind. Die Modalität des Tests (visuell oder akustisch) scheint irrelevant zu sein [9]. Voraussetzung für valide, vergleichbare Ergebnisse sind gleiche Kenntnis oder Unkenntnis des Tests für alle Probanden. Non-verbale reasoning Aufgaben sind geeignet, um generelle bzw. fluide Intelligenz zu messen [80].

2.4.2.1 RSPM (*Raven's Standard Progressive Matrices*)

Der RSPM [114] ist ein allgemein akzeptierter Test für fluide Intelligenz [14], da er logisches Denken, das Erkennen abstrakter Relationen und das dynamische Verwalten verschiedener Lösungsansätze im Arbeitsgedächtnis für ständig wechselnde Probleme erfordert [42, 111]. Diese drei Kriterien machen ihn für diese Studie zu einem zuverlässigen Testinstrument. Interindividuelle Unterschiede werden zuverlässig und konstant erkannt. Es werden ausreichende Datenmengen erhoben, so dass das Problemlöseverhalten wiederholt studiert werden kann.

Der RSPM besteht aus 60 Matrizen, die in 5 Sets (A - E) unterteilt sind [111]. Innerhalb der Sets werden die Matrizen progressiv schwerer. Wie bei einem Puzzle fehlt in jeder Matrize ein Stück. Das richtige Stück muss aus 6 - 8 vorgegebenen Stücken herausgefunden werden [111]. Zu den Testzeitpunkten t1 und t3 wurden jeweils Parallelversionen mit je 30 Matrizen genutzt, um Test-Retest-Verzerrungen auszuschließen. Dieses Procedere wurde auch in anderen Studien angewandt [85, 115]. Version 1 setzte sich zusammen aus den Matrizen 1, 3, 5, 8, 10, 12 der Sets A-E. Version 2 setzte sich zusammen aus den Matrizen 2, 4, 6, 7, 9, 11 der Sets A-E. Beim RAPM gelten gerade und ungerade Versionen als ebenbürtig schwer [84], so dass angenommen

wurde, dass auch die Parallelversionen dieser Studie ähnlich schwer waren. Der RSPM ist normalerweise zeitlich unbegrenzt. Um Ceiling-Effekte zu vermeiden und die neuropsychologische Testung so kurz wie möglich zu halten [85], wurde in dieser Studie eine Zeitbegrenzung von 7,5 min für 30 Matrizen festgelegt. Beim RAPM konnte gezeigt werden, dass die Performanz in zeitlich begrenzten und unbegrenzten Versionen korreliert [85]. Alle korrekt gelösten Matrizen bildeten den Score für die Auswertung.

2.4.2.2 LPS3 (Leistungsprüfsystem)

Der LPS3 ist ein Untertest aus einem von Horn entwickelten und überarbeiteten Intelligenztest [116]. Er prüft die logische Denkfähigkeit (Gf) und das Erkennen von Gesetzmäßigkeiten [117]. Der Test besteht aus 38 Zeilen mit je acht Symbolen, die nach einem unbekanntem Gesetz angeordnet sind bzw. durch ein unbekanntes Muster miteinander harmonisieren. Ein Element verstößt gegen die Gesetzmäßigkeit. In drei Minuten sollen möglichst viele Fehler gefunden werden. Es existieren zwei Übungszeilen. Den Score bildeten alle korrekt erkannten Fehler. Ein junger Proband (ID: 001) absolvierte den LPS3 nicht, da der Test nachträglich hinzugefügt wurde, so dass für diesen Test bei den jungen Probanden immer von der Fallzahl $n = 14$ auszugehen ist.

2.4.3 Kristalline Intelligenz

Der MWTB ist ein von Lehrl entwickelter progressiver Intelligenztest, der die Intellektuelle Leistungsfähigkeit bzw. das erlernte verbale Wissen (Gc) abfragt [118]. Der Test besteht aus 37 Zeilen mit sinnlosen Wortneuschöpfungen und je einem umgangs-, bildungs- oder wissenschaftssprachlich bekannten Wort. Letzteres soll erkannt werden. Es gab keine Zeitbegrenzung. Alle korrekt erkannten Wörter bildeten den Score.

2.4.4 Verarbeitungsgeschwindigkeit

2.4.4.1 Zahlen-Symbol-Test (ZST)

Der ZST stammt aus dem Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS) [119] und testet die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit [68, 111]. Jeder Zahl (1 - 9) entspricht ein bestimmtes Symbol. In ein Raster aus randomisierten Zahlen sollen die zugehörigen Symbole eingetragen werden. In 60 Sekunden sollen möglichst viele Felder nacheinander ausgefüllt werden. Initial gibt es sieben Übungsfelder. Der Score ergibt sich aus der Anzahl richtig eingetragener Symbole.

2.4.4.2 Zahlenverbindungstest Teil A und B (ZVT- A und B)

Der ZVT testet Aufmerksamkeit, Geschwindigkeit und mentale Flexibilität [111]. Ursprünglich war der ZVT Teil der „Army Individual Test Battery“ und wurde dann von Reitan adaptiert und der „Halstead Battery“ zugefügt [120]. In Teil A müssen auf einem Papier die Zahlen 1 bis 25 in korrekter Reihenfolge miteinander verbunden werden. In Teil B müssen Zahlen und Buchstaben in alternierender Reihenfolge durchgängig miteinander verbunden werden (1 A 2 B 3 C usw.) [111]. In beiden Versionen gibt es eine kurze Übungsaufgabe. Die Zeit [Sekunden] bis zur fehlerfreien Fertigstellung der Aufgabe wurde gemessen und bildete den Score.

2.4.5 Kurzzeitgedächtnis und Arbeitsgedächtnis

Die Zahlenspannen vorwärts und rückwärts (ZSV und ZSR) sind ebenfalls Tests aus dem WAIS [119]. Der Test kann für Individuen bis ins hohe Alter genutzt werden [111]. Während die ZSV hauptsächlich die Aufmerksamkeit und die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses testet [119, 121], wird bei der ZSR auch das Arbeitsgedächtnis getestet, da er simultanes Speichern und Verarbeiten erfordert [111, 122].

Die Zahlenspannen wurden mit einer Geschwindigkeit von 1 Zahl pro Sekunde vorgelesen. Jede Spannenlänge der Zahlenspanne vorwärts (drei bis acht Zahlen) hatte zwei Spannen, die korrekt wiedergegeben werden musste. Wurden beide Spannen einer Länge nicht korrekt wiedergegeben, wurde der Test abgebrochen. Als normal gilt eine korrekt wiedergegebene Spanne von sechs bis sieben Stimuli [123, 124]. Die Spannen der Zahlenspanne rückwärts (zwei bis sieben Zahlen) mussten rückwärts wiederholt werden. Es galten dieselben Abbruchkriterien wie bei der Zahlenspanne vorwärts. Als normal gilt eine Spanne von vier bis fünf Zahlen [123]. Den Score bildete die Anzahl richtig wiederholter Spannen.

2.4.6 Exekutivfunktionen

Die Wortflüssigkeitstests evaluieren die spontane Wortproduktion unter Regeleinschränkung [111]. Neben dem Vokabular werden die Exekutivfunktionen getestet, welche vor allem eine gute Inhibitionsleistung, aber auch eine gute Arbeitsgedächtnisleistung (Exekutivfunktion als Teil des Arbeitsgedächtnisses) beinhalten [105]. Möglicherweise zeigt sich ebenfalls die Effizienz, mit der auf das Langzeitgedächtnis zugegriffen werden kann [125]. Der Test besteht aus vier Teilen. Zur Kategorie Buchstaben „F, A, S“ (phonematische Wortflüssigkeit) [126] und

zur Kategorie „Tiere“ (semantische Kategorie) [111] sollten in jeweils einer Minute möglichst viele Wörter genannt werden. Eigennamen und Wiederholungen galten als Fehler. Die Anzahl richtig genannter Wörter in der phonematischen (F,A,S wurden zusammengefasst) und semantischen Kategorie bildeten je einen Score.

2.5 Statistische Auswertung

2.5.1 Allgemein

Die statistische Auswertung der Daten und Überprüfung der Hypothesen erfolgte mit Hilfe des Programms IBM® SPSS® Statistics Version 21.

Gemeinhin liegt das α - Signifikanzniveau bei $p = ,05$. Aufgrund multipler Tests erfolgt eine Bonferroni-Korrektur. Das Signifikanzniveau der neuropsychologischen Tests wurde auf $p \leq 0,05/10 \text{ Tests} = p \leq 0,005$ adjustiert.

Die wichtigsten Ergebnisse wurden tabellarisch erfasst (Tabelle 4 bis 7). Angegeben wurden Mittelwerte, Standardabweichungen und Spannen der Ergebnisse. Mittels 2-seitigen t-Tests für unabhängige Stichproben respektive Chi²-Tests (Probandenmerkmale) wurden Gruppenunterschiede geprüft.

2.5.2 Parametrische Testverfahren (Varianzanalysen, t-Tests)

Als Voraussetzung für parametrische Tests gelten die Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test), Varianzhomogenität (Levene-Test) und bei Messwiederholungen (ab drei Stufen) auch Sphärizität (Mauchly-Test). Auch bei Verstoß einiger Voraussetzungen wurden parametrische Testverfahren genutzt (zur Begründung siehe Kapitel 4.2).

Bei Verletzung der Varianzhomogenität kann ein zusätzlicher Test, Hartleys F_{\max} -Test, durchgeführt werden, um bei groben Varianzverletzungen das α -Signifikanzniveau anzupassen. „Hierzu werden die größte und die kleinste beobachtete Gruppenvarianz herangezogen und die größere durch die kleinere Varianz dividiert. Je nach Verhältnis der Gruppengrößen gibt es dann Richtlinien zur Änderung des α -Fehlers: $F_{\max} > 10$ bei einem Verhältnis der Gruppengrößen von maximal 4:1 \rightarrow α -Fehler auf ,025 statt ,05 senken“ [130].

Bei Verletzung der Sphärizität, d.h. die Differenzen der einzelnen Stufen sind nicht gleich, müssen die Freiheitsgrade korrigiert werden. Nach der Empfehlung von Girden (1992) wurde bei

einem Greenhouse-Geisser-Epsilon von $\epsilon > .75$ eine Huynh-Feldt-Korrektur und bei $\epsilon < .75$ eine Greenhouse-Geisser-Korrektur angewandt [131].

Es wurden zweifaktorielle Varianzanalysen (Altersgruppe und Trainingseffekt) mit Messwiederholung auf einem Faktor durchgeführt. Beim n-back-Training wurden die Ergebnisse der Sitzungen 1 und 12 miteinander verglichen und bei den neuropsychologischen Tests die Messzeitpunkte t1, t2 und t3. Mit Hilfe der Varianzanalyse wurden Haupteffekte für Gruppe (Zwischensubjektfaktor) und Training (Innersubjektfaktor) ermittelt. Die Interaktion von Training und Gruppe gab Auskunft über Trainingsunterschiede, die vom Alter moderiert wurden. Das partielle Eta-Quadrat (η^2) steht für die Effektgröße ($\eta^2 < ,06$ kleiner Effekt, $\eta^2 < ,14$ mittlerer Effekt, $\eta^2 > ,14$ großer Effekt) und beschreibt den Teil der erklärten Varianz in der abhängigen Variable.

Mittels Post-hoc-t-Tests für unabhängige Stichproben wurden Mittelwertsunterschiede der Testergebnisse zwischen den Gruppen näher untersucht. Mittels Post-hoc-t-Tests für abhängige Stichproben wurden vorhandene Trainingseffekte innerhalb einer Altersgruppe näher beleuchtet.

2.5.3 Korrelationen

Mittels Korrelationen nach Bravais-Pearson wurden Zusammenhänge von fluider Intelligenz und dem n-back-Level sowie den anderen kognitiven Fähigkeiten untersucht. Um einzuschätzen, ob es sich um einen bedeutsamen Zusammenhang handelte, wurde die Stärke des Effektes mit angegeben. Dabei stellt der Korrelationskoeffizient r selbst ein Maß für die Effektstärke dar ($r = ,10$ gering, $r = ,30$ mittel, $r = ,50$ groß).

2.5.4 Regressionen

Mittels hierarchisch angeordneter multipler linearer Regressionsanalysen wurde berechnet, ob ein Zusammenhang zwischen mehreren unabhängigen und einer abhängigen Variable bestand. Prädiktoren (unabhängige Variablen) sollten jeweils für das maximal erreichte n-back-Level (abhängige Variable), den RSPM- (abhängige Variable) und LPS3-Zugewinn (abhängige Variable) ermittelt werden.

3 ERGEBNISSE

3.1 Probandenkollektiv

15 junge und 16 ältere gesunde Probanden wurden in die Studie eingeschlossen. Die Altersgruppen unterschieden sich nicht bezüglich Geschlecht, Migrationshintergrund und den Ergebnissen im Mini Mental Status Test (MMST) vor dem Training. Die jüngeren Probanden wiesen mehr Bildungsjahre auf als die älteren Probanden.

	Junge Probanden	Ältere Probanden	Gruppenunterschiede
Alter	25,93 [$\pm 1,94$] / 24-30	65,19 [$\pm 4,10$] / 60-72	$t(29) = -34,38$; $p = ,000$
Geschlecht (m/w)	6/ 9	6/ 10	$\chi^2(1) = 0,020$; $p = ,886$
Migration (ja/nein)	1/ 14	1/ 15	$\chi^2(1) = 0,002$; $p = ,962$
Bildungsjahre ¹	17,40 [$\pm 0,71$] / 16-19	15,78 [$\pm 2,19$] / 12-19	$t(29) = 2,80$; $p = ,012$
MMST	29,93 [$\pm 0,07$] / 29-30	29,69 [$\pm 0,15$] / 28-30	$t(29) = 1,49$; $p = ,151$

Tab. 4: Probandenmerkmale

¹ Bildungsjahre = Schuljahre + höchst qualifizierende Weiterbildung (Studium oder Ausbildung) in Regelzeit.

3.2 Arbeitsgedächtnistraining

3.2.1 Level

Im Verlauf des Trainings nahm das mittlere erreichte n-back-Level zu. Die jungen Probanden erreichten im Mittel Level 12 (0-, 3-, 4-back, ISI 1600), während die älteren Probanden im Mittel in das Level 6 (0-, 2-, 3-back, ISI 1800) gelangten (siehe Tabelle 5)¹. Dabei war die Performanz innerhalb der Gruppen sehr unterschiedlich, wie die große Spanne am Ende des Trainings zeigt (siehe Tabelle 5). Der schwächste junge Proband trainierte ein 3-back-Level und der stärkste

¹ Nicht normalverteilt in Sitzung 1: Level (*jung*: $p = ,002$; *älter*: $p = ,000$) und Trefferquote (*älter*: $p = ,005$)

Nicht normalverteilt in Sitzung 12: Level (*älter*: $p = ,034$) und Fehlerquote (*jung*: $p = ,015$)

Fehlende Varianzhomogenität in Sitzung 1 bei der Fehlerquote

junge Proband ein 5-back-Level. Bei den älteren Probanden absolvierten knapp 70% (n = 11) die 0-, 1-, 2- back- Bedingung erfolgreich in allen Geschwindigkeitsstufen. Sie erreichten das sechste Level mit der neuen 3-back-Bedingung durchschnittlich nach acht Sitzungen. Nur vier ältere Probanden (60 - 61 Jahre) absolvierten ein Level mit einer 3-back-Bedingung erfolgreich. Level 11 (4-back) war das höchste Level, das von einem älteren Probanden erreicht wurde. Dieser Proband erreichte bereits in der ersten Sitzung das dritte Level. Die vier schwächsten Probanden (61, 67, 69 und 71 Jahre) erreichten im gesamten Training nur das dritte Level und benötigten für einen Levelaufstieg mindestens fünf Sitzungen.

Ergebnisse der Varianzanalyse des n-back-Trainings:

Haupteffekt für Training [F (1,29) = 267,621, **p = ,000**, partial $\eta^2 = ,902$]

Haupteffekt für Gruppe [F (1,29) = 34,947, **p = ,000**, partial $\eta^2 = ,546$]

Training*Gruppen-Interaktion [F (1,29) = 40,814, **p = ,000**, partial $\eta^2 = ,585$]

Nach dem vierwöchigen n-back-Training kam es in beiden Altersgruppen zu signifikanten Levelanstiegen (*jung und alt: p = ,000*). Die Levelanstiege in den Gruppen waren jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Bereits ab Sitzung 2 unterschieden sich die trainierten Level beider Gruppen signifikant voneinander (**p = ,000**) (siehe Abbildung 6). Als Qualitätskontrolle für das Trainingsparadigma zeigt Tabelle 5 auch die Treffer- und Fehlerquote zu Beginn und am Ende des Trainings. Die Trefferquote lag zwischen 91- 97%. Die Fehlerquote lag bei durchschnittlich ein bis zwei Fehlern. Das Training war weder zu leicht noch zu schwer.

Sitzung 1	Jung	Älter	Gruppenunterschiede
Level ¹	1,31 [± 0,55] / 1- 3	1,13 [± 0,39] / 1- 3	t(29) = 1,62; p = ,116
Trefferquote [%]	97,14 [± 9,10] / 20- 100	93,21 [± 14,70] / 20- 100	t(29) = 2,44; p = ,021
Fehlerquote [%]	0,54 [± 1,94] / 0- 13	2,08 [± 4,59] / 0- 27	t(29) = -6,50; p = ,000
Sitzung 12			
Level ¹	11,67 [± 3,12] / 7- 19	5,75 [± 2,12] / 2- 11	t(29) = 6,04; p = ,000
Trefferquote [%]	93,30 [±14,06] / 33- 100	91,49 [±16,26] / 20- 100	t (29) = 1,21; p = ,234
Fehlerquote [%]	0,62 [± 2,23] / 0- 20	1,67 [± 3,73] / 0- 27	t(29) = -3,52; p = ,000

Tab. 5: Deskriptive Daten des n-back-Trainings

¹ mittleres trainiertes Level pro Sitzung (jede Sitzung umfasst drei Durchläufe)

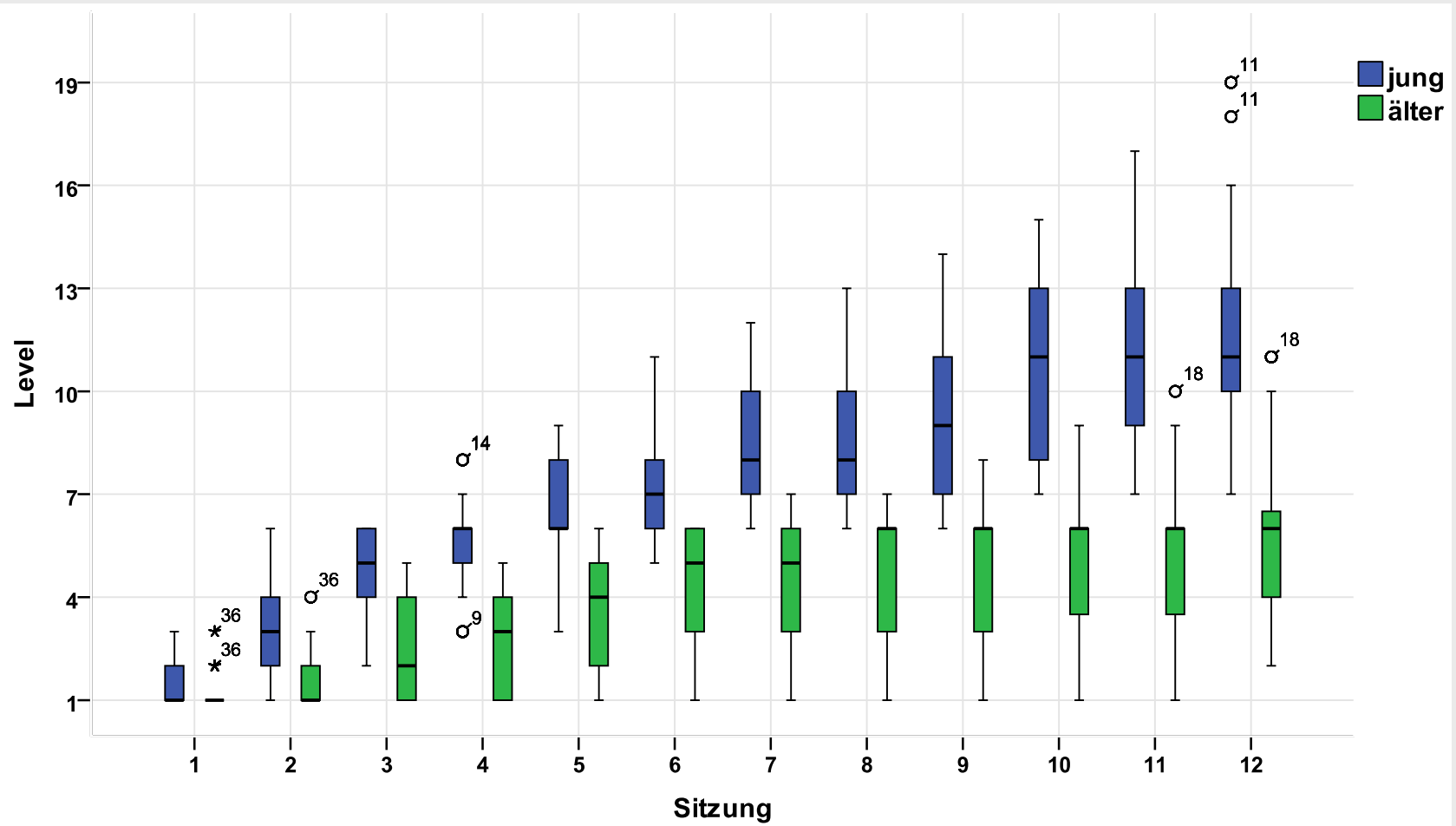


Abb. 6: Trainierte n-back-Level pro Sitzung im Verlauf des Trainings

3.2.2 Durchläufe je Level

Wie bereits in Kapitel 2.3.1.3 erläutert, sollte mit der Variable „benötigte Durchläufe pro Level“ auch der Einfluss der zunehmenden Geschwindigkeit (kürzere Interstimulusintervalle) auf die n-back-Performanz untersucht werden. Abbildung 7 demonstriert, wie viele Durchläufe die Gruppe der jungen und die Gruppe der älteren Probanden bis zum erfolgreichen Absolvieren eines Levels benötigten. Dabei fällt auf, dass sich die Anzahl der Probanden in beiden Gruppen mit zunehmendem Level verringert. Dies liegt daran, dass die Probanden im Laufe des Trainings unterschiedliche Level erreichten. In der Gruppe der älteren Erwachsenen erreichten vier Probanden nicht das fünfte Level. Das Training war so konzipiert, dass sich das Interstimulusintervall von maximal 1800 ms (Level 1) in 200 ms Schritten bis auf 1000 ms (Level 5) reduzierte. Um der Fragestellung, welchen Einfluss die Geschwindigkeit auf die Performanz hat, nachgehen zu können, mussten mindestens fünf Level miteinander verglichen werden. Die älteren Probanden, die Level 5 nicht erreichten, wurden daher von dieser Berechnung ausgeschlossen, so dass die Fallzahl der älteren Probanden bei $n = 12$ lag. Die in der Berechnung verbliebenen älteren Probanden benötigten weniger Durchläufe in den ersten drei Leveln als in Abbildung 7 demonstriert [*Level 1*: 5,17; *Level 2*: 2,08; *Level 3*: 2,67]².

