



Technische Universität München

Fakultät für Sport- und Gesundheitswissenschaft

Lehrstuhl für Sportpsychologie

Kognitive Reserve und Bewegung

Thomas Ritthaler

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Sport- und Gesundheitswissenschaft der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Philosophie

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.- Prof. Dr. Jörg Königstorfer
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.- Prof. Dr. Jürgen Beckmann
2. Univ.- Prof. Dr. Joachim Hermsdörfer

Die Dissertation wurde am 01.04.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät der Sport- und Gesundheitswissenschaft am 16.06.2014 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Vorwort	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Kognitive Herausforderungen über die Lebensspanne	8
2.1.1 Adoleszenz	8
2.1.2 Höheres Erwachsenenalter	10
2.1.3 Erfolgreiches Altern	12
2.2 Kognitive Reservekonzepte im Vergleich	13
2.2.1 Brain reserve	13
2.2.2 Cognitive Reserve	15
2.2.3 Brain maintenance	18
2.2.4 Rahmenkonzept von Lövdén	19
2.2.5 The scaffolding theory of aging and cognition (STAC)	20
2.2.6 Zusammenfassung und Einordnung	21
2.3 Messung der kognitiven Reserve: Testing the limits	22
2.4 Neurobiologische Wirkmechanismen kognitiver Reserve	23
2.4.1 Vaskuläre Veränderungen	24
2.4.2 Neurotransmitter	25
2.4.3 Neurotrophine	27
3 Forschungsstand: Körperliche Aktivität und Kognition	29
3.1 Adoleszenz	29
3.1.1 Strukturelle Befunde	30
3.1.2 Funktionelle Befunde	31
3.2 Höheres Erwachsenenalter	38
3.2.1 Strukturelle Befunde	39
3.2.2 Funktionelle Befunde	43

4 Fragestellung	48
5 Studie I: Adoleszenz	49
5.1 Untersuchungsdesign	49
5.2 Messinstrumente	49
5.2.1 Kognitive Reserve	49
5.2.2 Exekutive Funktionen	50
5.2.2.1 Inhibition: Inhib (WTS)	50
5.2.2.2 Interferenz: Farb-Wort-Test (NAI)	51
5.2.2.3 Kognitive Flexibilität: Flexibilität (TAP)	52
5.3 Teilnehmer und Ablauf	53
5.3.1 Teilstudie I: Tanztraining und kognitive Reserve	53
5.3.2 Teilstudie II: Kognitive Reserve bei jugendlichen Triathleten	54
5.3.3 Teilstudie III: Kognitive Reserve im Jugendfußball	54
5.3.4 Teilstudie IV: Jugendbasketball und kognitive Reserve	55
5.3.5 Teilstudie V: Kognitive Reserve bei jugendlichen Gymnasiastinnen	55
5.3.6 Zusammengesetzte Gesamtstichprobe	56
5.4 Hypothesen	57
5.4.1 Hypothese 1: Kognitive Reserve	57
5.4.2 Hypothese 2: Exekutive Funktionen	58
5.4.3 Hypothese 3: Schulkontext	59
5.5 Ergebnisse	59
5.5.1 Hinweise zur Datenauswertung	59
5.5.2 Teilstudienvergleich und Kontrollvariablen	60
5.5.2.1 Vergleich der Teilstudien	60
5.5.2.2 Kontrollvariablen Gesamtstichprobe	61
5.5.2.3 Kontrollvariablen Schulart	61
5.5.2.4 Kontrollvariablen Gymnasiasten	62
5.5.2.5 Kontrollvariablen Sportart	62
5.5.3 Hypothese 1: Kognitive Reserve	63
5.5.3.1 Gesamtstichprobe	63
5.5.3.2 Gymnasiasten	66
5.5.3.3 Ausgewählte Sportarten	69