Beide Gruppen konnten trotz zunehmender Geschwindigkeit die Anzahl der benötigten Durchläufe von Level 1 zu Level 2 signifikant reduzieren [*älter*: $t(11) = 2,83$, $p = ,016$; *jünger*: $t(14) = 2,16$, $p = ,048$]. Ab einem Interstimulusintervall von 1400 ms waren keine weiteren signifikanten Änderungen mehr erkennbar. Im Gegenteil zeigte sich, wie in Abbildung 7 erkennbar, eine erneute Zunahme der benötigten Durchläufe ab Level 4 (ältere Probanden) bzw. Level 5 (jüngere Probanden). Es fanden sich signifikante Mittelwertsunterschiede der benötigten Durchläufe zwischen den Gruppen in Level 1 [$t(25) = 2,59$, $p = ,016$], in Level 4 [$t(25) = 2,89$, $p = ,008$] und in Level 5 [$t(25) = 2,32$, $p = ,029$].

² Die Variable "benötigte Durchläufe pro Level" war nicht normalverteilt (Level 1 und 4) und auch eine Varianzhomogenität fehlte (Level 1 - 5). Dennoch wurden t-Tests durchgeführt (siehe Kapitel 2.5.2 und 4.2).

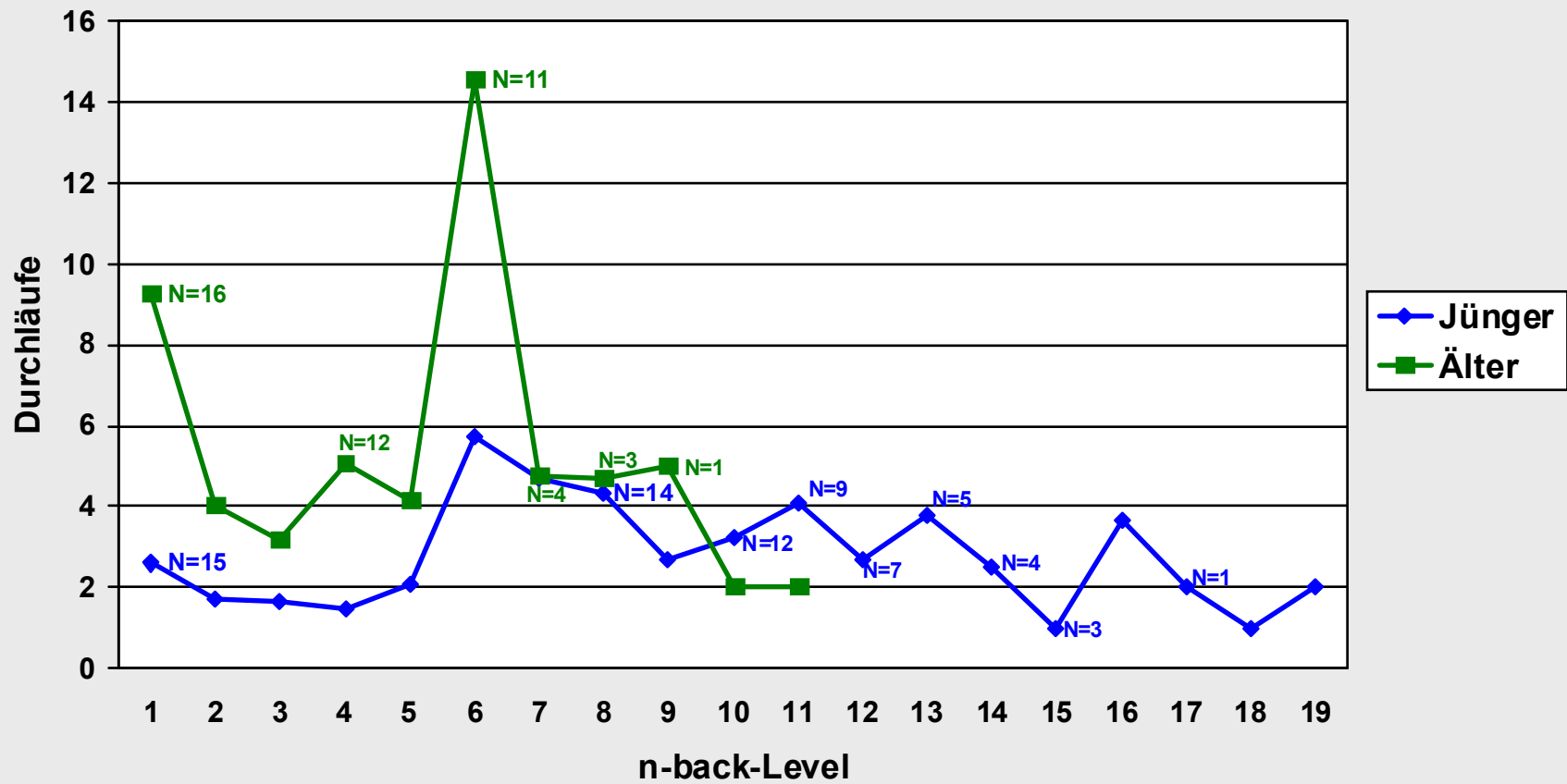


Abb. 7: Im Mittel benötigte Durchläufe pro n-back-Level

Die abnehmende Probandenanzahl (N) erklärt sich aus den fehlenden Levelaufstiegen mancher Probanden. Wo kein N angegeben ist, gilt der vorhergehende Wert.

3.3 Neuropsychologische Tests

3.3.1 Ergebnisse zu t1

Die Ergebnisse der einzelnen neuropsychologischen Tests zum Messzeitpunkt t1 sind in Tabelle 6 für jede Gruppe aufgelistet³. Bereits vor dem Training konnten die jungen Probanden in den Tests zur fluiden Intelligenz (RSPM und LPS3) und zur Verarbeitungsgeschwindigkeit (Zahlen-Symbol-Test und Zahlenverbindungstest Teil A und Teil B) mehr korrekte Lösungen erzielen als die älteren Probanden. Der Gruppenunterschied war in diesen Tests bereits zu t1 signifikant. In allen weiteren Tests gab es keine signifikanten Gruppenunterschiede.

Messzeitpunkt t1			
Tests ¹	Jung	Älter	Gruppenunterschiede
RSPM	22,20 [± 3,65] / 12 - 27	17,38 [± 3,69] / 11 - 23	t (29) = 3,66; p =,001
LPS3	24,93 [± 2, 73] / 20 - 29	19,19 [± 3,67] / 12 - 24	t (28) = 4,80; p =,000
MWTB	31,73 [± 2,55] / 28 - 36	34,06 [± 2,29] / 27 - 37	t(29) = -2,68 ; p =,012
ZSV	9,40 [± 1,45] / 7 - 12	10,38 [± 1,45] / 7 - 12	t (29) = -1,87; p =,072
ZSR	8,93 [± 1,71] / 6 - 12	9,38 [± 2,25] / 5 - 12	t (29) = -0,61; p =,545
ZST	45,40 [± 7,11] / 36 - 59	33,63 [± 6,34] / 21 - 45	t (29) = 4,87; p =,000
ZVT-A ²	22,07 [± 6,28] / 14 - 35	31,06 [± 7,32] / 21 - 53	t(29) = -3,66 ; p =,001
ZVT-B ²	48,67 [± 14,21] / 33 - 74	69,38 [± 16,47] / 43- 100	t (29) = -3,74; p =,001
WFT-T	28,27 [± 8,03] / 16 - 50	28,00 [± 5,59] / 20 - 40	t (29) = 0,11; p =,915
WFT-B	17,60 [± 3,07] / 12 - 23	17,64 [± 4,19] / 9 - 26	t (29) = -0,03; p =,973

Tab. 6: Deskriptive Daten der Neuropsychologie vor dem Training und Gruppenunterschiede

Fett gedruckt sind signifikante Ergebnisse nach Bonferroni-Korrektur ($p/10 \leq ,005$).

¹ Falls nicht anders angegeben beschreiben die Mittelwerte die Anzahl korrekt gelöster Aufgaben

² Ergebnisparameter: Sekunden

³ Nicht normalverteilt: MWTB (älter: $p = ,015$) und Zahlenverbindungstest A (älter: $p = ,039$)

3.3.2 Ergebnisse zu t2 und t3

Die Ergebnisse der einzelnen neuropsychologischen Tests zu den Messzeitpunkten t2 und t3 sind in Tabelle 7 aufgelistet ⁴.

Nach einer Trainingswoche (Messzeitpunkt t2) konnten die jungen Probanden in den Tests zur fluiden Intelligenz (LPS3) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (ZST) weiterhin signifikant mehr korrekte Lösungen erzielen als die älteren Probanden. Es gab keinen signifikanten Gruppenunterschied in der Arbeitsgedächtnisleistung zu t2.

Auch am Ende des vierwöchigen Trainings (Messzeitpunkt t3) blieben die signifikanten Gruppenunterschiede im Bereich fluide Intelligenz (LPS3 und RSPM) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (ZST, ZVT-A und ZVT-B) bestehen. Die jungen Probanden lösten mehr Aufgaben korrekt bzw. in kürzerer Zeit. In den anderen kognitiven Bereichen gab es keine signifikanten Gruppenunterschiede.

In der jüngeren Probandengruppe kam es zu signifikanten Leistungssteigerungen in allen kognitiven Bereichen [*LPS3*: $t(13) = -5,23$, $p = ,000$; *ZSR*: $t(14) = -3,90$, $p = ,002$; *ZST*: $t(14) = -5,96$, $p = ,000$, *ZVT-A*: $t(14) = 3,99$, $p = ,001$, *WFT-B*: $t(14) = -8,23$, $p = ,000$]. Durch die Bonferroni-Korrektur mit Adjustierung des Signifikanzniveaus auf $p = ,005$ konnten weitere Leistungssteigerungen nicht mehr als signifikant eingestuft werden (*RSPM*: $p = ,011$; *ZSV*: $p = ,010$; *ZVT-B*: $p = ,029$; *WFT-T*: $p = ,012$).

In der älteren Probandengruppe fand sich eine signifikante Leistungssteigerung im Bereich Verarbeitungsgeschwindigkeitstest [*ZST*: $t(15) = -5,77$, $p = ,000$]. Die Leistungssteigerung im *LPS3* ($p = ,010$), in der *ZSV* ($p = ,007$) und in der *ZSR* ($p = ,043$) wurden aufgrund der Bonferroni-Korrektur ebenfalls als nicht signifikant gewertet.

⁴ Nicht normalverteilt zu t2: *LPS3* (*älter*: $p = ,031$), *ZSR* (*älter*: $p = ,002$)

Nicht normalverteilt zu t3: *RAPM* (*jung*: $p = ,046$), *ZSV* (*jung*: $p = ,006$; *älter*: $p = ,001$), *ZSR* (*älter*: $p = ,012$)

Fehlende Varianzhomogenität zu t3: *ZVT-A* ($p = ,000$) und *B* ($p = ,041$). In Hartleys F_{\max} -Test ergaben sich jedoch sowohl für den *ZVT-A*, als auch *-B* Werte von $F < 10$, so dass keine Änderung des α -Fehlers vorgenommen werden musste.

Messzeitpunkt t2

Tests ¹	Jung	Älter	Gruppenunterschiede
LPS3	28,93[± 2,79] / 25 - 35	20,25 [± 3,84] / 13 -25	t (28) = 6,99; p =,000
ZSV	9,73 [± 1,62] / 6 - 12	10,56 [± 1,21] / 8 - 12	t (29) = -1,62; p =,116
ZSR	9,13 [± 2,10] / 6 - 12	9,50 [± 2,20] / 5 - 12	t (29) = -0,48; p =,638
ZST	49,87 [± 7,35] / 37 - 64	35,00 [± 6,12] / 24 -45	t (29) = 6,14; p =,000

Messzeitpunkt t3

RSPM	24,53 [± 2,90] / 17-28	17,44 [± 3,54] / 13-27	t (29) = 6,08; p =,000
LPS3	30,71 [± 4,32] / 24-40	21,56 [± 2,53] / 17-25	t (28) = 7,19; p =,000
MWTB	32,40 [± 2,56] / 28-36	34,06 [± 2,21] / 28-37	t (29) = -1,94; p =,062
ZSV	10,40 [± 1,18] / 8-12	11,06 [± 1,18] / 8-12	t (29) = -1,56; p =,130
ZSR	10,40 [± 1,59] / 6-12	10,19 [± 1,72] / 6-12	t (29) = 0,36; p =,724
ZST	54,80 [± 8,02] / 39-74	37,81 [± 5,46] / 28-50	t (29) = 6,94; p =,000
ZVT-A ²	17,73[± 3,45] / 12-26	34,06 [± 9,91] / 21-50	t (29) = -6,20; p =,000
ZVT-B ²	40,27 [± 11,33] / 22-66	69,06 [± 20,89] /49-120	t (29) = -4,81; p =,000
WFT-T	33,13 [± 7,20] / 17-42	28,00 [± 5,61] / 20-45	t (29) = 2,22; p =,034
WFT-B	21,82 [± 3,22] / 16-27	18,81 [± 4,48] / 14-31	t (29) = 2,13; p =,042

Tab. 7: Deskriptive Daten der Neuropsychologie während und nach dem Training sowie Gruppenunterschiede

Fett gedruckt sind signifikante Ergebnisse nach Bonferroni-Korrektur ($p/10 \leq ,005$)

¹ Die Mittelwerte beziehen sich auf die Anzahl korrekt gelöster Aufgaben

² Ergebnisparameter: Sekunden

3.3.3 Auswertung der einzelnen Tests

Fluide Intelligenz (Gf)

Es wurden zwei Tests zur fluiden Intelligenz (RSPM und LPS3) in dieser Studie angewandt.

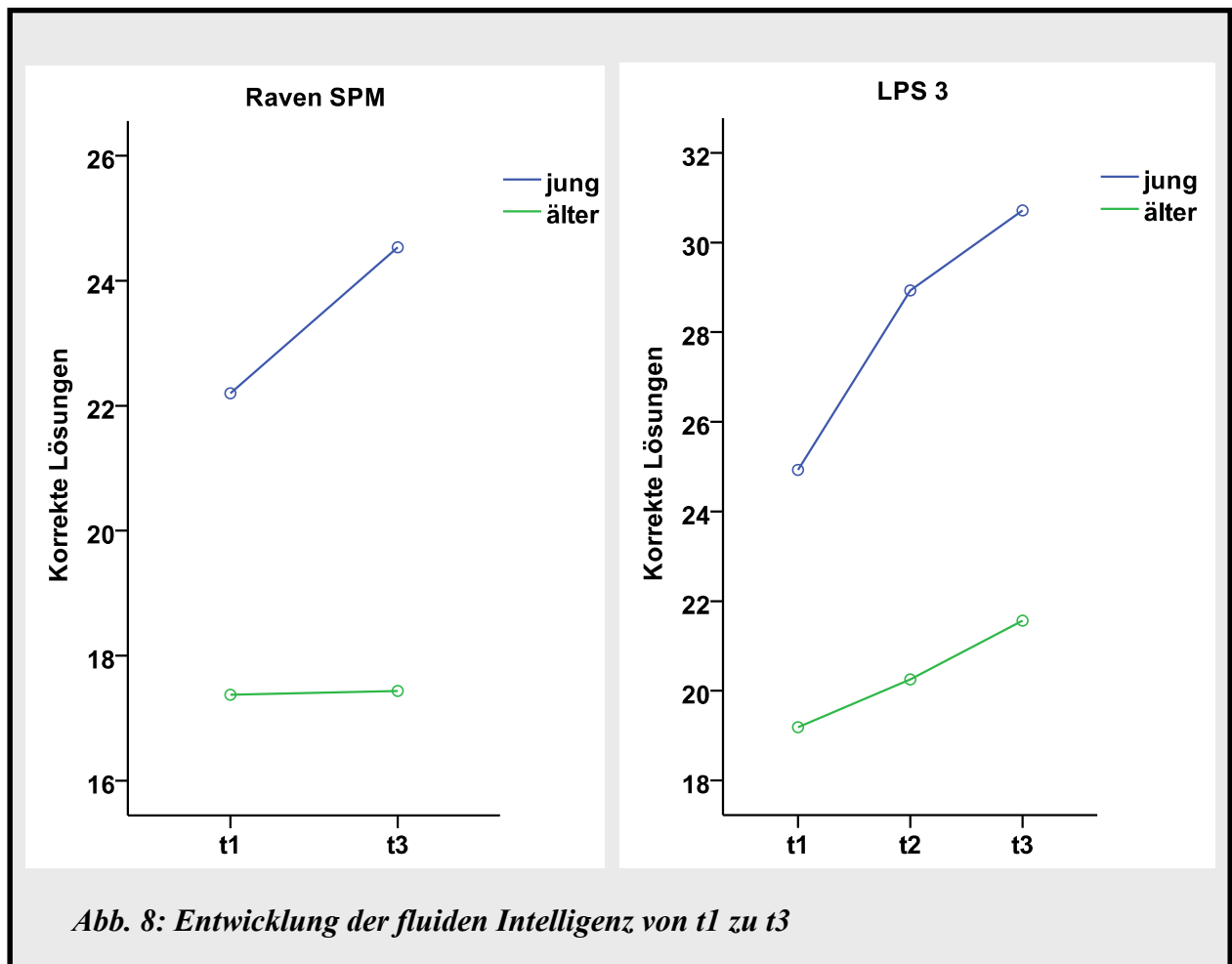
Ergebnisse der Varianzanalyse des RSPM:

Haupteffekt für Training [$F(1,29) = 3,04, p = ,092, \text{partial } \eta^2 = ,095$]

Haupteffekt für Gruppe [$F(1,29) = 32,98, p = ,000, \text{partial } \eta^2 = ,532$]

Training * Gruppen-Interaktion [$F(1,29) = 2,73, p = ,109, \text{partial } \eta^2 = ,086$]

Im **RSPM** konnte sich keine Gruppe signifikant verbessern. Der Leistungszugewinn der jungen Probanden ($p = ,011$) war nach Adjustierung des Signifikanzniveaus auf $p = ,005$ als nicht signifikant zu werten. Es bestand ein deutlicher Gruppenunterschied vor (t_1) und nach dem Training (t_3) (siehe Tabelle 6 und 7). Abbildung 8 zeigt, dass das Leistungsniveau der jungen Probanden in beiden Gf-Tests insgesamt über dem Niveau der älteren Probanden lag.



Ergebnisse der Varianzanalyse des LPS3:

Haupteffekt für Training [F (1,4 ; 40,5) = 30,03, **p = ,000**, partial $\eta^2 = ,518$]⁵

Haupteffekt für Gruppe [F (1,28) = 53,50, **p = ,000**, partial $\eta^2 = ,656$]

Training * Gruppen-Interaktion [F (1,4; 40,5) = 6,04, **p = ,010**, partial $\eta^2 = ,177$]

Im **LPS3** konnte ein signifikanter Leistungszugewinn und ein signifikanter Gruppenunterschied festgestellt werden. Während die jungen Probanden die Anzahl korrekter Lösungen im LPS3 bereits zu t2 [t (13) = - 6,27, **p = ,000**] signifikant steigern konnten, war dies bei den älteren Probanden zu t2 (**p = ,052**) nicht der Fall. Auch die Leistungssteigerung der älteren Probanden zu t3 (**p = ,010**) konnte nach Bonferroni-Korrektur nicht als signifikant gewertet werden. Die unterschiedliche Leistungssteigerung der Gruppen reichte nicht für eine signifikante Training * Gruppen-Interaktion. Der Gruppenunterschied war zu allen drei Messzeitpunkten hochsignifikant (siehe Tabelle 6 und 7). Abbildung 8 demonstriert, dass sich das Leistungsniveau der Gruppen im Laufe des Trainings zunehmend mehr unterschied.

Zusammenfassend lösten die jungen Probanden im RSPM und LPS3 zu allen Messzeitpunkten mehr Aufgaben richtig als die älteren Probanden, so dass sich signifikante Gruppenunterschiede ergaben. Eine signifikante Leistungssteigerung nach nur einer Woche zeigte sich im LPS3 bei den jungen Probanden.

Kristalline Intelligenz

Die älteren Probanden lösten im **MWTB** sowohl vor als auch nach dem Training mehr Aufgaben richtig als die jungen Probanden (siehe Tabelle 6 und 7). Für einen signifikanten Gruppenunterschied reichten die Ergebnisse jedoch nicht aus [F (1,29) = 5,72, **p = ,023**, partial $\eta^2 = ,165$]. Keine der beiden Gruppen konnte ihre Leistung im Bereich der kristallinen Intelligenz durch das Training signifikant steigern.

⁵ Bei diesen Ergebnissen wurde bereits eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser vorgenommen. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, das bei Verletzung der Voraussetzung der Sphärizität (Mauchly- $W(2) = ,618$, **p = ,001**) angewandt wird.

Verarbeitungsgeschwindigkeit

Ergebnisse der Varianzanalyse des Zahlen-Symbol-Tests:

Haupteffekt für Training [F (2,58) = 35,46, **p** = ,000, partial η^2 = ,550]

Haupteffekt für Gruppe [F (1,29) = 42,05, **p** = ,000, partial η^2 = ,592]

Training * Gruppen-Interaktion [F (2,58) = 5,25, **p** = ,008, partial η^2 = ,153]

Im **Zahlen-Symbol-Test (ZST)** kam es zu einem signifikanten Leistungszugewinn und einem signifikanten Gruppenunterschied. Die jungen Probanden konnten ihre Leistung bereits nach einer Woche signifikant steigern [t (14) = - 3,32, **p** = ,005], während die älteren Probanden erst nach vier Wochen einen signifikanten (**p** = ,000) Zugewinn erzielen konnten. Da am Ende des Trainings beide Gruppen ihre Leistung steigern konnten, ergab sich keine signifikante Training * Gruppen-Interaktion.

Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Zahlenverbindungstests:

Haupteffekt für Gruppe Teil A [F (1,29) = 36,55, **p** = ,000, partial η^2 = ,558]

Haupteffekt für Gruppe Teil B [F (1,29) = 23,69, **p** = ,000, partial η^2 = ,450]

In den **Zahlenverbindungstests Teil A und B (ZVT-A und ZVT-B)** waren die jungen Probanden zu beiden Messzeitpunkten (t1 und t3) schneller als die älteren Probanden (siehe Tabelle 6 und 7 sowie Abbildung 9). Es kam zu signifikanten Gruppenunterschieden in beiden Tests. Es fanden sich keine signifikanten Haupteffekte für Training. Nur die jungen Probanden konnten im Zahlenverbindungstest Teil A ihre Leistung signifikant steigern [t (14) = 3,99, **p** = ,001]. In Teil B konnten sich die jungen Probanden nicht verbessern (**p** = ,029). Die älteren Probanden verbesserten sich weder in Teil A (**p** = ,291) noch in Teil B (**p** = ,945). Die Training * Gruppen-Interaktion erreichte in keinem Test das Signifikanzniveau.

Zusammenfassend zeigten die jungen Probanden im Vergleich zu den älteren Probanden eine schnellere Verarbeitungsgeschwindigkeit. Bereits am Ausgangspunkt waren sie in allen drei Aufgaben zur Verarbeitungsgeschwindigkeit schneller und blieben dies auch zu den anderen Messzeitpunkten. Des Weiteren steigerten sie ihre Geschwindigkeit schneller als die älteren Probanden im Zahlen-Symbol-Test bzw. auch in einem weiteren Test, dem Zahlenverbindungstest Teil A.

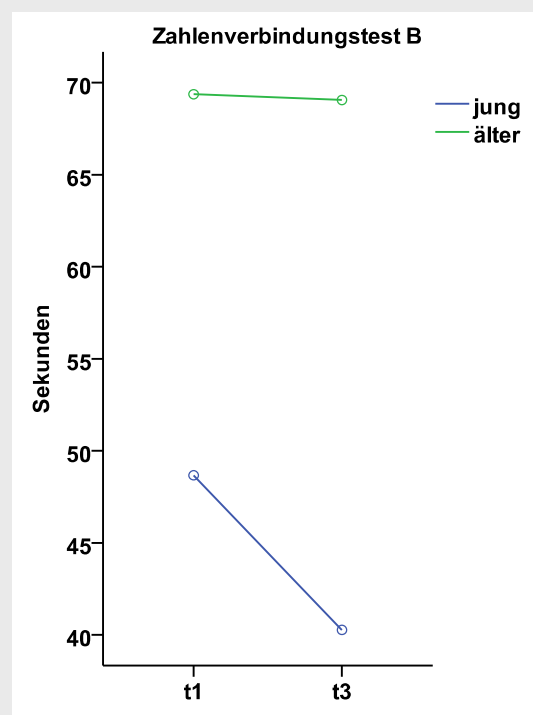
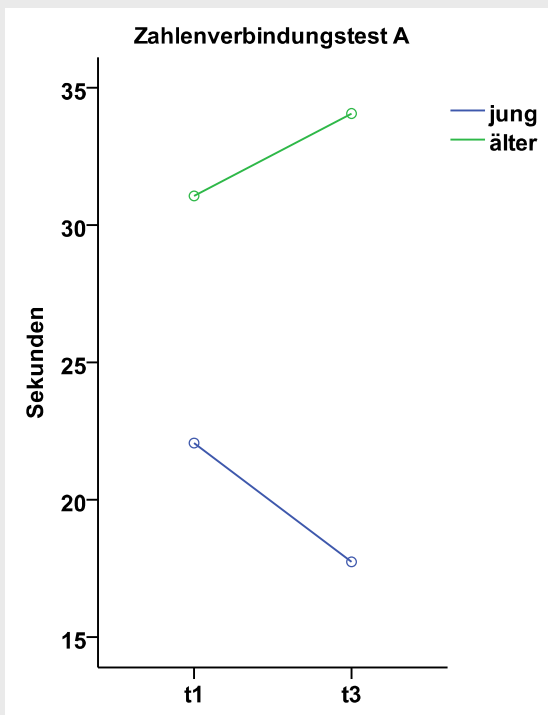
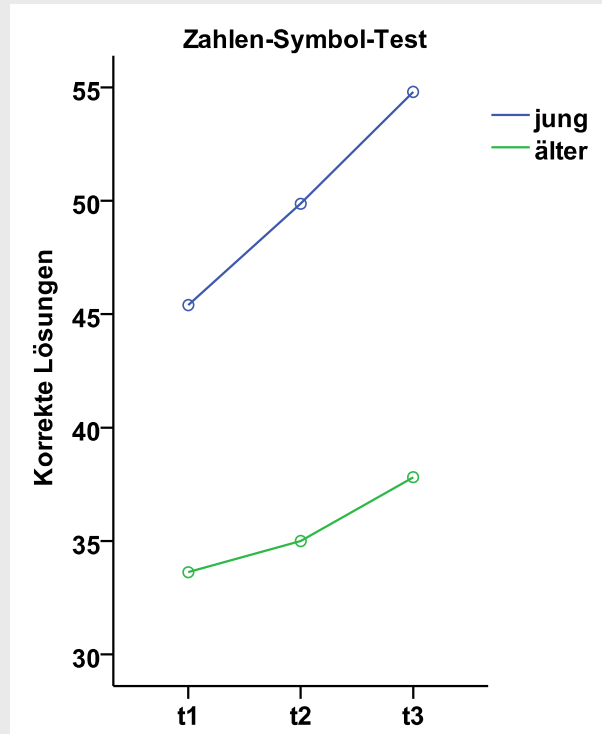


Abb. 9: Entwicklung der Verarbeitungsgeschwindigkeit von t1 zu t3

Arbeits-/Kurzzeitgedächtnis

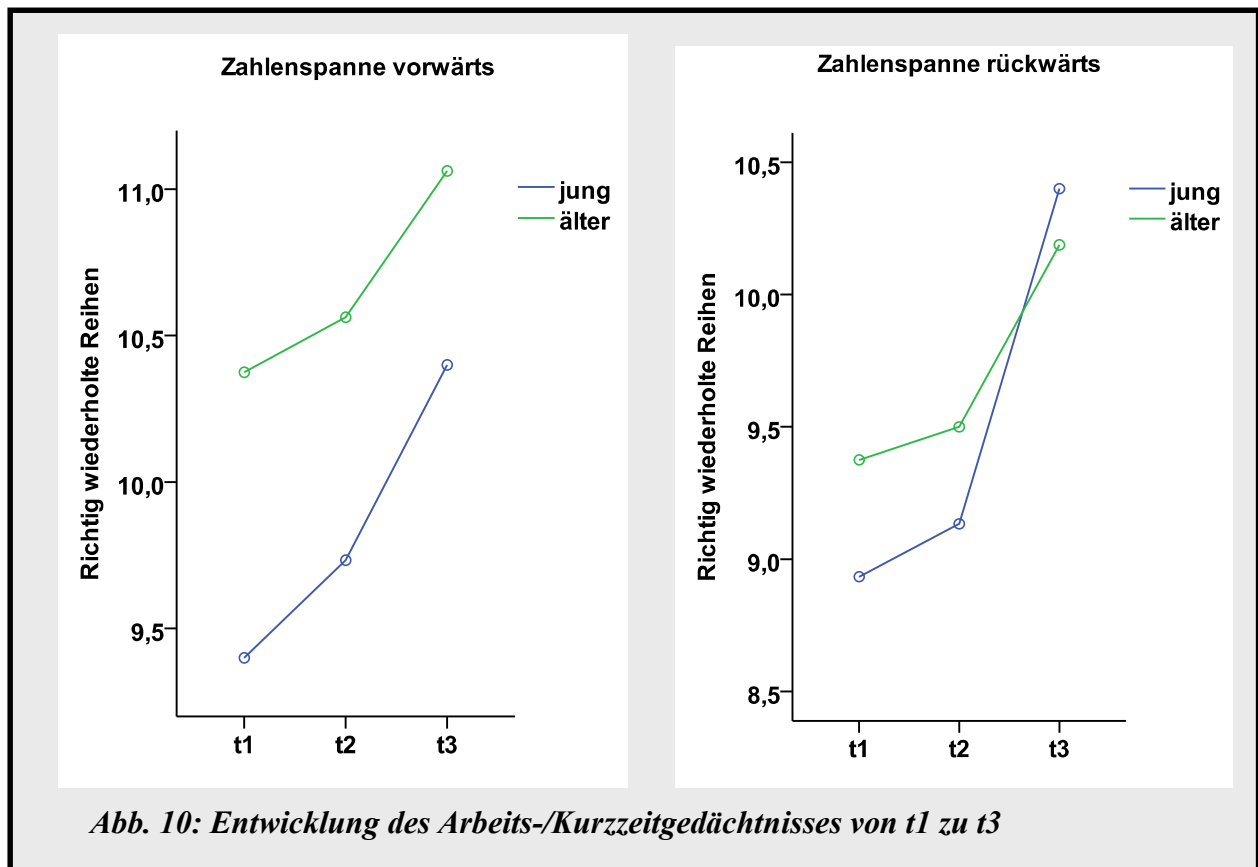
Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Zahlenspannen (ZSV und ZSR):

Haupteffekt für Training ZSV [$F(2,58) = 8,78$, $p = ,000$, partial $\eta^2 = ,232$]

Haupteffekt für Training ZSR [$F(2,58) = 11,72$, $p = ,000$, partial $\eta^2 = ,288$]

In den **Zahlenspannen vorwärts (ZSV) und rückwärts (ZSR)** gab es signifikante Haupteffekte für Training. Bei genauerer Betrachtung konnten jedoch nur die jungen Probanden ihre Leistung in der Zahlenspanne rückwärts am Ende des Trainings (t3) signifikant verbessern [$t(14) = -3,90$, $p = ,002$]. Die restlichen Zugewinne innerhalb der Gruppen konnten aufgrund der Bonferroni-Korrektur nicht mehr als signifikant gewertet werden (*ZSV jung*: $p = ,010$; *ZSV alt*: $p = ,007$; *ZSR alt*: $p = ,043$). Abbildung 10 demonstriert, dass, anders als bei den Gf- und VG-Tests, bei den Zahlenspannen das Leistungsniveau der älteren über dem der jungen Probanden lag. Einen signifikanten Gruppenunterschied gab es nicht.

Zusammenfassend konnten die älteren Probanden vor dem Training mehr Zahlenspannen korrekt wiedergeben als die jungen Probanden. Durch eine größere und signifikante Leistungssteigerung der jungen Probanden in der Zahlenspanne rückwärts erinnerten sie sich am Ende des Trainings im Vergleich zu den älteren Probanden an mehr Zahlenspannen korrekt.



Exekutive

Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Wortflüssigkeitstests (WFT-B und WFT-T):

Haupteffekt für Training im WFT-B [F (1,29) = 38,12, **p** = ,000, partial η^2 = ,568]

Training * Gruppen-Interaktion im WFT-B [F (1,29) = 12,26, **p** = ,002, partial η^2 = ,297]

In den **Wortflüssigkeitstests (WFT-T und WFT-B)** unterschieden sich die jungen und älteren Probanden in ihrer Ausgangsperformanz nicht (siehe Tabelle 6). In der Kategorie Buchstaben kam es zu einem signifikanten Haupteffekt für Training, der auf einer Leistungssteigerung der jungen Probanden beruhte [t (14) = -8,23, **p** = ,000]. Die Älteren steigerten sich nicht (p = ,114), so dass es ebenfalls zu einer signifikanten Training*Gruppen-Interaktion kam. In der Kategorie Tiere konnte keine der beiden Gruppen ihre Leistung signifikant steigern. Auch der Gruppenunterschied am Ende des Trainings war nicht signifikant [t-Test: *Tiere*: p = ,034; *Buchstaben*: p = ,042].

Zusammenfassend starteten beide Gruppen mit ähnlicher Ausgangsperformanz in den Exekutiv-Tests. Im Vergleich zu den älteren Probanden konnten die jungen Probanden ihre Leistung im Wortflüssigkeitstest Kategorie Buchstaben signifikant steigern.

3.4 Einflüsse auf die fluide Intelligenz

3.4.1 Fluide Intelligenz und das maximal erreichte n-back-Level

Es wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen dem erreichten n-back-Level und dem LPS3 bzw. RSPM am Ende des Trainings bestand. Das Alpha-Signifikanzniveau wurde dabei nach Bonferroni auf $0,05/2$ Gf-Tests = 0,025 korrigiert.

Das maximal erreichte n-back-Level und der RSPM korrelierten bei den jüngeren Probanden signifikant [r = ,58, **p** = ,023]. Der Korrelationskoeffizient von ,58 entspricht einem starken Effekt. Bei den Älteren korrelierten n-back und RSPM nicht [r = ,33, p = ,208].

Das maximal erreichte n-back-Level und der LPS3 korrelierten bei den älteren Probanden signifikant [r = ,556, **p** = ,025]. Der Korrelationskoeffizient von ,556 entspricht einem starken Effekt. Bei den jungen Probanden zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang [r = ,143, p = ,626, n = 14].

Fluide Intelligenz bei schlechten n-back-Performern: In der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass eine schlechte n-back-Performanz mit einem größeren Gf-Zugewinn einhergehen

kann [92]. In der aktuellen Arbeit liegen kleine Stichproben ($n = 15$ und $n = 16$) vor. Unterteilt man die Altersgruppen weiter in gute und schlechte n-back-Performer, sind die Gruppengrößen so klein, dass hier lediglich Tendenzen aufgezeigt werden sollen. Bei den älteren Probanden wurde als schwache Performanz gewertet, wenn Level 6 (3-back) nicht erreicht wurde ($n = 5$). Bei den jungen Probanden war es eine schwache Performanz, wenn Level 11 (4-back) nicht erreicht wurde ($n = 6$).

Die schwachen n-back-Performer beider Altersgruppen zeigten im Mittel in beiden Gf-Tests zu t_1 und t_3 eine schwächere Gf-Performanz als die starken n-back-Performer.

In Hinsicht auf die Zugewinne konnten schwache ältere n-back-Performer im LPS3 einen Anstieg an korrekten Lösungen von 30% [$SD \pm 25,90$]/ Spanne 6-64 versus 8,9% [$SD \pm 16,44$]/ Spanne -10-35 erzielen. Im RSPM zeigte sich ein Zugewinn von 18,7% [$SD \pm 45,55$]/ Spanne - 26 - 92 versus - 1,6% [$SD \pm 24,64$]/ Spanne - 21 - 64. Bei den jungen Probanden zeigte sich kein großer Performanzunterschied: LPS3 25% Zugewinn (schlechte Performer) versus 23% (gute Performer) und im RSPM 13% Zugewinn (schlechte Performer) versus 12% (gute Performer). Signifikante Ergebnisse ergaben sich innerhalb der Gruppen nicht.

Zusammengefasst korrelieren hohe n-back-Level mit einer hohen fluiden Intelligenz am Ende des Trainings. Es scheint, dass bei den älteren Probanden eine schwache n-back-Performanz mit größeren Zugewinnen in fluiden Intelligenz einhergehen könnte.

3.4.2 Fluide Intelligenz und die Verarbeitungsgeschwindigkeit

Es wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen dem LPS3 und den Verarbeitungsgeschwindigkeitstests (Zahlen-Symbol-Test, Zahlenverbindungstest Teil A und Teil B) am Ende des Trainings bestand. Dazu wurde das Alpha-Signifikanzniveau nach Bonferroni auf $0,05/3$ VG-Tests = $0,016$ korrigiert. Es zeigte sich lediglich ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem LPS3 und dem Zahlenverbindungstest Teil A bei den älteren Probanden [$r = - ,592$, $p = ,016$, $n = 16$]. Eine schnellere Bearbeitung im Zahlenverbindungstest ging einher mit mehr korrekten Lösungen im LPS3. Hierbei handelt es sich um einen starken Effekt. Beim RSPM erfolgte ebenfalls eine Korrelation mit den Verarbeitungsgeschwindigkeitstests. Ein zunächst signifikanter Effekt zwischen dem RSPM und dem Zahlen-Symbol-Test bei den jüngeren Probanden [$r = ,592$, $p = ,020$, $n = 15$] war nach Bonferroni-Korrektur nicht mehr signifikant.

3.4.3 Fluide Intelligenz und das Arbeitsgedächtnis/Kurzzeitgedächtnis bzw. die Exekutive

Zu keinem Zeitpunkt und für keine Gruppe fanden sich signifikante Korrelationen.