5.5.4 Hypothese 2: Exekutive Funktionen	70
5.5.4.1 Gesamtstichprobe	70
5.5.4.2 Gymnasiasten	73
5.5.4.3 Ausgewählte Sportarten	74
5.5.5 Hypothese 3: Schulkontext	75
5.5.5.1 Zusammenhang von kognitiver Reserve und Schulnote	75
5.5.5.2 Schulnoten und körperlich-sportliche Aktivität	76
5.5.6 Weiterführende Korrelationsmaße	78
5.6 Diskussion Studie I	79
6 Studie II: Höheres Erwachsenenalter	87
6.1 Untersuchungsdesign	87
6.2 Messinstrumente	87
6.2.1 Kognitive Reserve	87
6.2.2 Exekutive Funktionen: zusätzliche Verfahren	88
6.2.2.1 Inhibition: Go/Nogo (TAP)	88
6.2.2.2 Arbeitsgedächtnis: Auditive Zahlenspannen (WMS-R)	88
6.2.3 Weitere kognitive Ergebnismaße	89
6.2.3.1 Fluide Intelligenz: Matrizen (WIE)	89
6.2.3.2 Tonische Alertness (TAP)	89
6.2.3.3 Konzentrationsleistung:	
Selektive visuelle Aufmerksamkeit (d2)	90
6.2.4 Physiologische Kennwerte	90
6.2.4.1 Kardiorespiratorische Fitness	90
6.2.4.2 Lungenfunktion (PEF und FEV ₁)	92
6.2.4.3 Greifkraft	92
6.2.5 Fragebogenmaße	92
6.2.5.1 Depressive Symptomatik (ADS-K)	92
6.2.5.2 Typisches intellektuelles Engagement (TIE)	93
6.2.5.3 Selbstbestimmtheit	93
6.2.5.4 Lebenszufriedenheit (FTL)	94
6.2.5.5 Persönlichkeit (BFI-K)	94
6.3 Teilnehmer und Ablauf	95
6.3.1 Teilnehmer Sportlergruppe	95

6.3.2 Teilnehmer Vergleichsgruppe	96
6.3.3 Untersuchungsablauf	97
6.4 Hypothesen	99
6.4.1 Hypothese 4: Sportler- und Vergleichsgruppe	99
6.4.2 Hypothese 5: Sportlergruppen im Altersvergleich	100
6.5 Ergebnisse	100
6.5.1 Hinweise zur Datenauswertung	100
6.5.2 Sportler- und Vergleichsgruppe	101
6.5.2.1 Kontrollvariable: Körperlich-sportliche Aktivität	101
6.5.2.2 Weitere relevante Kontrollvariablen	103
6.5.2.3 Hypothese 4: Sportler- und Vergleichsgruppe	104
6.5.2.3.1 Kognitive Reserve	104
6.5.2.3.2 Kognitive Kennwerte	106
6.5.3 Sportlergruppen	107
6.5.3.1 Kontrollvariablen: Intelligenz, Bildung, Depression	107
6.5.3.2 Kontrollvariable: Aktivitätsniveau	108
6.5.3.3 Kontrollvariablen: Fragebogenmaße	109
6.5.3.4 Kontrollvariable: Medikation	111
6.5.3.5 Hypothese 5: Sportlergruppen	111
6.5.3.5.1 Kognitive Reserve	111
6.5.3.5.2 Exekutive Funktionen	114
6.5.3.5.3 Verarbeitungsgeschwindigkeit und Konzentration	116
6.5.3.6 Weiterführende Korrelationsmaße	117
6.5.3.6.1 Einordnung des Reservekonstruktes	117
6.5.3.6.2 Ausgewählte Korrelationen	118
6.6 Diskussion Studie II	118
7 Abschlussdiskussion	127
8 Zusammenfassung	138
Literaturverzeichnis	139
Anhang	

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Jürgen Beckmann bedanken, der mich und meine Forschungsvision an seinem Lehrstuhl sehr willkommen geheißen hat. Auch in schwierigen Phasen meines Vorhabens verstand er es bestens mich immer wieder neu zu bestärken. Neben seiner kompetenten fachlichen Unterstützung ermöglichte er mir verschiedene sehr hilfreiche Gelegenheiten, den Fortgang meiner Arbeit öffentlich präsentieren und diskutieren zu können.

Mein herzlicher Dank gilt überdies meinem Zweitgutachter Prof. Dr. Joachim Hermsdörfer für seine Zeit und seinen fachlichen Rat. Seine unkomplizierte Unterstützung half mir über den gesamten Entstehungsprozess der Arbeit hinweg, konzeptionelle Klarheit zu erreichen und diese aufrechtzuerhalten.