3.5 Prädiktoren für das n-back-Level und die fluide Intelligenz

3.5.1 N-back-Level

In einer hierarchischen Regression wurde getrennt für jede Gruppe nach dem Einfluss des Alters (Block 1), der Gf-Performanz zu t1 (Block 2) und der VG-Performanz zu t1 (Block 3) auf den Trainingserfolg geschaut. Im Vorfeld wurde durch Korrelation bereits ausgeschlossen, dass der Bildungsgrad Einfluss auf den Trainingserfolg hatte.

Bei den **jungen Probanden** war keine der zuvor genannten Variablen ein geeigneter Prädiktor für das maximal erreichte n-back-Level.

Bei den **älteren Probanden** eigneten sich das Alter und die LPS3 Performanz zu t1 als Prädiktoren für den Trainingserfolg. 27 % der Varianz des maximal erreichten n-back-Levels waren auf das Alter [korrigiertes $R^2 = ,271$, $p = ,022$] und weitere 51% der Varianz auf die Gf-Tests zu t1 [korrigiertes $R^2 = ,785$, Änderung in $F (2, 12) = 17,75$, $p = ,000$] zurückzuführen. Dabei trug nahezu ausschließlich der LPS3 t1 [$\beta = ,565$; $p = ,008$] zur Varianzerklärung bei (siehe auch Abbildung 11). Die VG-Performanz zu t1 konnte keine weitere Varianz erklären. Eine Alterszunahme von einem Jahr bei den älteren Probanden führte zu einer Reduktion des maximal erreichten n-back-Levels um $-,296$. Jeder zusätzliche Ergebnispunkt im LPS3 zu t1 führte zu einer Erhöhung des maximal erreichten n-back-Levels um $+,333$.

3.5.2 Fluide Intelligenz

In einer weiteren hierarchischen Regressionsanalyse wurde nach den Einflussfaktoren auf den Gf-Zugewinn gesucht. Getrennt für jede Gruppe wurden folgende Einflussfaktoren (Blöcke) betrachtet: Alter, n-back-Level, LPS3 zu t1, RSPM zu t1 und VG-Performanz zu t1. Der stärkste Einflussfaktor wurde als Block 1 (jeweils der Gf-Test zu t1 beim Gf-Zugewinn derselben Aufgabe) definiert.

Prädiktoren für den Zugewinn im RSPM: Die multiple Regressionsanalyse zeigte, dass in beiden Altersgruppen nur die Ausgangsperformanz im RSPM Einfluss auf den RSPM-Zugewinn hatte. Damit konnten in beiden Gruppen 36% der Varianz erklärt werden [*jung*: korrigiertes $R^2 = ,358$,

Änderung in $F(1, 12) = 8,263$, Sign. Änderung in $F = ,014$; *alt*: korrigiertes $R^2 = ,356$, Änderung in $F(1, 14) = 9,306$, Sign. Änderung in $F = ,009$]. Je schlechter die RSPM Ausgangsperformanz (*jung*: $\beta = -1,047$; *alt*: $\beta = -1,027$), desto größer war der RSPM-Zugewinn.

Prädiktoren für den Zugewinn im LPS3: Beim LPS3 zeigte sich in der multiplen Regressionsanalyse nur für die älteren Probanden ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Ausgangsperformanz und dem Zugewinn im LPS3. Die Variable LPS3 zu t1 alleinklärte 51% der Varianz des LPS3-Zugewinns [korrigiertes $R^2 = ,513$, Änderung in $F(1, 14) = 16,791$, Sign. Änderung in $F = ,001$]. Auch hier galt, je schlechter die LPS3 Ausgangsperformanz ($\beta = -,863$), desto größer war der LPS3-Zugewinn. Bei den jungen Probanden fand sich dieser Zusammenhang für den LPS3 nicht [korrigiertes $R^2 = -,010$, Änderung in $F(1, 12) = ,872$, Sign. Änderung in $F = ,369$].

Zusammengefasst konnte der Trainingserfolg (n-back-Level) nur bei den älteren Probanden anhand des Alters und der LPS3-Ausgangsperformanz vorhergesagt werden. Der Zugewinn in fluiden Intelligenz konnte anhand der Ausgangsperformanz im RSPM (beide Gruppen) bzw. LPS3 (*alt*) vorhergesagt werden. Je schlechter die Ausgangsperformanz, desto größer der Zugewinn.

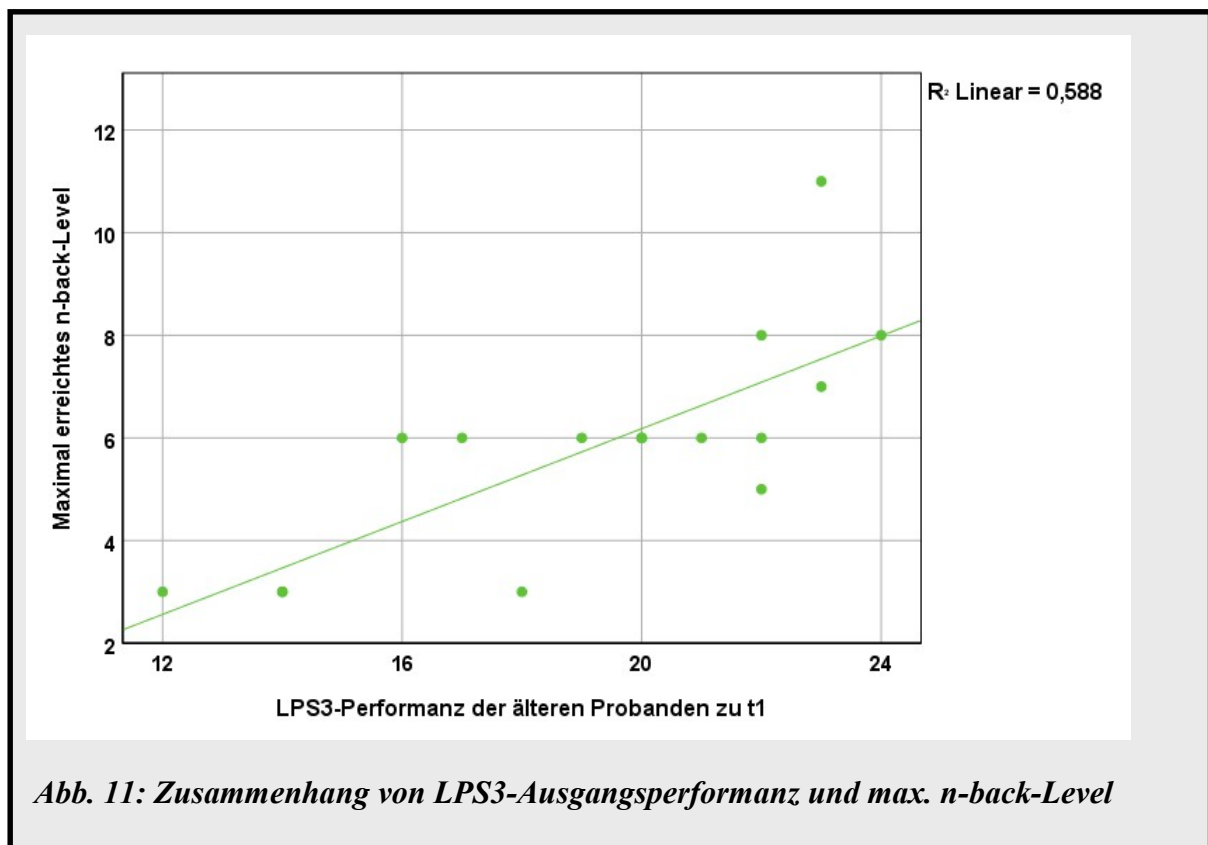


Abb. 11: Zusammenhang von LPS3-Ausgangsperformanz und max. n-back-Level

4 DISKUSSION

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch das vierwöchige n-back-Training konnten beide Altersgruppen ihre Arbeitsgedächtniskapazität signifikant steigern. Die jungen Probanden erreichten im Mittel Level 12 (4-back) und die älteren Probanden im Mittel Level 6 (3-back). In der Gruppe der älteren Probanden waren die Anfang 60-jährigen am erfolgreichsten. Im Bereich der fluiden Intelligenz und Verarbeitungsgeschwindigkeit war die Leistung der jungen Probanden in allen Tests zu allen Zeitpunkten signifikant besser. Nach dem Training zeigten sich bei den jungen Probanden Zugewinne im LPS3 (fluide Intelligenz), im Zahlen-Symbol-Test und Zahlenverbindungstest (Verarbeitungsgeschwindigkeit), dazu in der Zahlenspanne rückwärts (Arbeitsgedächtnis) und im Wortflüssigkeitstest - Kategorie Buchstaben (Exekutive). Bei den älteren Probanden zeigte sich ein signifikanter Zugewinn im Zahlen-Symbol-Test. Der Unterschied bei diesem Test war, dass der signifikante Effekt bei den jungen Probanden bereits zum Zeitpunkt t2 auftrat, während er sich bei den älteren Probanden erst ab t3 zeigte. Erfolgreiches Training (hohes n-back-Level) korrelierte mit hoher fluider Intelligenz nach dem Training (jung: RSPM, alt: LPS3). Die größten Zugewinne in der fluiden Intelligenz erreichten die Probanden mit schwacher Ausgangsperformanz (alt: RSPM und LPS3; jung: RSPM). Prädiktoren für den Trainingserfolg gab es nur bei den älteren Probanden. Hier eigneten sich das Alter und die LPS3-Ausgangsperformanz.

4.2 Diskussion der statistischen Auswertung

Bonferroni-Korrektur: Werden an einem Datensatz mehrere zusammenhängende Hypothesen getestet, spricht man von multiplen Vergleichen bzw. multiple testing. In diesem Fall kann es zu einer Alphafehler-Kumulierung kommen, welche für einige Tests fälschlicherweise signifikante Ergebnisse liefert. Um diesen Fehler zu vermeiden, kann eine Bonferroni-Korrektur vorgenommen werden. Dazu wird das übliche Signifikanzniveau $\alpha = ,05$ durch die Anzahl der Tests dividiert. Diese Methode ist zwar konservativ, wird jedoch häufig angewandt. In der Literatur zum kognitiven Training ist die Korrektur jedoch umstritten [127]. Laut Schwarb habe Jaeggi [69] in ihrer Studie keine Bonferroni-Korrektur durchgeführt [127]. Es wird argumentiert, dass eine Korrektur nicht erforderlich sei, wenn primär nach einem Outcome gesucht werde und die anderen Ergebnisse von nachrangiger Bedeutung seien [128]. In dieser Studie wurden die

Effekte eines Arbeitsgedächtnistrainings auf mehrere kognitive Bereiche (fluide und kristalline Intelligenz, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtnis und Exekutive) untersucht, so dass eine Bonferroni-Korrektur vorgenommen wurde. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass unter Umständen eine Überkorrektur stattfindet und signifikante Ergebnisse übersehen werden. Der Vorteil ist, dass es sehr unwahrscheinlich ist, falsch positive, d.h. falsch signifikante Ergebnisse zu erhalten.

Parametrische Testverfahren: Bei nicht vorhandener Normalverteilung bzw. Varianzhomogenität sollten im Allgemeinen nichtparametrische Testverfahren eingesetzt werden. Die Stichproben dieser Studie waren relativ klein mit einmal 15 (jung) und einmal 16 (alt) Probanden. Daher wurden die oben genannten Voraussetzungen zum Teil nicht erfüllt (siehe Fußnoten im jeweiligen Ergebnisteil). Dennoch wurden parametrische Tests durchgeführt. Dieses Vorgehen wird damit begründet, dass nichtparametrische Tests oft nur einfache Analysen erlauben und weniger teststark sind. Die ANOVA und auch t-Tests sollen robust gegenüber Verletzungen der Annahme der Normalverteilung sein [129]. Es sei nicht ratsam bei Verletzung der Normalverteilung, aber auch bei Verletzung der Varianzhomogenität sofort ein anderes - eventuell weniger teststarkes- Verfahren zu nutzen, vor allem, wenn die Stichproben gleich groß seien [130].

4.3 Interpretation der Ergebnisse

4.3.1 Arbeitsgedächtnistraining

Trainingsverlauf: Das Erreichen hoher n-back-Level war für ein erfolgreiches Training nicht zwingend erforderlich. Ziel der Studie war ein Arbeitsgedächtnistraining an der individuellen Arbeitsgedächtniskapazitätsgrenze. Diese Grenze schien sich bei den **älteren Probanden** auf einem sehr unterschiedlichen Niveau zu befinden, wie die große Spanne (Level 2 bis 11) am Ende des Trainings zeigt. Um den Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit auf die n-back-Performanz zu untersuchen, wurden die Interstimulusintervalle von 1800 ms bis auf 1000 ms schrittweise reduziert. Die Geschwindigkeit beeinflusste die Performanz der älteren Probanden scheinbar erst ab einem Interstimulusintervall von 1200 ms (zum ersten Mal in Level 4) relevant, was sich an einem Anstieg der benötigten Durchläufe für dieses Level zeigte. Das fortgesetzte n-back-Training bewirkte jedoch, dass viele ältere Probanden zu einem späteren Zeitpunkt auch in dieser Geschwindigkeit erfolgreich ihre Arbeitsgedächtnisleistung abrufen konnten und damit ins Level 5 aufstiegen. In Level 6 hatten die Probanden dann wieder viel Zeit

(Interstimulusintervalle von 1800 ms), allerdings auch eine neue 3-back-Bedingung. Nur noch die Hälfte der älteren Probanden konnte das 3-back erfolgreich erlernen. Es zeigte sich also in Level 6 eine Art Performanzplateau, welches die individuelle Grenze der Arbeitsgedächtniskapazität darstellen, aber auch auf eine eingeschränkte Plastizität hinweisen könnte.

Auch bei den **jungen Probanden** zeigte sich eine große Spanne der maximal erreichten Level (Level 7 bis 19). Die Geschwindigkeit des Paradigmas schien ab einem Interstimulusintervall von 1000 ms (Level 5) relevanten Einfluss auszuüben, was ebenfalls am Anstieg der benötigten Durchläufe festgemacht wurde. Alle jungen Probanden konnten Level 5 durch weiteres Training erfolgreich absolvieren. Auch neue n-back-Bedingungen führten initial zu einem Anstieg der benötigten Durchläufe, aber es zeigte sich kein Plateau.

Gruppenvergleich: Es bestand ein hoch signifikanter Gruppenunterschied in Hinsicht auf die trainierten n-back-Level. Beide Gruppen konnten ihre Verarbeitungsgeschwindigkeit steigern, d.h. Level mit kürzerem Interstimulusintervall konnten trotz Schwierigkeiten (Anstieg der Durchläufe) durch Training überwunden werden. Die jüngeren Probanden konnten ihre Arbeitsgedächtniskapazität scheinbar während des gesamten Trainings erweitern (kein Performanzplateau). Bei den älteren Probanden kam es ebenfalls zu einem signifikanten Trainingseffekt. Dennoch bleibt offen, ob das Performanzplateau einiger älterer Probanden gegen Ende des Trainings als eingeschränkte Plastizität oder als langsamer Trainingsprozess ohne bislang messbaren Erfolgsparameter (Levelaufstieg) interpretiert werden muss.

Vergleich mit anderen Studien: Jaeggi trainierte 2008 junge gesunde Erwachsene erfolgreich mit einem dualen n-back-Paradigma und erzeugte dabei Transfer auf fluide Intelligenz [69]. Es folgten viele vergleichbare Studien, die unabhängig vom Alter Trainingseffekte, d.h. eine Zunahme der Arbeitsgedächtniskapazität erzeugen konnten [73, 95, 96, 98, 102, 132]. Die Ergebnisse dieser Studie decken sich mit der Literatur, da sich signifikante Trainingseffekte in beiden Gruppen fanden. Die Kapazität zum Lernen scheint bis ins höhere Erwachsenenalter erhalten zu sein.

Methodenkritik: Förderlich für das Generieren von Transfereffekten seien laut Takeushi [80] ein geeignetes Trainingsparadigma, Adaptation an das Können des Probanden, eine bestimmte Trainingsdauer, Variabilität der Trainingsaufgabe, Motivation des Probanden und ein gewisser Zeitabstand vor und nach dem Training. Diese Studie erfüllt die ersten fünf Punkte. Lediglich ein Follow-up fehlt. Im Folgenden sollen einige Punkte des Trainings kritisch beleuchtet werden.

Punkt 1: Einfaches n-back

Obwohl die meisten vergleichbaren Studien duale n-back-Paradigma nutzten, wurde ein einfaches n-back angewandt. Laut Jaeggi erzeugen einfache und duale Paradigmen eine ähnliche neuronale Aktivierung und ähnliche Transfereffekte auf fluide Intelligenz [85, 100]. Die Trainingseffekte seien beim einfachen n-back zwar geringer [100], dafür eigne sich das einfache n-back auch für ein älteres Probandenkollektiv [85]. Nachteile des dualen Trainings seien zudem das Training mehrerer Arbeitsgedächtnisdomänen und damit unterschiedlicher Hirnregionen [133], was die Interpretation von Transfereffekten erschwere. Das einfache n-back-Paradigma scheint daher für diese Studie gut gewählt gewesen zu sein.

Punkt 2: Interstimulusintervall

Die meisten n-back-Trainingsstudien verwendeten -unabhängig vom Alter der Probanden- fixe Präsentationszeiten von 500 ms [69, 88, 90, 92-94, 99, 102, 134] und ein fixes Interstimulusintervall von 2500 ms [69, 88-90, 92-94, 99, 102, 134]. Alternativ wurden längere Präsentationszeiten von 1000 - 2000 ms mit kürzeren Interstimulusintervallen von 500 ms kombiniert [87]. In dieser Studie erfolgte -soweit bekannt- zum ersten Mal in einem Arbeitsgedächtnistraining die Kombination einer fixen Präsentationszeit von 500 ms mit schwierigkeitsadaptierten Interstimulusintervallen von 1000 bis 1800 ms. Ein ähnliches Procedere wandte nur Takeushi [135] an, dessen Ziel es war, die Verarbeitungsgeschwindigkeit von jungen Probanden zu trainieren. Verarbeitungsgeschwindigkeit beeinflusst maßgeblich die Arbeitsgedächtnisleistung und fluide Intelligenz. Das Training dieser Studie war unter anderem auf eine Zunahme der Verarbeitungsgeschwindigkeit und damit Arbeitsgedächtniseffektivität ausgelegt. Während die Interstimulusintervalle dieser Studie für die jüngeren Probanden unproblematisch waren (alle jungen Probanden konnten Level 1-5 erfolgreich absolvieren), waren sie für einige ältere Probanden scheinbar zu kurz (5 Probanden konnten nicht alle Interstimulusintervall-Stufen, d.h. Level 1 bis 5 erfolgreich absolvieren). Sie trainierten möglicherweise ihre Verarbeitungsgeschwindigkeit mehr als ihre Arbeitsgedächtniskapazität. Diese Theorie war bei sehr kleiner Gruppengröße ($n = 5$) nicht zuverlässig statistisch auswertbar. Tendenziell kann nur gesagt werden, dass schwache n-back-Performer zumeist auch in den Tests zum Arbeitsgedächtnis und zur Verarbeitungsgeschwindigkeit schlechter abschnitten. Eine generelle Verlagerung des Trainings von Arbeitsgedächtniskapazität zu Verarbeitungsgeschwindigkeit bei den schwachen älteren Probanden scheint nicht stattgefunden zu haben.

Punkt 3: Wahl des n-back

0-back als Konstante aller Level erforderte Aufmerksamkeit [108]. Ab 1-back waren das Kurzzeitgedächtnis und das Arbeitsgedächtnis involviert. Es gibt Autoren, die behaupten, dass n-back erst bei „n“ größer 1 zu einer „echten“ Arbeitsgedächtnisaufgabe wird, da kombiniertes Speichern und Verarbeiten von Informationen abverlangt werden, und die Leistung im höheren n-back-Bereich mit Intelligenz korreliert [136]. Für andere Autoren gehören Aufmerksamkeitskontrolle, Kapazität und Langzeitgedächtnis essentiell zur Funktion des Arbeitgedächtnisses dazu, erklären die Verbindung zur fluiden Intelligenz und sind daher wichtiger Bestandteil eines Arbeitsgedächtnistrainings [137]. In dieser Studie konnten auch für die schwachen n-back-Performer, welche nur 0-, 1-, und 2-back trainierten, Zugewinne in der fluiden Intelligenz gefunden werden, so dass es sich um ein effektives Training gehandelt haben muss.

Punkt 4: Adaptation

In n-back-Studien erfolgt die Adaptation im Allgemeinen über die Treffer- oder Fehlerquote. Zum Beispiel führte bei Lawlor-Savage eine Performanz < 85% zum Abstieg [99], bei Redick und Chooi < 70%, während eine Performanz > 90% zum Aufstieg führte [88, 90]. Da in dieser Studie progressiv trainiert wurde, d.h. nur Aufstiege möglich waren, wurden 80% als Grenze genommen. Bei diesem Wert waren weder Zufalls- noch Ceiling-Effekte zu befürchten. Das progressive Design erwies sich allerdings für manche ältere Probanden als demotivierend, denn erreichten sie ein Level, mit dem sie Schwierigkeiten hatten, kam es zur konstanten Überforderung. Für zukünftige Studien wäre ein adaptives Training mit einer schnelleren Bewertung (z.B. nach jeder Einheit, d.h. 1 x 0-,1-,2-back) anhand der Fehlerquote sinnvoll. Studien, die anhand der Fehlerquote adaptierten, zeigten häufiger Transfereffekte auf fluide Intelligenz [69, 85, 87, 89, 92-94]. Eine schnellere Evaluation der Performanz sorgt für mehr Motivation und für ein Training näher an der individuellen Arbeitsgedächtniskapazitätsgrenze [69, 85].

Punkt 5: Motivation

In Studien zum Lernen und zur Neuroplastizität konnte gezeigt werden, dass Motivation, Engagement und Spaß wichtige Faktoren für das Outcome eines Trainings sind [68, 138]. Persönlich empfundener Stress wirkt sich negativ auf den Trainingserfolg aus [94]. In dieser Studie erfolgte keine schriftliche Dokumentation über die Motivation der Probanden. Einige ältere Probanden bekundeten während des Trainings die Sinnlosigkeit des weiteren Trainings

oder den zunehmenden Widerwillen gegen das Paradigma. 0-back und 1-back wurden als unnötige und langweilige Teile des Trainings angesehen und 3-back wirkte für einige ältere Probanden wie ein unüberwindbares Hindernis. Externe Motivation scheint dennoch nicht zwangsläufig mit besseren Trainingsergebnissen einher zu gehen [92]. Lawlor-Savage [99] schlug für zukünftige Studien vor, die Probanden kontinuierlich nach Empfinden der Schwierigkeit des aktuellen Trainings und ihrer persönlichen Motivation zu fragen, um dessen Auswirkung auf das Training besser verstehen zu können.

Zusammenfassung n-back-Training: Hypothese 1 (siehe Kapitel 1.9.) kann bestätigt werden. Das progressive einfache n-back-Paradigma erzeugte innerhalb von vier Wochen signifikante Trainingseffekte in beiden Altersgruppen bei ebenfalls bestehenden und erwarteten signifikanten Gruppenunterschieden zum Vorteil der jungen Probanden. Insgesamt erreichten die älteren Probanden niedrigere n-back-Level und benötigten mehr Zeit für einen Levelaufstieg. In der älteren Probandengruppe waren es die jüngeren unter ihnen (ca. 60 Jahre), die in höhere Level gelangten. Möglicherweise zeigt sich hier eine zunehmend eingeschränkte Plastizität im Alter bei insgesamt erhaltener Kapazität zum Lernen. In der bestehenden Literatur zu Arbeitsgedächtnisstudien und ihren Transfereffekten auf fluide Intelligenz gibt es bislang -soweit bekannt- keine vergleichbare Studie, die ein n-back-Training mit über 60-Jährigen durchführte. Auch einmalig ist bislang die Adaptation sowohl über das „n“ als auch über das Interstimulusintervall, mit dem Ziel die Arbeitsgedächtniskapazität bzw. Verarbeitungsgeschwindigkeit (Arbeitsgedächtniseffektivität) zu trainieren. Das Arbeitsgedächtnis, die Verarbeitungsgeschwindigkeit und fluide Intelligenz aktivieren ähnliche neuronale Strukturen (dlPFC), so dass es in Hinsicht auf den Effekt auf die fluide Intelligenz irrelevant sein sollte, ob verstärkt die Kapazität oder Geschwindigkeit trainiert wurde.

4.3.2 Untrainierte Aufgaben

4.3.2.1 Aufgaben zur fluiden und kristallinen Intelligenz

Ausgangssituation: Wie im Rahmen der Intelligenzentwicklung nicht anders zu erwarten, zeigten die jungen Probanden bereits vor Beginn des Trainings eine signifikant bessere Leistung im Bereich der fluiden Intelligenz (RSPM und LPS3). Im Bereich der kristallinen Intelligenz (MWTB) gab es keinen signifikanten Altersunterschied.

Trainingsverlauf und Gruppenunterschiede: Ein Zugewinn im Bereich der fluiden Intelligenz zeigte sich bei den jungen Probanden im LPS3. Dieser Zugewinn stellte sich bereits nach einer

Trainingswoche (t2) ein. Bei den älteren Probanden zeigte sich kein Zugewinn. Die Leistung der jungen Probanden war in beiden Gf-Tests und zu allen Zeitpunkten signifikant besser. Im Bereich der kristallinen Intelligenz kam es nicht zu signifikanten Trainingseffekten oder Gruppenunterschieden.

Vergleich mit anderen Studien: Es gibt zahlreiche Studien, die sowohl im jüngeren als auch höheren Erwachsenenalter durch ein Arbeitsgedächtnistraining Transfereffekte auf fluide Intelligenz generieren konnten.

Studien mit jungen Probanden verwendeten häufig n-back als Trainingsaufgabe. Jaeggi [69, 85], Jaušovec [87], Rudebeck [89] und Stephenson [93] konnten bei jungen Probanden Transfereffekte auf fluide Intelligenz feststellen. Im Kontrast dazu stehen Studien von Redick [90], Chooi [88], Thompson [92] und Minear [94], die keine Effekte auf fluide Intelligenz feststellen konnten. Als Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse konnten weder das Durchschnittsalter der Probanden (20 bis 22 Jahre), die Trainingsdauer (4 - 13,3 h), das Trainingsprogramm (einfaches oder duales n-back), noch die Transferaufgabe (RAPM oder RSPM) dienen. Auch die Zeit, die für das Bearbeiten einer Matrize im RAPM (6 - 88 Sekunden) eingeräumt wurde, schien irrelevant für den Transfererfolg. Für den RSPM wurden 30 - 45 Sekunden pro Matrize eingeräumt [90, 94]. Im Kontrast dazu wurde den Probanden dieser Studie nur 15 Sekunden für eine Matrize gegeben. Auffällig ist, dass die Studien von Jaušovec, Rudebeck und Stephenson mit Transfereffekten auf fluide Intelligenz [87, 89, 93] keine Parallelversionen ihrer Transferaufgabe nutzten. Es ist bekannt, dass Test-Re-Test-Verbesserungen beim RAPM bei 0 - 8% liegen [139]. Dennoch wurden Test-Re-Test-Verzerrungen nur anhand einer passiven Kontrollgruppe ausgeschlossen. Als problematisch bei dieser Form der Berechnung von Effekten erwies sich dabei, dass sich häufig die Kontrollgruppe verschlechterte und nicht die Interventionsgruppe verbesserte, so dass vermeintlich signifikante Zugewinne entstanden.

Auch in dieser Studie verbesserten sich die jungen Probanden nur in dem Gf-Test ohne Parallelversion, dem LPS3. Es ist daher bei fehlender Kontrollgruppe leider nicht auszuschließen, dass es sich um Test-Re-Test-Effekte handeln könnte. In der Trainingsliteratur gibt es - soweit bekannt - bislang keine Studie, die den LPS3 anwandte, so dass kein direkter Ergebnisvergleich möglich ist.

Anders sieht es beim RSPM aus. Zinke [73], Schweizer [86], Redick [90], Minear [94] und Brehmer [97] verwendeten den RSPM als Transferaufgabe. Sie trainierten junge Probanden im

Alter von durchschnittlich 20 bis 26 Jahren (Ausnahme Zinke: > 70 jährige) mit einem dualen n-back (Ausnahme Brehmer: verbale und nonverbale AG-Aufgaben). Nur Schweizer fand signifikante Transfereffekte auf den RSPM. Sie nutzte Parallelversionen von je 30 Matrizen (Angaben zur Zeitvorgabe fehlten), so dass die entstandenen Effekte tatsächlich auf einem Transfereffekt beruhen dürften. Trotz sehr ähnlichem Studiendesign mit Parallelversionen des RSPM fanden Minear (30 Sek. pro Matrize) und Redick (45 Sek. pro Matrize) keine Transfereffekte auf fluide Intelligenz. Ob Brehmer jeweils für ihre 18 Matrizen eine Zeitbeschränkung vorgenommen hat, bleibt unklar.

Auch in dieser Studie wurden Parallelversionen des RSPM angewandt (15 Sek. pro Matrize). Die knappe Zeitvorgabe sollte Ceiling-Effekte bei den jungen Probanden verhindern. Aufgrund der Bonferroni-Adjustierung konnte der Zugewinn im RSPM ($p = ,011$) bei den jungen Probanden nicht mehr als signifikant gewertet werden.

Sollte es sich beim LPS-Zugewinn um "wahre" Effekte auf fluide Intelligenz gehandelt haben, stellt sich die Frage, warum es keine Effekte beim RSPM zu verzeichnen gibt. Um fluide Intelligenz anzuwenden, bedarf es Ruhe und Konzentration. Eine knappe Zeitvorgabe erzeugt Zeitdruck, der dazu führen kann, dass schwere Matrizen nicht mit genügend Geduld bearbeitet werden. Einige Matrizen können bereits durch visuelle Wahrnehmung gelöst werden, während für andere analytisches Denken benötigt wird. Ohne intensivere Auseinandersetzung mit einer schweren Matrize ist diese nicht lösbar. Schon Moody [103] kritisierte, dass die Gf-Transferaufgabe nicht zeitbeschränkt sein sollte, da fluide Intelligenz so kaum angewandt werden könne. Jaeggi [85] erwiderte jedoch, dass alle Aufgaben im Raven Gf-loaded seien und somit eine Zeitbeschränkung möglich sei. Wie bereits oben erwähnt, sollten mit der knappen Zeitvorgabe Ceiling-Effekte bei den jungen Probanden vermieden werden. Betrachtet man die Summe der durch die jungen Probanden bearbeiteten Matrizen ($t1: 25,73$ und $t3: 29,07$ Matrizen), war die Zeitbeschränkung gut gewählt.

Eine andere Erklärungsmöglichkeit für den fehlenden Zugewinn im RSPM ist, dass die Gf-Aufgaben unterschiedlicher sind als gedacht. Obwohl sowohl im LPS3 als auch im RSPM Gesetzmäßigkeiten von geometrischen Figuren erkannt werden müssen, unterscheiden sie sich in ihrer Komplexität. Im LPS3 müssen bis zu zwei Gesetzmäßigkeiten erkannt werden (z.B. +/- ein Symbol und die Ausrichtung des Symbols), während es im RSPM bis zu drei sein können (z.B. geometrische Form, Anzahl und Ausrichtung). Im LPS3 muss nur ein Fehler erkannt werden. Im RSPM hingegen werden mehrere Antwortmöglichkeiten vorgegeben, aus denen die richtige Lösung herausgesucht werden muss. Sollte die Inhibitionsleistung im Alter tatsächlich schlechter

sein, dürften die falschen Lösungsvorschläge irritieren. Während sich die Aufgaben im LPS3 übersichtlich auf einem Din-A-4-Blatt befinden, besteht der RSPM aus einem kleinen Papierstapel mit einer Matrize pro Seite. Die Aufgaben im LPS3 werden von Zeile zu Zeile sukzessive schwerer, während sich im RSPM leichte und schwere Matrizen abwechseln. Zusammenfassend stellten die verwendeten Gf-Tests unterschiedlich hohe Ansprüche an die fluide Intelligenz, welches ursächlich für die unterschiedlichen Ergebnisse gewesen sein könnte. Stephenson [93], der in seinen Gf-Transferaufgaben ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse erzielte, vermutete, dass im n-back spezifische Eigenschaften trainiert würden, die sich nur in manchen Gf-Tests vorteilhaft auf die Performanz auswirkten. Auch Soveri [140] schlussfolgerte in ihrer Metaanalyse von 2017, dass Transfereffekte hauptsächlich durch selbst erworbene aufgabenspezifische Strategien getriggert werden.

In Studien mit älteren Probanden wurden häufig alternative Arbeitsgedächtnisaufgaben zum Trainieren verwendet. Wie schon bei den jüngeren Probanden waren die Ergebnisse in Hinsicht auf den Transfererfolg inhomogen. Erfolgreich war zum Beispiel Zinke [73], die ihre Ø 77-jährigen Probanden mit Arbeitsgedächtnisaufgaben zu jeder von Baddeleys formulierten Arbeitsgedächtnisdomänen trainierte. Sie nutzte den RSPM mit zwei Parallelversionen von je 18 Matrizen als Transferaufgabe. Welche Matrizen entfernt wurden, und ob es eine Zeitvorgabe gab, ist unbekannt. Brehmer nutzte dieselbe Transferaufgabe bei ihren Ø 64-jährigen nach einem Training mit verbalen und nonverbalen Arbeitsgedächtnisaufgaben und konnte keine Transfereffekte erzeugen. Borella [96, 98] trainierte in zwei Studien ebenfalls ältere Probanden (Ø 69 und Ø 70 bzw. 80 Jahre) zuerst mit einer verbalen und später mit einer visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe. Transfereffekte konnte er auf den Cattell nur in seiner ersten Studie finden. Initial wurde argumentiert, dass die Trainingsmodalität ursächlich für die unterschiedlichen Ergebnisse sein müsse. Eine neuere Metaanalyse von Soveri [140] ergab jedoch, dass die Trainingsmodalität irrelevant für Transfereffekte zu sein scheint.

Mit n-back bei älteren Probanden trainierte - soweit bekannt - nur Lawlor-Savage [99]. Sie nutzte ein duales n-back als Trainingsaufgabe bei mittelalten Probanden (Spanne: 30 – 60 Jahre). Nach insgesamt 6,5 Trainingsstunden fand sie weder Effekte auf den RAPM (66,6 Sek. pro Matrize), noch auf den Cattell. Dabei nutzte sie Parallelversionen. Im Vergleich erhielten die älteren Probanden dieser Arbeit nur 15 Sek. zum Lösen einer Matrize des RSPM, so dass ein deutlicher Zeitdruck erzeugt wurde. Die Probanden bearbeiteten durchschnittlich 22,75 Matrizen zu t1 und 23,69 Matrizen zu t3. Von einem Ceiling-Effekt waren die älteren Probanden weit entfernt. Es zeigten sich keine Zugewinne im RSPM. Auch im LPS3 kam es nicht zu einem

signifikanten Zugewinn nach Bonferroni-Korrektur. Entweder fand durch die Bonferroni-Korrektur eine „Überkorrektur“ statt, oder es konnten entgegen der initial aufgestellten Hypothese im Alter keine Zugewinne in fluiden Intelligenz durch ein Arbeitsgedächtnistraining generiert werden. Betrachtet man Zinkes Studie, dürfte das Alter der Probanden nicht ursächlich für den fehlenden Zugewinn gewesen sein.

Die inhomogenen Transferergebnisse bei jungen und älteren Probanden und die spärlichen n-back-Studien im höheren Alter machen weitere Studien notwendig. Dabei wären ein einheitliches Studiendesign, eine einheitliche statistische Auswertung und ein größeres Probandenkollektiv wünschenswert.

Methodenkritik:

Punkt 1: Anzahl der Gf-Tests:

Eine größere Anzahl an Gf-Tests hätte eine klarere Ergebnisinterpretation erlaubt, da sie Aufschluss darüber gegeben hätte, ob durch das n-back nur spezifische Fähigkeiten trainiert wurden. Mehr Tests hätten jedoch eine noch strengere Bonferroni-Korrektur nach sich gezogen, welche eventuell weitere signifikante Ergebnisse eliminiert hätte. Die Gesamtdauer der neuropsychologischen Testbatterie und damit die Konzentrationsspanne der Probanden wäre überstrapaziert worden. Alternativ hätte man Tests aus anderen kognitiven Bereichen entfernen, oder die Testbatterie auf mehrere Tage verteilen können [94].

Punkt 2: Auswahl der Aufgaben:

Der leichtere RSPM wurde genutzt, da in dieser Studie im Gegensatz zu vielen Kollegen, die den RAPM einsetzten, auch ältere Probanden trainiert wurden. Zugewinne im RSPM im Alter schienen möglich zu sein [73]. Der RSPM war auf nur 7,5 Minuten zeitbeschränkt, um Ceiling-Effekte bei den jungen Probanden zu vermeiden. Er erzeugte jedoch deutlichen Zeitdruck bei allen Probanden. Die älteren Probanden schafften es maximal 80% der Matrizen zu bearbeiten. Eine analytische Herangehensweise, die Ruhe und Konzentration erfordert, war damit kaum möglich. Wären die Matrizen - wie der LPS3 - sukzessive schwerer geworden, hätten sich die Probanden vermutlich mehr Zeit für schwere Matrizen genommen. Fluide Intelligenz hätte angewandt werden können. Der LPS3 schien ein geeigneter Test zu sein, um Zugewinne in fluiden Intelligenz in beiden Altersgruppen aufzuzeigen. Eine Parallelversion hätte die Frage nach Test-Re-Test-Verzerrungen klären können.

Zusammenfassung Gf-Zugewinne: Hypothese 2a (siehe Kapitel 1.9.) besagte, dass durch ein 4-wöchiges n-back-Training mit jungen und älteren Probanden mehr Lösungsstrategien in den Gf-

Tests gleichzeitig und schneller verfolgt werden können, und es daher zu Zugewinnen im LPS3 und RSPM kommen würde.

Ignoriert man die Bonferroni-Korrektur kann die Hypothese für die **jungen Probanden** bestätigt werden. Mit der Korrektur scheint sich nur im LPS3 ein signifikanter Zugewinn zu zeigen, welcher ohne Parallelversion auch auf Test-Re-Test-Verzerrungen zurückgeführt werden könnte. Möglicherweise war der LPS3 weniger komplex als der RSPM und damit leichter zu lösen. Ein weiterer Erklärungsversuch wäre, dass im Training ausschließlich spezifische Fähigkeiten erlernt wurden, die nur für das Lösen des LPS3 hilfreich waren. Zuletzt könnte auch durch einen zu großen Zeitdruck im RSPM verhindert worden sein, dass fluide Intelligenz angewandt wurde. In der Literatur finden sich vor allem dann Transfereffekte auf fluide Intelligenz, wenn die Tests keine Parallelversionen besitzen. Auch in dieser Studie konnten Zugewinne nur in dem Test ohne Parallelversion (LPS3) gefunden werden. Als Ausnahme gilt eine Studie von Schweizer, die trotz Parallelversion signifikante Zugewinne im RSPM fand. In ihrer Studie fehlten Angaben zur Zeitvorgabe, so dass man vermuten könnte, dass es keine Zeitbeschränkung gab. Der fehlende Zeitdruck könnte ursächlich für den nachgewiesenen Effekt auf die fluide Intelligenz gewesen sein. Alle anderen Studien mit Zeitbeschränkung und Parallelversion konnten keine Effekte auf fluide Intelligenz erzeugen.

In der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass auch im Alter Potential für Gf-Zugewinne besteht, und Transfereffekte mit dem RSPM erfasst werden können [73]. Da es kaum n-back-Studien mit **älteren Probanden** gibt, können die aktuellen Ergebnisse nicht direkt verglichen, sondern nur vorsichtig interpretiert werden. Die einzige n-back-Studie mit mittelalten Probanden (30 - 60 Jahre) von Lawlor-Savage konnte keine Transfereffekte auf fluide Intelligenz (RAPM und Cattell) erzeugen. Auch in dieser Arbeit konnten keine Zugewinne im RSPM im Alter erzeugt werden. Die Zugewinne im LPS3 wurden durch die Bonferroni-Korrektur eliminiert. Eine Studie von Zinke, die Transfer auf den RSPM fand, trainierte andere Arbeitsgedächtnisaufgaben und wandte den RSPM vermutlich zeitlich unbeschränkt an. Nach dem bisherigen Stand müsste man daher sagen, dass ein n-back-Training nicht geeignet ist, im Alter Transfereffekte auf fluide Intelligenz zu erzeugen, oder die Transferaufgaben in zeitbeschränkter Form ungeeignet sind, vorhandene Zugewinne aufzuzeigen.

Signifikante Gruppenunterschiede zum Vorteil der jüngeren Probanden blieben zu allen Zeitpunkten bestehen.

Verbesserungspotential der aktuellen Studie besteht in der Anzahl der angewandten Gf-Tests und in der Anwendung des RSPM. Mehr Tests hätten die Interpretation von diskrepanten Ergebnissen erleichtert. Eine größere Zeitvorgabe oder keine Zeitvorgabe im RSPM und eine festgelegte Matrizenreihenfolge mit sukzessiver Schwierigkeitszunahme hätten Zugewinne begünstigen können. Gf-Tests sollten immer als Parallelversionen angewandt werden, so z.B. auch der LPS3, um Test-Re-Test-Verzerrungen sicher ausschließen zu können. In Zukunft sollte eindeutig festgelegt werden, ob Bonferroni-Korrekturen im kognitiven Training angewandt werden sollten, damit die Ergebnisse vergleichbar bleiben. Denn so bleibt die Datenlage auch etwa 10 Jahre nach Jaeggis [69] erster Studie zu diesem Thema kontrovers. Neuere Metaanalysen aus den Jahren 2014 - 2017 [140-143] fanden maximal kleine Effekte auf fluide Intelligenz, deren praktische Bedeutung für den Alltag fraglich ist.

4.3.2.2 Aufgaben zur Verarbeitungsgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Bereits vor dem Training zeigte sich in allen drei Verarbeitungsgeschwindigkeitsaufgaben (Zahlen-Symbol-Test, Zahlenverbindungstest Teil A und Teil B) ein hochsignifikanter Gruppenunterschied zum Vorteil der jungen Probanden. Diese Ergebnisse passen zu Salthouses processing speed theory (s. Kap. 1.4.3.1), die besagt, dass mit ca. 25 Jahren das Maximum der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit erreicht ist. Anschließend folgt eine lineare Abnahme der Verarbeitungsgeschwindigkeit bis ins hohe Erwachsenenalter. Mit einem Durchschnittsalter von etwas unter 26 Jahren waren die jungen Probanden dieser Studie auf dem Höhepunkt ihrer kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeitsleistung. Die älteren Probanden hingegen konnten mit einem Durchschnittsalter von etwa 65 Jahren nur noch auf eine langsamere Verarbeitungsgeschwindigkeit zurückgreifen.

Trainingsverlauf: Das n-back-Paradigma der aktuellen Studie war durch die Levelkonfiguration (abnehmende Interstimulusintervalle) darauf ausgerichtet, neben der Arbeitsgedächtniskapazität auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Probanden zu trainieren. Nach nur einer Trainingswoche zeigten sich bei den jungen Probanden signifikante Zugewinne im Zahlen-Symbol-Test. Am Ende des Trainings zeigten sich in beiden Altersgruppen hochsignifikante Zugewinne im Zahlen-Symbol-Test. In den Zahlenverbindungstests hingegen verbesserten sich nur die jungen Probanden signifikant in Teil A. Die signifikante Verbesserung in Teil B verflüchtigte sich durch die Bonferroni-Korrektur. Da Teil B stärker auf Exekutivfunktionen basiert [144], könnte dies den fehlenden Zugewinn erklären. Die älteren Probanden verbesserten

sich in keinem der Zahlenverbindungstests signifikant. Im Zahlenverbindungstest Teil A verschlechterten sich die Probanden sogar, welches nur durch Motivationseinbußen der Probanden zu erklären ist. Im Zahlenverbindungstest Teil B fiel bei den älteren Probanden die große Spannweite der Ergebnisse auf, welche auf zwei Ausreißer zurückzuführen war. Auch in den anderen Tests zur Verarbeitungsgeschwindigkeit zählten diese Ausreißer zu den langsamsten Probanden. Eine Berechnung ohne Ausreißer hätte dennoch keine Trends oder Signifikanzen in den Verarbeitungsgeschwindigkeitstests gezeigt. Der hochsignifikante Gruppenunterschied blieb zu allen Zeiten bestehen.

Vergleich mit anderen Studien: In einigen n-back-Studien wurde auch nach Effekten auf Verarbeitungsgeschwindigkeit gesucht. Die Ergebnisse waren ernüchternd. Weder Chooi [88], Redick [90], Lawlor-Savage [99], Thompson [92] noch Minear [94] fanden Transfereffekte auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Nur Borella [96, 98] fand Effekte auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Er trainierte, wie bereits weiter oben im Text beschrieben, mit verbalen und visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgaben und fand bei den durchschnittlich 70-jährigen Probanden Transfereffekte auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit, bei den im Mittel 80-jährigen jedoch nicht.

Takeuchi [135] führte 2011 mit jungen Probanden ein Verarbeitungsgeschwindigkeitstraining mittels acht verschiedener Aufgaben (davon vier n-back-Versionen mit Adaptation über reduzierte Interstimulusintervalle) durch. Er fand deutliche Trainingseffekte für die Verarbeitungsgeschwindigkeit (z.B. 0-back schneller absolviert), jedoch keinen Transfer auf das Arbeitsgedächtnis (keine Verbesserung im 2-back), fluide Intelligenz oder Inhibition. In seinem Review von 2012 [144] bekräftigte er, dass die meisten Studien mit einem Training der Verarbeitungsgeschwindigkeit zwar gute Trainingseffekte und ggf. sehr nahe Transfereffekte erzeugen konnten, jedoch selten ferne Transfereffekte. Dem widerspricht eine Studie von Colom [145], der mit jungen Probanden über drei Wochen ein Verarbeitungsgeschwindigkeits- und Aufmerksamkeitstraining durchführte und danach signifikante Verbesserungen in Aufgaben zur fluiden Intelligenz (u.a. dem RAPM) feststellen konnte.

Die Probanden der aktuellen Studie trainierten parallel das Arbeitsgedächtnis (n-back ↑) und die Verarbeitungsgeschwindigkeit (ISI ↓). Da bislang in der Literatur keine Zugewinne in der Verarbeitungsgeschwindigkeit nach einem klassischen n-back-Training erzeugt werden konnten, sollten die Zugewinne im Zahlen-Symbol-Test und im Zahlenverbindungstest Teil A in der aktuellen Studie am ehesten als Ergebnis des direkten Verarbeitungsgeschwindigkeitstrainings und nicht als Transfereffekt interpretiert werden. Eine Generalisation von Fähigkeiten hätte

demzufolge nicht stattgefunden. Eine definitive Ergebnisinterpretation ist aufgrund des Studiendesigns nicht möglich.

Methodenkritik: Die verwendeten Aufgaben waren geeignet die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu messen und wurden zum Teil (Zahlen-Symbol-Test) bereits in anderen n-back-Studien eingesetzt [92]. Wünschenswert wären Parallelversionen zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten gewesen, um Test-Re-Test-Verzerrungen auszuschließen.

Zusammenfassung Verarbeitungsgeschwindigkeit: Hypothese 2b (siehe Kapitel 1.9.) besagte, dass das n-back-Training mit reduzierten Interstimulusintervallen in beiden Altersgruppen zu Zugewinnen in den VG-Tests führen würde. Diese Hypothese kann nur partiell bestätigt werden. Bei den jungen Probanden fanden sich signifikante Zugewinne in zwei von drei Tests, dem Zahlen-Symbol-Test (t2, t3) und dem Zahlenverbindungstest Teil A. Möglicherweise basiert Teil B mehr auf Exekutivfunktionen, weshalb in diesem Test (nach Bonferroni-Korrektur) kein signifikanter Zugewinn entstand. Bei den älteren Probanden zeigte sich nur in einem Test ein signifikanter Zugewinn, dem Zahlen-Symbol-Test (t3). Die Fähigkeit, die Verarbeitungsgeschwindigkeit im Alter durch Training zu erhöhen, scheint demnach nur eingeschränkt zu bestehen. In allen drei Tests fand sich zu allen Zeitpunkten ein hochsignifikanter Gruppenunterschied mit besserer Performanz der jüngeren Probanden. In der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass durch ein Arbeitsgedächtnistraining Transfereffekte auf Verarbeitungsgeschwindigkeit auch im Alter erzeugt werden können [96, 98]. Nach einem klassischen n-back-Training ist dieses bislang jedoch noch nicht nachgewiesen worden. Da Geschwindigkeit in dieser Arbeit trainiert wurde, liegt es nahe, den Zugewinn in der Verarbeitungsgeschwindigkeit direkt auf das Training mittels der reduzierten Interstimulusintervalle zurückzuführen und nicht als Generalisation von Fähigkeiten zu interpretieren.

4.3.2.3 Aufgaben zum Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis

Ausgangssituation: Die älteren Probanden konnten vor dem Training sowohl in der Zahlenspanne vorwärts (Kurzzeitgedächtnis) als auch in der Zahlenspanne rückwärts (Arbeitsgedächtnis) mehr Spannen richtig wiederholen als die jungen Probanden. Für einen signifikanten Gruppenunterschied reichten die Ergebnisse jedoch nicht. Eine ähnliche Ausgangssituation fand zum Beispiel auch Brehmer [97] in ihrer Studie mit jüngeren und älteren Probanden.

Trainingsverlauf: Außer in der Zahlenspanne rückwärts konnten die älteren Probanden am Ende des Trainings weiterhin mehr Spannen korrekt wiedergeben als die jüngeren Probanden. Für einen signifikanten Gruppenunterschied reichten die Unterschiede jedoch nicht. Beide Gruppen konnten nach dem Training in beiden Aufgaben mehr Zahlenspannen korrekt wiedergeben, aber nach Bonferroni-Korrektur blieb nur der Zugewinn in der Zahlenspanne rückwärts bei den jungen Probanden signifikant. Die bessere Performanz der älteren Probanden ist aus neurophysiologischer Sicht kaum erklärbar, da eine abnehmende Arbeitsgedächtnisleistung im Alter typisch ist (siehe Kapitel 1.4.2). Zwar scheint sich die Verschlechterung zunächst in der visuell-räumlichen und erst später in der verbalen Domäne niederzuschlagen [54], dennoch müssten die jungen Probanden den älteren überlegen sein. Als Erklärungsansatz für die bessere Leistung der älteren Probanden kann auch hier nur eine größere Motivation der älteren Probanden dienen.

Vergleich mit anderen Studien: Unterschiedliche Formen eines Arbeitsgedächtnistrainings konnten in der Vergangenheit nahen Transfer auf andere Arbeitsgedächtnisaufgaben hervorrufen. Als Transferaufgaben wurden, wie in der aktuellen Studie, vor allem Spannenaufgaben verwendet. Die Wahl der Trainings- und Transferaufgaben scheint Einfluss auf das Outcome zu haben.

Wurde mittels Spannenaufgaben trainiert, konnten nahe Transfereffekte auf den reading span und rotation span [91], letter span plus [73] und digit span [96] gefunden werden. Dieselben Autoren fanden jedoch nicht für alle ihre Arbeitsgedächtnistests Transfereffekte, so fehlten sie beim word span und arrow span [91] und beim corsi block span [73]. Minear [94] trainierte ebenfalls mit einer Spannenaufgabe und fand in keiner der zehn Transfer-Spannenaufgaben Effekte, ebenso wenig wie im verbal und object n-back. Die Autorin selbst vermutete, dass das Training mit nur einer Aufgabe (single domain training) zum Erlernen einer Strategie führe, ohne dass es zu einer Generalisation von Fähigkeiten käme. Ein visuelles Arbeitsgedächtnistraining mit Matrizen von Borella [98] erzeugte bei älteren Probanden nahen Transfer auf eine Spannenaufgabe. Ebenso konnten mit einem domainen-übergreifenden Arbeitsgedächtnistraining von Brehmer [97] (u.a. wurde die Zahlenspanne rückwärts trainiert) bei jungen und älteren Probanden deutliche Trainingseffekte und naher Transfer auf die Zahlenspanne vorwärts erzeugt werden. Signifikante Gruppenunterschiede fand auch Brehmer nicht.

Jaeggi [69] konnte demonstrieren, dass ein n-back-Training geeignet ist Transfereffekte auf eine einfache Spannenaufgabe (Zahlenspanne vorwärts und rückwärts) zu generieren. Transfereffekte

auf eine komplexe Spannaufgabe konnten nicht generiert werden [85]. Dobbs et al [146] stellten schon 1989 fest, dass n-back stärker mit einfachen Spannaufgaben als komplexen Spannaufgaben korrelierte. Die meisten Arbeitsgedächtnisstudien verwendeten jedoch komplexe Spannaufgaben als Transferaufgabe und fanden keine Transfereffekte. Dazu zählen Studien von Chooi (operation span) [88], Redick (symmetry span und running letter span) [90], Lawlor-Savage (digit span und operation span) [99] und Thompson (operation span, reading span und combined span) [92]. Redick [147] demonstrierte in seiner Metaanalyse von 2013, dass Spannaufgaben und n-back nur schwach miteinander korrelieren, wobei die Korrelation zwischen n-back und der Zahlenspanne rückwärts stärker zu sein scheint als zwischen n-back und der Zahlenspanne vorwärts oder komplexen Spannaufgaben. Redick vermutete, dass sich n-back und die Zahlenspanne rückwärts ähnlicher sind als die anderen Aufgaben, da sie beide mentales Re-Sortieren von Zahlen erfordern. Das Ergebnis der jungen Probanden, die sich nach dem Training signifikant in der Zahlenspanne rückwärts, aber nicht in der Zahlenspanne vorwärts verbesserten, passt zu dieser stärkeren Korrelation. Auch die älteren Probanden verbesserten sich in der Zahlenspanne rückwärts. Aufgrund ihrer besseren Ausgangsperformanz war der Spielraum nach oben jedoch nicht mehr so groß wie für die jungen Probanden, und damit reichte ihr Zugewinn nicht mehr für eine signifikante Steigerung. Möglicherweise wurden die Ergebnisse durch die Bonferroni-Korrektur auch hier „überkorrigiert“ und Effekte damit fälschlicherweise eliminiert.

Methodenkritik: Laut Shipstead [148] testen einfache Spannaufgaben nur das Kurzzeitgedächtnis. Das Kurzzeitgedächtnis ist jedoch in den meisten Arbeitsgedächtnismodellen eine Komponente des Arbeitsgedächtnisses, wobei offen bleibt, ob es sich um einen gemeinsamen Teil oder geteilte Prozesse handelt [149]. Es wäre bereichernd gewesen, mehrere Transferaufgaben mit Parallelversionen angewandt zu haben. Da der Transfer auf das Arbeitsgedächtnis jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit stand, wurden nur die oben genannten Tests angewandt.

Zusammenfassung Arbeitsgedächtnis: Hypothese 2c (siehe Kapitel 1.9.) besagte, dass durch das n-back-Training Zugewinne in den untrainierten Zahlenspannen vorwärts und rückwärts entstehen würden. Spannaufgaben sind gängige Tests, um Zugewinne im Arbeitsgedächtnis zu detektieren, und auch im Alter erfolgreich einsetzbar [73]. Erst nach vier Trainingswochen kam es zu einem signifikanten Zugewinn in der Zahlenspanne rückwärts bei den jungen Probanden. Die Zugewinne in der Zahlenspanne vorwärts bzw. bei den älteren Probanden waren so klein, dass sie nach Bonferroni-Korrektur nicht mehr signifikant waren. Es wird vermutet, dass sich die

Zahlenspanne rückwärts und n-back in ihren Anforderungen stärker ähneln als die Zahlenspanne vorwärts, so dass Zugewinne in der Zahlenspanne rückwärts wahrscheinlicher sind, da im Training erlernte aufgabenspezifischen Strategien angewandt werden können (145). Da eine Kontrollgruppe und Parallelversionen der Tests fehlten, muss der Zugewinn der jungen Probanden jedoch vorsichtig interpretiert werden. Die älteren Probanden konnten in allen Tests stets mehr Spannen korrekt wiedergeben als die jungen Probanden (Ausnahme Zahlenspanne rückwärts zu t3), ohne dass dabei ein signifikanter Gruppenunterschied auftrat. Aus neurophysiologischer Sicht ist diese Tatsache nur mit einer höheren Motivation der älteren Probanden zu erklären. In der Vergangenheit konnte bei jungen Probanden gezeigt werden, dass ein Transfer auf das Arbeitsgedächtnis nach einem n-back-Training möglich ist (69), obwohl es auch zahlreiche Studien gibt, in denen dieser Transfer nicht erfolgte (88, 92, 145). Bei älteren Probanden konnte bislang in n-back-Studien kein Transfer auf das Arbeitsgedächtnis festgestellt werden. Alle Studien (73, 97, 98), die Transfer auf das Arbeitsgedächtnis im Alter erzeugen konnten, nutzten alternative Arbeitsgedächtnisaufgaben zum Trainieren.

4.3.2.4 Aufgaben zur Exekutivfunktion

Ausgangssituation: Beide Gruppen zeigten zu Beginn in den Aufgaben zur Wortflüssigkeit ein ähnliches Niveau. Da im Alltag häufiger in Kategorien als in Anfangsbuchstaben gedacht werden muss, konnten im Wortflüssigkeitstest Kategorie Tiere bereits zu t1 mehr korrekte Antworten gegeben werden (*jung*: \bar{M} 28,3; *alt*: \bar{M} 28,0) als im Wortflüssigkeitstest Kategorie Buchstaben (*jung und alt*: \bar{M} 17,6).

Trainingsverlauf: Nur die jungen Probanden konnten ihre Leistung in der Kategorie Buchstaben signifikant steigern. Der Zugewinn in der Kategorie Tiere war so klein, dass er nach Bonferroni-Korrektur nicht mehr signifikant war. Da in der Kategorie Tiere bereits zu t1 eine hohe Anzahl korrekter Wörter genannt wurde, war das Erreichen eines Zugewinns auf Signifikanzniveau zu t3 schwierig. Außerdem vermutet Shao [105], dass der semantische Wortflüssigkeitstest Kategorie Tiere verstärkt verbale Fähigkeiten bzw. das Vokabular abfragt, während der phonematische Wortflüssigkeitstest Kategorie Buchstaben verstärkt die Exekutivfunktion des Probanden testet. Da Exekutivfunktionen als Teil des Arbeitsgedächtnisses gelten, wurden Zugewinne nach einem Arbeitsgedächtnistraining erwartet. Während altersabhängige Performanzverschlechterungen in den klassischen Exekutivfunktionen Updating, Inhibition und Process shifting in der Literatur beschrieben werden, zeigt sich die Performanz in den Wortflüssigkeitsaufgaben im Alter stabil

[125]. Zu dieser Beobachtung passen die Ausgangsergebnisse der jungen und älteren Probanden der aktuellen Studie, die nahezu identisch gut waren. Die älteren Probanden konnten ihre Leistung nicht signifikant steigern. Ein signifikanter Gruppenunterschied entstand nach Bonferroni-Korrektur nicht.

Vergleich mit anderen Studien: Um ein einfaches n-back-Paradigma erfolgreich zu absolvieren, werden verschiedene exekutive Prozesse benötigt. Dazu gehören Updating, Monitoring der Zahlen-Präsentation und Inhibition falscher oder veralteter Ziele [104]. Salminen [104] konnte nach einem dualen n-back-Training mit jungen Probanden Transfereffekte auf verschiedene Exekutivfunktionen (Updating, Task Switching, Aufmerksamkeitskontrolle) feststellen. Andere Autoren hingegen konnten keinen Transfer nach einem Arbeitsgedächtnistraining auf Inhibition (Zinke) [73], Updating/Interferenzkontrolle (Harrison) [91] oder Wortflüssigkeit (Chooi) [88] feststellen. In der aktuellen Studie konnten nur die jungen Probanden Zugewinne im Bereich Exekutivfunktion (Wortflüssigkeitstest Kategorie Buchstaben) erzielen.

Methodenkritik: Die Exekutive beinhaltet viele Funktionen, die mit einer Transferaufgabe weder abgedeckt noch ausreichend beurteilt werden können. Da der Zugewinn in den Exekutivfunktionen in dieser Studie jedoch nicht im Mittelpunkt stand, wurde nur eine „Transferaufgabe“ angewandt. Des Weiteren ist die Performanz in den Wortflüssigkeitsaufgaben nicht nur von der Exekutivfunktion des Probanden, sondern auch von seinem Vokabular und seiner Verarbeitungsgeschwindigkeit abhängig [105], so dass Verbesserungen in den angewandten Tests nicht eindeutig auf die Exekutivfunktion zurückgeführt werden können.

Zusammenfassung Exekutive: Hypothese 2d (Siehe Kapitel 1.9.) besagte, dass sich durch das n-back-Training Zugewinne in den Exekutivfunktionen für beide Altersgruppen generieren lassen. Diese Zugewinne konnten nur bei den jungen Probanden und auch nur im Wortflüssigkeitstest Kategorie Buchstaben festgestellt werden. Als Erklärung für dieses Ergebnis könnte einerseits dienen, dass die Kategorie Buchstaben stärker exekutivabhängig ist als die Kategorie Tiere. Es könnte auch sein, dass die hinzugewonnene Verarbeitungsgeschwindigkeit den jüngeren Probanden in der zu t1 schwächeren Kategorie zu einem signifikanten Zugewinn verhalf. Letzteres könnte erklären, warum die Zugewinne bei den älteren Probanden fehlten.

4.3.3 Einflüsse auf die fluide Intelligenz

4.3.3.1 *Gf und AG*

Signifikante Korrelationen fanden sich zwischen dem Trainingserfolg und dem RSPM (junge Probanden) und dem LPS3 (ältere Probanden). Ein hohes n-back-Level ging dabei mit einer guten Gf-Leistung einher. Tendenziell scheinen besonders ältere Probanden mit einer schlechten Gf-Ausgangsleistung ihre Performanz durch ein Training deutlich steigern zu können.

4.3.3.2 *Gf und VG*

Im n-back-Paradigma dieser Studie wurde auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit trainiert. Ein Zusammenhang von Verarbeitungsgeschwindigkeit und fluider Intelligenz wurde initial postuliert. In dieser Studie konnte lediglich eine signifikante Korrelation zwischen dem LPS3 und dem Zahlenverbindungstest Teil A am Ende des Trainings bei den älteren Probanden gefunden werden. Eine zunächst signifikante Korrelation des RSPM mit dem Zahlen-Symbol-Test bei den jüngeren Probanden hielt der Bonferroni-Korrektur nicht stand.

Zusammenfassung Korrelationen: Das Arbeitsgedächtnis und fluide Intelligenz haben eine gemeinsame Basis. Daher wurde ein Zusammenhang der n-back- und Gf-Ergebnisse am Ende des Trainings erwartet (siehe Kapitel 1.9.3). Diese Studie kann bestätigen, dass das Arbeitsgedächtnis und fluide Intelligenz (wenn auch nur teilweise) signifikant miteinander korrelieren. Gute n-back-Performer sind oft auch gute LPS3-Performer und umgekehrt. Es konnten nur wenige Korrelationen zwischen den Leistungen im Bereich fluide Intelligenz und Verarbeitungsgeschwindigkeit am Ende des Trainings gefunden werden. Es gab keine Korrelationen zum Kurzzeitgedächtnis und zu Exekutivfunktionen. In Kapitel 1.3. wurden mögliche Erklärungen für die gemeinsame Basis von Arbeitsgedächtnis und fluider Intelligenz vorgestellt. Anhand der vorliegenden Studie mit relativ kleinen Stichproben kann keine dieser Theorien eindeutig bekräftigt werden. Die Tendenz, dass eine schlechte Ausgangsperformanz im Bereich der fluiden Intelligenz zu größeren Gf-Zugewinnen im Alter führt, sollte in zukünftigen Studien unbedingt aufgegriffen werden. Während junge Probanden ihre Gf-Leistung scheinbar unabhängig von der Ausgangsperformanz steigern können, scheint das Potential zu weiteren Steigerungen bei guter Ausgangsperformanz im Alter eingeschränkt zu sein.

4.3.4 Prädiktoren

4.3.4.1 Prädiktoren für das maximal erreichte n-back-Level

Nur bei den älteren Probanden fanden sich geeignete Prädiktoren. Je jünger ein Proband und je mehr korrekte Lösungen im LPS3 zu t1 erzielt wurden, desto höher war das maximal erreichte n-back-Level. Wie in Kapitel 4.3.3 bereits näher betrachtet, war bei den älteren Probanden auch die Korrelation von maximal erreichtem n-back-Level und der LPS3-Performanz zu t3 signifikant. Die Anforderungen im n-back und LPS3 scheinen ähnlicher als zum RSPM. Diese Feststellung würde zur Theorie der spezifischen Korrelationen zwischen dem Arbeitsgedächtnis und der fluiden Intelligenz passen, welche in Kapitel 1.3.5 kurz vorgestellt wurde. Diese besagt, dass nur einzelne Arbeitsgedächtnisfaktoren mit einzelnen Faktoren der fluiden Intelligenz korrelieren [33].

4.3.4.2 Prädiktoren für die Zugewinne im RSPM und LPS3

Die Ausgangsperformanz im RSPM zu t1 eignete sich in beiden Altersgruppen als Prädiktor für den Zugewinn in diesem Test. Je schlechter die Performanz am Anfang des Trainings, desto größer war der Zugewinn am Ende des Trainings. Auch beim LPS3 konnte diese Beobachtung gemacht werden, allerdings nur bei den älteren Probanden. Die Zugewinne im LPS3 waren nur bei den jungen Probanden signifikant. Das lag daran, dass sich die gesamte Gruppe verbesserte und nicht nur die initial schwachen Performer.

Zusammenfassung Prädiktoren: In Kapitel 1.9.4 wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Trainingserfolg anhand der Gf-Leistung zu Beginn des Trainings vorhergesagt werden könnte. Diese Theorie kann nur für die älteren Probanden bestätigt werden. Des Weiteren wurde vermutet, dass anhand des Trainingserfolges die Gf-Zugewinne vorhergesagt werden könnten. Diese Theorie ließ sich bei keiner der beiden Altersgruppen bestätigen. Stattdessen konnte anhand der Ausgangsperformanz in den Gf-Tests der Zugewinn in der fluiden Intelligenz vorhergesagt werden. Dies galt für beide Gruppen für den RSPM und für die älteren Probanden für den LPS3. Dabei begünstigte eine schwache Ausgangsperformanz größere Zugewinne. Diese Ergebnisse decken sich mit der Literatur. Auch Chooi [88] stellte fest, dass die Ausgangsperformanz in einem Test als Prädiktor für die Ergebnisse desselben Tests nach dem Training verwendet werden kann. Rudebeck [89] fand für seine initial schwachen Gf-Performer ebenfalls die größten Zugewinne in der fluiden Intelligenz. Von Bastian [150] verweist in seinem

Review von 2014 bereits auf die Notwendigkeit, die Bedeutung der Ausgangsperformanz für das Training und den Transfer in zukünftigen Studien genauer zu beleuchten. Denn nach diesen Ergebnissen könnte bereits vor dem Training definiert werden, welche Probanden für ein erfolgreiches Training geeignet sind. Und umgekehrt könnten Probanden ausgeschlossen werden, deren kognitive Fähigkeiten noch zu gut sind, um von einem Training zu profitieren.

4.4 Beantwortung der offenen Fragen

1. Können Jaeggis Ergebnisse bei jungen und älteren Probanden repliziert werden?

Leider nein. Zugewinne in der fluiden Intelligenz, die nach Bonferroni-Korrektur signifikant blieben, konnten nur im LPS3 bei den jungen Probanden erzeugt werden. Beim RSPM und im Alter fehlten signifikante Zugewinne in der fluiden Intelligenz.

2. Ist das n-back-Paradigma geeignet im Alter Zugewinne in fluiden Intelligenz zu erzeugen?

Das modifizierte n-back-Paradigma (Anpassung über "n" und Interstimulusintervall) war nicht in der Lage, im Alter signifikante Effekte auf fluide Intelligenz zu erzeugen.

3. Sind die Zugewinne dosisabhängig?

Nach der vierten Trainingssitzung (t2) wurde eine Verlaufskontrolle mittels einer kleinen neuropsychologischen Testbatterie durchgeführt. In beiden Gruppen zeigten sich in allen angewandten Tests (LPS3, Zahlenspanne vorwärts und rückwärts und Zahlen-Symbol-Test) Verbesserungen, die am Ende des Trainings (t3) in der großen Testbatterie noch ausgeprägter waren. Sowohl die „Dosis“ des Trainings als auch ein Wiederholungseffekt könnten die schrittweisen Verbesserungen in den Tests erklären.

4. Handelt es sich um echte Zugewinne?

Da nach Bonferroni-Korrektur nur im LPS3 bei den jungen Probanden signifikante Zugewinne gefunden werden konnten, kann die Frage nicht eindeutig beantwortet werden. Sowohl Test-Re-Test-Verzerrungen bei fehlender Parallelversion und fehlender Kontrollgruppe als auch erlernte aufgabenspezifische Fähigkeiten oder ein allgemeiner Leistungszugewinn im Bereich fluide

Intelligenz wären möglich. Hinweisend auf Test-Re-Test-Verzerrungen ist die im Vorwort genannte Veröffentlichung zu einem sehr ähnlichen Datensatz mit passiven Kontrollgruppen.

4.5 Ausblick

Während Metaanalysen aus 2014 von Au [141] und Karbach [143] noch zu dem Schluss kamen, dass ein Arbeitsgedächtnistraining (wenn auch in geringem Ausmaß) zu generellen Transfereffekten auf fluide Intelligenz führen kann, sind neuere Metaanalysen aus 2016 von Melby-Lervåg [142] und aus 2017 von Soveri [140] skeptischer. Sie fanden keine oder nur kleine Effektstärken von $g = 0.05$. Melby-Lervåg begründete die signifikanten Transfereffekte in anderen Studien mit zu kleinen Kohorten, nur einer Transferaufgabe und vermeintlichen Transfereffekten durch eine Verschlechterung der Kontrollgruppe. Soveri vermutete, dass die vorhandenen Effekte stark auf selbst erlernten Strategien basieren, so dass nur in manchen Gf-Tests Zugewinne auftreten. Es zeigt sich also mittlerweile eine eher ernüchternde Datenlage in Bezug auf die Erzeugung von Transfereffekten auf fluide Intelligenz durch ein Arbeitsgedächtnistraining (Melby-Lervåg) bzw. speziell durch das n-back-Training (Soveri).

In der aktuellen Studie konnten Zugewinne in fluider Intelligenz nur bei den jungen Probanden und nur in einem Test (LPS3) erzeugt werden. Ohne aktive Kontrollgruppe und ohne Parallelversion konnten diese Zugewinne nicht zweifelsfrei dem n-back-Training zugeschrieben werden. Bei den älteren Probanden konnte festgestellt werden, dass die Gf-Zugewinne bei schlechter Ausgangsperformanz am höchsten sind. Daher wäre es hilfreich, in zukünftigen Studien mehr Probanden mit geringerem Bildungsniveau oder sogar Patienten mit einer leichten kognitiven Störung (MCI) einzuschließen, da hier Spielraum für signifikante Zugewinne sein dürfte.

Seit über 10 Jahren beschäftigt sich die Forschung mit dem Thema, ob Transfereffekte auf fluide Intelligenz mittels eines Arbeitsgedächtnistrainings generierbar sind. Um eine endgültige Klärung dieser Frage zu bewirken, müssten zukünftige Studien eine große Fallzahl einschließen. Ebenso müsste es eine aktive Kontrollgruppe geben. Es sollten Probanden jeden Alters und jeden Bildungsgrades eingeschlossen werden und ggf. Patienten mit MCI. Der Fokus sollte auf fluider Intelligenz liegen. Es sollten eine höhere Anzahl an Tests und ggf. nur Gf-Tests angewandt werden, um von Generalisierung von Fähigkeiten sprechen zu können, aufgabenspezifische Zugewinne vernachlässigen zu können und weniger Bonferroni-Korrekturen vornehmen zu müssen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es in dieser Studie nur in geringem Ausmaß zu Zugewinnen in fluiden Intelligenz, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtnis und Exekutivfunktionen gekommen ist und dies nahezu ausschließlich bei den jungen Probanden. Vorhandene Zugewinne bei den älteren Probanden waren nach Bonferroni-Korrektur nicht mehr signifikant (Ausnahme Verarbeitungsgeschwindigkeit). Diese Studie mit jungen und alten Probanden reiht sich in eine lange Liste von kleinen Studien mit kontroversen Trainings- und Transferergebnissen ein. Es bleibt ein spannendes, sehr umstrittenes Feld im Gebiet des kognitiven Trainings.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Sternberg RJ, Berg CA. Quantitative integration: Definitions of intelligence: A comparison of the 1921 and 1986 symposia. In RJ Sternberg and DK Detterman: What is intelligence? Contemporary viewpoints on its nature and definition. Ablex 1986: 155-162.
2. Binet A, Simon T. Methodes nouvelles pour le diagnostique du niveau intellectuel des anormaux. Année Psychologique 1905; 11:191-244.
3. Spearman C. General intelligence, objectively determined and measured. American Journal of Psychology 1904; 15: 201-293.
4. Thurstone LL. Primary mental abilities. University of Chicago Press 1938.
5. Cattell RB. The measurement of adult intelligence. Psychological Bulletin 1943; 40: 153-193.
6. Horn JL, Cattell RB. Refinement and test of the theory of fluid and crystallized general intelligences. Journal of Educational Psychology 1966; 57: 253-270.
7. Carroll JB. Human cognitive abilities. A survey of factor analysis studies. Cambridge University Press 1993.
8. Horn JL, Cattell RB. Age differences in primary mental ability factors. Journal of Gerontology 1966; 21: 210-220.
9. Cattell RB. Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. Journal of Educational Psychology 1963; 54: 1-22.
10. Cattell RB. Intelligence: Its structure, growth, and action. Elsevier Science Publishing Company 1987.
11. Süß HM. Intelligenztheorien. In K. Kubinger und RS Jäger, Schlüsselbegriffe der Psychologischen Diagnostik. Psychologie Verlags Union 2003; 217- 224.
12. Gottfredson LS. Why g matters: the complexity of everyday life. Intelligence 1997; 24: 79-132.
13. Funke J, Vaterrodt B. Was ist Intelligenz? C.H. Beck 2009.
14. Gray JR, Thompson PM. Neurobiology of intelligence: science and ethics. Nature Reviews Neuroscience 2004; 5: 471-482.
15. Neisser U, Boodoo G, Bouchard Jr TJ, Boykin AW, Brody N, Ceci SJ, Halpern DF, Loehlin JC, Perloff R, Sternberg RJ, Urbina S. Intelligence: Knowns and unknowns. American Psychologist 1996; 51: 77-101.
16. Herrnstein RJ, Murray C. The bell curve: Intelligence and class structure in American life. Free Press 1994: 5-11.
17. Bouchard Jr TJ, Lykken, DT, McGue M, Segal NL, Tellegen A. Sources of human psychological differences: the Minnesota study of twins reared apart. Science 1990; 250: 223-228.
18. Boomsma DI, de Geus, EJ, van Baal GC, Koopmans JR. A religious upbringing reduces the influence of genetic factors on disinhibition: evidence for interaction between genotype and environment on personality. Twin Research 1999; 2: 115-125.
19. Plomin R, DeFries, JC, Loehlin JC. Genotype-environment interaction and correlation in the analysis of human behavior. Psychological Bulletin 1977; 84: 309-322.
20. Schaie KW. The Course of Adult Intellectual Development. American Psychologist 1994; 49: 304-313.
21. Bergman I, Almkvist O. The effect of age on fluid intelligence is fully mediated by physical health. Archives of Gerontology and Geriatrics 2013; 57 (1); 100-109.

-
22. Esposito G, Kirby BS, Van Horn JD, Ellmore TM, Berman KF. Context- dependent, neural system-specific neurophysiological concomitants of ageing: mapping PET correlates during cognitive activation. *Brain* 1999; 122: 963-979.
 23. Duncan J, Seitz RJ, Kolodny J, Bor D, Herzog H, Ahmed A, Newell FN, Emslie H. A neural basis for general intelligence. *Science* 2000; 289: 457-460.
 24. Miller EK, Cohen JD. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience* 2001; 24: 167-202.
 25. Waltz JA, Knowlton BJ, Holyoak KJ, Boone KB, Mishkin FS, de Menezes Santos M, Thomas CR, Miller BL. A system for relational reasoning in human prefrontal cortex. *Psychological Science* 1999; 10: 119-125.
 26. Thompson PM, Cannon TD, Narr KL, van Erp T, Poutanen VP, Huttunen M, Lönqvist J, Standertskjöld-Nordenstam CG, Kaprio J, Khaledy M, Dail R, Zoumalan CI, Toga AW. Genetic influences on brain structure. *Nature Neuroscience* 2001; 4: 1253-1258.
 27. Miller GA, Galanter E, Pribram KH. *Plans and the Structure of Behavior*. Holt. 1960.
 28. Baddeley A. Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience* 2003; 4: 829-839.
 29. Cowan N. An embedded-processes model of working memory. In Miyake A and Shah P: *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge University Press 1999: 62-101.
 30. Engle RW, Kane MJ, Tuholski SW. Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In Miyake A and Shah P: *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, Cambridge University Press. 1999: 102-134.
 31. Miyake A, Shah P. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge University Press. 1999.
 32. Baddeley A. Working memory. *Current Biology* 2010; 20: R136-140.
 33. Süß HW, Oberauer K, Wittmann WW, Wilhelm O, Schulze R. Working-memory capacity explains reasoning ability- and a little bit more. *Intelligence* 2002; 30: 261-288.
 34. Engle RW, Tuholski SW, Laughlin JE, Conway AR. Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: a latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General* 1999; 128: 309-331.
 35. Siegel LS, Ryan EB. The development of working memory in normally achieving and subtypes of learning disabled children. *Child Development* 1989; 60: 973-980.
 36. Vernon PA. *Speed of information processing and intelligence*. Ablex 1987.
 37. Case R, Kurland DM, Goldberg J. Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology* 1982; 33: 386-404.
 38. Salthouse TA. The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review* 1996; 103: 403-428.
 39. Daneman M, Carpenter PA. Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 1980; 19: 450-466.
 40. Kyllonen PC, Christal RE. Reasoning ability is (little more than) working-memory capacity?! *Intelligence* 1990; 14: 389-433.
 41. Conway AR, Cowan N, Bunting MF, Theriault DJ, Minkoff SR. A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence* 2002; 30: 163-183.
 42. Carpenter PA, Just MA, Shell P. What one intelligence test measures: a theoretical account of the processing in the Raven Progressive Matrices Test. *Psychological Review* 1990; 97: 404-431.
-

-
43. Halford GS, Cowan N, Andrews G. Separating cognitive capacity from knowledge: a new hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences* 2007; 11: 236-242.
 44. Colom R, Abad FJ, Quiroga MA, Shih PC, Flores-Mendoza C. Working memory and intelligence are highly related constructs, but why? *Intelligence* 2008; 36: 584-606.
 45. Burgess GC, Gray JR, Conway AR, Braver TS. Neural mechanisms of interference control underlie the relationship between fluid intelligence and working memory span. *Journal of Experimental Psychology: General* 2011; 140: 674-692.
 46. Borella E, Carretti B, De Beni R. Working memory and inhibition across the adult life-span. *Acta Psychologica* 2008; 128: 33-44.
 47. Gray JR, Chabris CF, Braver TS. Neural mechanisms of general fluid intelligence. *Nature Neuroscience* 2003; 6: 316-322.
 48. Helmchen H, Reischies FM. Normales und pathologisches kognitives Altern. *Nervenarzt* 1998; 69: 369-378.
 49. Baltes PB, Staudinger UM, Lindenberger U. Lifespan psychology: theory and application to intellectual functioning. *Annual Review of Psychology* 1999; 50: 471-507.
 50. Lindenberger U, Baltes PB. Intellectual functioning in old and very old age: cross-sectional results from the Berlin Aging Study. *Psychology and Aging* 1997; 12: 410-432.
 51. Juan-Espinosa M, Garcia LF, Escorial S, Rebollo I, Colom R, Abad FJ. Age dedifferentiation hypothesis: Evidence from the WAIS III. *Intelligence* 2002; 30:395-408.
 52. Braver TS, West R. Working memory, executive control, and aging. In Craik F. I. M. and Salthouse T. A.: *The handbook of aging and cognition*, Psychology Press 2008: 311-372.
 53. Park DC, Lautenschlager G, Hedden T, Davidson NS, Smith AD, Smith PK. Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span. *Psychology and Aging* 2002; 17: 299- 320.
 54. Hale S, Rose NS, Myerson J, Strube MJ, Sommers M, Tye-Murray N, Spehar B. The structure of working memory abilities across the adult life span. *Psychology and Aging* 2011; 26: 92-110.
 55. Verhaeghen P, Salthouse TA. Meta-analyses of age-cognition relations in adulthood: Estimates of linear and nonlinear age effects and structural models. *Psychological Bulletin* 1997; 122: 231-249.
 56. Bopp KL, Verhaeghen P. Aging and verbal memory span: a meta-analysis. *The Journals of Gerontology, series B, Psychological Sciences and Social Sciences* 2005; 60: P223-233.
 57. Hasher L, Zacks RT. Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In Bower GH: *The psychology of learning and motivation*, San Diego Academic Press 1988; 22: 193-225.
 58. Bowles RP, Salthouse TA. Assessing the age-related effects of proactive interference on working memory tasks using the Rasch model. *Psychology and Aging* 2003; 18: 608-615.
 59. Cabeza R. Hemispheric asymmetry reduction in older adults: the HAROLD model. *Psychology and Aging* 2002; 17: 85-100.
 60. Reuter-Lorenz PA, Cappell KA. Neurocognitive Aging and the Compensation Hypothesis. *Current directions in psychological science* 2008; 17: 177-182.
 61. Grady C. The cognitive neuroscience of ageing. *Nature Reviews Neuroscience* 2013; 13: 491- 505.
 62. West RL. An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin* 1996; 120: 272-292.
 63. Raz N, Gunning FM, Head D, Dupuis JH, McQuain J, Briggs SD, Loken WJ, Thornton AE, Acker JD. Selective aging of the human cerebral cortex observed in vivo: differential vulnerability of the prefrontal gray matter. *Cerebral Cortex* 1997; 7: 268-282.
-

-
64. Schulze ET, Geary EK, Susmaras TM, Paliga JT, Maki PM, Little DM. Anatomical correlates of age-related working memory declines. *Journal of Aging Research* 2011; 2011: 606871.
 65. Penke L, Maniega SM, Bastin ME, Valdes Hernandez MC, Murray C, Royle NA, Starr JM, Wardlaw JM, Deary IJ. Brain white matter tract integrity as a neural foundation for general intelligence. *Molecular Psychiatry* 2012; 17: 1026-1030.
 66. Braver TS, Barch DM. A theory of cognitive control, aging cognition, and neuromodulation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 2002; 26: 809-817.
 67. Backman L, Karlsson S, Fischer H, Karlsson P, Brehmer Y, Rieckmann A, MacDonald SW, Farde L, Nyberg L. Dopamine D(1) receptors and age differences in brain activation during working memory. *Neurobiology of Aging* 2011; 32: 1849-1856.
 68. Park DC, Bischof GN. The aging mind: neuroplasticity in response to cognitive training. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 2013; 15: 109-119.
 69. Jaeggi SM, Buschkuhl M, Jonides J, Perrig WJ. Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A* 2008; 105: 6829-6833.
 70. Erickson KI, Gildengers AG, Butters MA. Physical activity and brain plasticity in late adulthood. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 2013; 15: 99-108.
 71. Klingberg T. Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences* 2010; 14: 317-324.
 72. Greenwood PM. Functional plasticity in cognitive aging: review and hypothesis. *Neuropsychology* 2007; 21: 657-673.
 73. Zinke K, Zeintl M, Rose NS, Putzmann J, Pydde A, Kliegel M. Working memory training and transfer in older adults: effects of age, baseline performance, and training gains. *Developmental Psychology* 2014; 50: 304-315.
 74. Baltes P, Baltes M. Psychological perspectives on successful aging: The model of selective optimization with compensation. In: *Successful Aging: Perspectives from the Behavioral Sciences* 1990; 1-35.
 75. Reuter-Lorenz PA, Jonides J, Smith EE, Hartley A, Miller A, Marshuetz C, Koeppel RA. Age differences in the frontal lateralization of verbal and spatial working memory revealed by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2000; 12: 174-187.
 76. Park DC, Reuter-Lorenz P. The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology* 2009; 60: 173-196.
 77. Ball K, Berch DB, Helmers KF, Jobe JB, Leveck MD, Marsiske M, Morris JN, Rebok GW, Smith DM, Tennstedt SL, Unverzagt FW, Willis SL. Effects of cognitive training interventions with older adults: a randomized controlled trial. *Jama* 2002; 288: 2271-2281.
 78. Lustig C, Shah P, Seidler R, Reuter-Lorenz PA. Aging, training, and the brain: a review and future directions. *Neuropsychology Review* 2009; 19: 504-522.
 79. Willis SL, Tennstedt SL, Marsiske M, Ball K, Elias J, Koepke KM, Morris JN, Rebok GW, Unverzagt FW, Stoddard AM, Wright E. Long-term effects of cognitive training on everyday functional outcomes in older adults. *Jama* 2006; 296: 2805-2814.
 80. Takeuchi H, Taki Y, Kawashima R. Effects of working memory training on cognitive functions and neural systems. *Reviews in the Neurosciences* 2010; 21: 427-449.
 81. Friedman NP, Miyake A, Corley RP, Young SE, Defries JC, Hewitt JK. Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science* 2006; 17: 172-179.
 82. Olesen PJ, Westerberg H, Klingberg T. Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience* 2004; 7: 75-79.
 83. Thorndike EL, Woodworth, RS. The influence of improvement in one mental function upon the efficiency of other functions. *Psychological Review* 1901; 8: 247-261.
-

-
84. Westerberg H, Klingberg T. Changes in cortical activity after training of working memory-a single-subject analysis. *Physiology and Behavior* 2007; 92: 186-192.
 85. Jaeggi SM, Studer-Luethi B, Buschkuhl M, Su YF, Jonides J, Perrig WJ. The relationship between n-back performance and matrix reasoning- implications for training and transfer. *Intelligence* 2010; 38: 625-635.
 86. Schweizer S, Hampshire A, Dalgleish T. Extending brain-training to the affective domain: increasing cognitive and affective executive control through emotional working memory training. *PLoS One* 2011; 6: e24372.
 87. Jausovec N, Jausovec K. Working memory training: improving intelligence-changing brain activity. *Brain and Cognition* 2012; 79: 96-106.
 88. Chooi W-T, Thompson LA. Working memory training does not improve intelligence in healthy young adults. *Intelligence* 2012; 40: 531-542.
 89. Rudebeck SR, Bor D, Ormond A, O'Reilly JX, Lee AC. A potential spatial working memory training task to improve both episodic memory and fluid intelligence. *PLoS One* 2012; 7: e50431.
 90. Redick TS, Shipstead Z, Harrison TL, Hicks KL, Fried DE, Hambrick DZ, Kane MJ, Engle RW. No evidence of intelligence improvement after working memory training: a randomized, placebo-controlled study. *Journal of Experimental Psychology: General* 2013; 142: 359-379.
 91. Harrison TL, Shipstead Z, Hicks KL, Hambrick DZ, Redick TS, Engle RW. Working memory training may increase working memory capacity but not fluid intelligence. *Psychological Science* 2013; 24: 2409-2419.
 92. Thompson TW, Waskom ML, Garel KL, Cardenas-Iniguez C, Reynolds GO, Winter R, Chang P, Pollard K, Lala N, Alvarez GA, Gabrieli JD. Failure of working memory training to enhance cognition or intelligence. *PLoS One* 2013; 8: e63614.
 93. Stephenson CL, Halpern DF. Improved matrix reasoning is limited to training on tasks with a visuospatial component. *Intelligence* 2013; 41: 341-357.
 94. Minear M, Brasher F, Guerrero CB, Brasher M, Moore A, Sukeena J. A simultaneous examination of two forms of working memory training: Evidence for near transfer only. *Memory and Cognition* 2016; 44: 1014-1037.
 95. Dahlin E, Nyberg L, Backman L, Neely AS. Plasticity of executive functioning in young and older adults: immediate training gains, transfer, and long-term maintenance. *Psychology and Aging* 2008; 23: 720-730.
 96. Borella E, Carretti B, Riboldi F, De Beni R. Working memory training in older adults: evidence of transfer and maintenance effects. *Psychology and Aging* 2010; 25: 767-778.
 97. Brehmer Y, Westerberg H, Backman L. Working-memory training in younger and older adults: training gains, transfer, and maintenance. *Frontiers in Human Neuroscience* 2012; 6: 63.
 98. Borella E, Carretti B, Cantarella A, Riboldi F, Zavagnin M, De Beni R. Benefits of Training Visuospatial Working Memory in Young-Old and Old-Old. *Developmental Psychology* 2014; 50 (3): 714-727.
 99. Lawlor-Savage L, Goghari VM. Dual N-Back Working Memory Training in Healthy Adults: A Randomized Comparison to Processing Speed Training. *PLoS One* 2016; 11: e0151817.
 100. Jaeggi SM, Studer B, Buschkuhl M, Su YF, Jonides J, Perrig WJ. Improving fluid intelligence. Single N-back is as effective as dual N-back (poster). 50th Annual Meeting of the Psychonomic Society; Boston, MA 2009.
 101. Sternberg RJ. Increasing fluid intelligence is possible after all. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A* 2008; 105: 6791-6792.
-

-
102. Li SC, Schmiedek F, Huxhold O, Rocke C, Smith J, Lindenberger U. Working memory plasticity in old age: practice gain, transfer, and maintenance. *Psychology and Aging* 2008; 23: 731-742.
 103. Moody DE. Can intelligence be increased by training on a task of working memory? *Intelligence* 2009; 37: 327-328.
 104. Salminen T, Strobach T, Schubert T. On the impacts of working memory training on executive functioning. *Frontiers in Human Neuroscience* 2012; 6: 166.
 105. Shao Z, Janse E, Visser K, Meyer AS. What do verbal fluency tasks measure? Predictors of verbal fluency performance in older adults. *Frontiers in Psychology* 2014; 5: 772.
 106. Petersen RC, Smith GE, Waring SC, Ivnik RJ, Tangalos EG, Kokmen E. Mild cognitive impairment: clinical characterization and outcome. *Archives of Neurology* 1999; 56: 303-308.
 107. Folstein MF, Folstein SE, McHugh PR. "Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research* 1975; 12: 189-198.
 108. Owen AM, McMillan KM, Laird AR, Bullmore E. N-back working memory paradigm: a meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping* 2005; 25: 46-59.
 109. Cohen JD, Forman SD, Braver TS, Casey BJ, Servan-Schreiber D, Noll DC. Activation of the prefrontal cortex in a nonspatial working memory task with functional MRI. *Human Brain Mapping* 1993; 1: 293-304.
 110. Jonides J, Schumacher EH, Smith EE, Lauber EJ, Awh E, Minoshima S, Koeppe RA. Verbal working memory load affects regional brain activation as measured by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1997; 9: 462-475.
 111. Strauss E, Sherman EMS, Spreen OA. *Compendium of Neuropsychological Tests: Administration, Norms, and Commentary* Oxford University Press, 2006.
 112. Süß HM. Eine Intelligenz- viele Intelligenzen? Neuere Intelligenztheorien im Widerstreit. *news&science. Begabtenförderung und Begabungsforschung (özbF)*. 2007; 15: 18-27.
 113. Süß H-M. Culture fair. In Kubinger K und Jäger RS: *Stichwörter der Psychologischen Diagnostik, Psychologie Verlags Union* 2003; 82 - 86.
 114. Raven JC, Court JH, Raven J. *Standard progressive matrices: Sets A, B, C, D, and E.* H.K.Lewis, 1977.
 115. Te Nijenhuis J, van Vianen, AEM, van der Flier H. Score gains on g-loaded tests: No g. *Intelligence* 2007; 35: 283-300.
 116. Horn W. *Leistungspruefssystem LPS.* Hogrefe, 1983; 2nd ed.
 117. Boerner K. *Das psychologische Gutachten - Ein praktischer Leitfaden.* Beltz Verlag, 2004; 7th ed.
 118. Lehrl S, Triebig G, Fischer B. Multiple choice vocabulary test MWT as a valid and short test to estimate premorbid intelligence. *Acta Neurologica Scandinavica* 1995; 91: 335-345.
 119. Wechsler D. *Wechsler memory scale - revised: Manual.* TX: The Psychological Corporation, 1987.
 120. Reitan RM. The relation of the trail making test to organic brain damage. *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 1955; 19: 393-394.
 121. Conway AR, Kane MJ, Engle RW. Working memory capacity and its relation to general intelligence. *Trends in Cognitive Sciences* 2003; 7: 547-552.
-

-
122. Karnath H-O, Sturm W. Störungen von Planungs- und Kontrollfunktionen. In Hartje W, Poeck K.: *Klinische Neuropsychologie*, Georg Thieme Verlag KG 2006: 393-411.
 123. Lezak MD. *Neuropsychological assessment*: Oxford University Press, 2004.
 124. La Rue A. *Aging and neuropsychological assessment*: Springer, 1992.
 125. Fisk JE, Sharp CA. Age-related impairment in executive functioning: updating, inhibition, shifting, and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 2004; 26: 874-890.
 126. Benton AL, Hamsher K deS, Sivan AB. *Multilingual Aphasia Examination*. TX: The Psychological Corporation, 1994, 3rd ed.
 127. Schwarb H, Nail J, Schumacher EH. Working memory training improves visual short-term memory capacity. *Psychological Research* 2015; 80: 128-148.
 128. Motulsky H. Multiple comparisons concepts. In *Intuitive Biostatistics: A Nonmathematical Guide to Statistical Thinking*. Oxford University Press 2010; 2: 157-168.
 129. Wilcox R. *Introduction to robust estimation and hypothesis testing*. Academic Press 2016.
 130. Bühner M, Ziegler M.: Verfahren zur Prüfung von Mittelwertsunterschieden bei mehr als zwei Gruppen. In: Studium P, ed. *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*, 2009.
 131. Girden ER. ANOVA: Repeated measures. *Sage university papers. Series on Quantitative applications in the social sciences* 1992; 07-084.
 132. Dahlin E, Neely AS, Larsson A, Backman L, Nyberg L. Transfer of learning after updating training mediated by the striatum. *Science* 2008; 320: 1510-1512.
 133. Takeuchi H, Sekiguchi A, Taki Y, Yokoyama S, Yomogida Y, Komuro N, Yamanouchi T, Suzuki S, Kawashima R. Training of working memory impacts structural connectivity. *Journal of Neuroscience* 2010; 30: 3297-3303.
 134. Jaeggi SM, Buschkuhl M, Perrig WJ, Meier B. The concurrent validity of the N-back task as a working memory measure. *Memory* 2010; 18: 394-412.
 135. Takeuchi H, Taki Y, Hashizume H, Sassa Y, Nagase T, Nouchi R, Kawashima R. Effects of training of processing speed on neural systems. *Journal of Neuroscience* 2011; 31: 12139-12148.
 136. Jarrold C, Towse JN. Individual differences in working memory. *Neuroscience* 2006; 139: 39-50.
 137. Unsworth N, Fukuda K, Awh E, Vogel EK. Working memory and fluid intelligence: capacity, attention control, and secondary memory retrieval. *Cognitive Psychology* 2014; 71: 1-26.
 138. Green CS, Bavelier D. Exercising your brain: a review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychology and Aging* 2008; 23: 692-701.
 139. Raven JC. *Advanced Progressive Matrices. Set II*. Oxford Psychologists Press, 1990.
 140. Soveri A, Antfolk J, Karlsson L, Salo B, Laine M. Working memory training revisited: A multi-level meta-analysis of n-back training studies. *Psychonomic Bulletin and Review* 2017; 24 (4): 1077-1096.
 141. Au J, Sheehan E, Tsai N, Duncan GJ, Buschkuhl M, Jaeggi SM. Improving fluid intelligence with training on working memory: a meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review* 2014; 22: 366-377.
 142. Melby-Lervag M, Redick TS, Hulme C. Working Memory Training Does Not Improve Performance on Measures of Intelligence or Other Measures of "Far Transfer": Evidence From a Meta-Analytic Review. *Perspectives on Psychological Science* 2016; 11: 512-534.
-

-
143. Karbach J, Verhaeghen P. Making working memory work: a meta-analysis of executive-control and working memory training in older adults. *Psychological Science* 2014; 25: 2027-2037.
 144. Takeuchi H, Kawashima R. Effects of processing speed training on cognitive functions and neural systems. *Reviews in the Neurosciences* 2012; 23: 289-301.
 145. Colom R, Quiroga MA, Shih PC, Martinez K, Burgaleta M, Martinez-Molina A, Roman FJ, Requena L, Ramirez I. Improvement in working memory is not related to increased intelligence scores. *Intelligence* 2010; 38: 497- 505.
 146. Dobbs AR, Rule BG. Adult age differences in working memory. *Psychology and Aging* 1989; 4: 500-503.
 147. Redick TS, Lindsey DR. Complex span and n-back measures of working memory: a meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review* 2013; 20: 1102-1113.
 148. Shipstead Z, Redick TS, Engle RW. Is working memory training effective? *Psychological Bulletin* 2012; 138: 628-654.
 149. Aben B, Stapert S, Blokland A. About the Distinction between Working Memory and Short-Term Memory. *Frontiers in Psychology* 2012; 3: 301.
 150. Von Bastian CC, Oberauer K. Effects and mechanisms of working memory training: a review. *Psychological Research* 2014; 78: 803-820.

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

„Ich, Stefanie Westphal (geb. Schulte), versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Effekte eines Arbeitsgedächtnistrainings auf fluide Intelligenz und weitere kognitive Funktionen im jungen und höheren Erwachsenenalter“ 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 und Resultaten entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden (siehe Publikationsverzeichnis) gemeinsamen Erklärung mit Prof. Dr. Dr. Heinz, 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

LEBENS LAUF

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

PUBLIKATIONSVERZEICHNIS

- 1) Schulte S, Barkema LW, Kardaun SH. Long-lasting atypical acneiform eruption with prominent comedones induced by hydroxocobalamin (vitamin B12). Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft 2014; 12: 502-3
- 2) Heinzl S, Schulte S, Onken J, Duong Q-L, Riemer TG, Heinz A, Kathmann N, Rapp MA. Working memory training improvements and gains in non-trained cognitive tasks in young and older adults: Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition 2014; 21: 146 - 173.
- 3) Heinzl S, Riemer TG, Schulte S, Onken J, Heinz A, Rapp MA. Catechol-O-methyltransferase (COMT) genotype affects age-related changes in plasticity in working memory: a pilot study. BioMed Research International 2014; 414351.

Anteilerklärung

Stefanie Westphal (geb. Schulte) hatte folgenden Anteil an der o.g. Publikation (2), welche - wie bereits im Vorwort erläutert- im Vergleich zu den Daten dieser Promotion, Daten einer leicht unterschiedlichen Stichprobe beinhaltet.

Für das Training wurde das n-back-Paradigma gemeinsam programmiert (Entwicklung der Level für das Training). Die Durchführung des Gedächtnistrainings und der neuropsychologischen Tests mit den jungen und älteren Probanden erfolgte teilweise durch S. Westphal. Die Datenauswertung mittels SPSS erfolgte teilweise gemeinsam mit S. Heinzl.

DANKSAGUNG

- Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr. Dr. Andreas Heinz für die Betreuung dieser Promotion.
- Ich danke ganz herzlich meinen beiden Doktorarbeitsbetreuern Prof. Dr. Dr. Michael Rapp und Prof. Dr. Stephan Heinzl für ihre konstruktive Begleitung, Geduld und Präsenz während der Ausarbeitung des Studiendesigns, der Testphase, Auswertung und Ausarbeitung der Dissertation.
- Ich danke meiner Kollegin Dr. Johanna Onken, die mich bei der Datenerhebung unterstützte und mit der ich mich gemeinsam in das Thema eingearbeitet habe.
- Des Weiteren möchte ich mich von Herzen bei meinem Ehemann Till für seine Unterstützung, Geduld, Motivation, konstruktive Kritik und nicht zuletzt für die Kinderbetreuung bedanken, die nötig war, um diese Promotion zu beenden.
- Ich bedanke mich bei meinem Vater, Dr. Joachim Schulte, meinem Onkel, Prof. Wolfgang Schulte, sowie meinen Freundinnen, Dr. Judith Enders und Dr. Rhea Röhl für die konstruktive Kritik und das Korrekturlesen dieser Promotionsarbeit sowie ihre Motivation.
- Danke an alle Familienangehörigen und Freunde, die an die Fertigstellung dieser Promotion geglaubt und diese in irgendeiner Weise unterstützt haben.
- Zuletzt möchte ich Miyake und Shah [31] zitieren, die mir bei der Einarbeitung in das Thema mit seinen zahlreichen Theorien und wenigen Fakten aus der Seele sprachen: “Attempts to figure out what characteristics working memory has and how it is organized by carefully reading these theoretical articles sometimes leave one even more confused than before. We ourselves experienced this frustration prior to editing this volume and would imagine that our frustration might be somewhat analogous to what Eysenck (1986) once felt about various psychometric theories of intelligence: “Discussions concerning the theory, nature, and measurement of intelligence historically have resulted more in disagreement than in agreement, more in smoke than in illumination” (). Many people might agree that this quote would continue to make sense if the phrase working memory were substituted for the word intelligence. Indeed, this suspicion has been confirmed by one embarrassing question repeatedly raised by different colleagues and students of ours, all aware of different conceptions of working memory: “What is working memory, anyway?””.