Ein sehr wichtiges Anliegen ist es mir, den engagierten und für die vorliegende Arbeit so wertvollen Lektoren Dr. Kathrin Martin, Dr. Peter Gröpel und Dr. Kai Engbert zu danken: Liebe Kathrin, lieber Peter, lieber Kai, vielen, vielen Dank für Eure Zeit und Eure Mühe!

Weiterhin besonders erwähnenswert ist für mich die außergewöhnliche Unterstützung durch die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Sportpsychologie: Herzlichen Dank an Andrea, Christoph, Eva und Felix für die unzähligen Gespräche, Euer eingebrachtes Fachwissen und Eure konstruktive Kritik!

Last but not least gilt mein Dank Tom-Nicolas Kossak und meiner Familie, ohne deren Unterstützung diese Arbeit niemals entstanden wäre. Danke...

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Anteriorer cingulärer Cortex
ADHS	Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung
ADS-K	Allgemeinen Depressionsskala (Kurzform)
APOE- ϵ 4	Apolipoprotein E- ϵ 4
BDNF	Brain-derived neurotrophic factor
BFI-K	Kurzversion des Big Five Inventory
BM	Brain maintenance
BR	Brain reserve
CBF	Cerebral blood flow
CR	Cognitive reserve
CRUNCH	Compensation-related utilization of neural circuits hypothesis
DMN	Default Mode Network
DTI	Diffusions-Tensor-Imaging
EEG	Elektroenzephalografie
EKP	Ereigniskorreliertes Potential
ERN	Error-related negativity potential
FBI	Feedback-Individualsportart
FBM	Feedback-Mannschaftssportart
FEV ₁	Forced Expiratory Volume in 1 second
FLW	Flow-Sportart
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomographie
fNIRS	Funktioneller Nahinfrarotspektroskopie
FTL	Fragebogen zur temporalen Lebenszufriedenheit
GOLDEN aging	Growing of lifelong differences explains normal aging
IGF	Insulin-like growth factor
Jahre/Sport	Anzahl der Jahre seit Beginn der Sportausübung
LTP	Long-term potentiation
MRT	Magnetresonanztomographie
mRNA	Messenger RNA
NAI	Nürnberger-Alters-Inventar
NC	Neural compensation

NT-3	Neurotrophin-3
NT-4/5	Neurotrophin-4/5
NGF	Nerve growth factor
NMDA	N-Methyl-D-Aspartat
NR	Neural reserve
NR2A	Untereinheit des NMDA-Rezeptors
P300, P3	Spannungsschwankung positiver Polarität 300 ms nach dem Reiz
PEF	Peak Expiratory Flow
Pb	Proband(en)
SD	Standardabweichung
Sport/Woche	Umfang der sportlichen Aktivität pro Woche in Stunden
SSRT	Stop-Signal Reaction-Time
STAC	Scaffolding theory of aging and cognition
TAP	Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung
TIE	Typisches intellektuelles Engagement
ÜG	Übungsgewinn
VEGF	Vascular endothelial growth factor
VO ₂	Maximale Sauerstoffaufnahme
WIE	Wechsler Intelligenztest für Erwachsene
WHO	World Health Organization
WMS-R	Wechsler Memory Scale (Revised Edition, deutsche Adaptation)
WTS	Wiener Testsystems
ZST	Zahlen-Symbol-Test

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Schwellenwert- oder BR-Modell (Stern, 2002 abgeleitet von Satz, 1993)	14
Abbildung 2: Das CR-Modell (Stern, 2002)	16
Abbildung 3: Mittlerer Übungsgewinn und Standardfehler von Sportlern und Nichtsportlern der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach besuchter Schulart	63
Abbildung 4: Leistungsverläufe der Sportler- und Nichtsportler	64
Abbildung 5: Leistungsverläufe differenziert nach besuchter Schulart	64
Abbildung 6: Leistungsverläufe sportlich aktiver und inaktiver Gymnasiasten	67
Abbildung 7: Mittlerer Übungsgewinn und Standardfehler ausgewählter Sportarten	69
Abbildung 8: Mittlere Schulnote und Standardfehler im Fach Mathematik der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach Schulart	76
Abbildung 9: Mittlere Schulnote und Standardfehler im Fach Deutsch der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach Schulart	76
Abbildung 10: Mittlere Schulnote und Standardfehler im Fach Musik der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach Schulart	77
Abbildung 11: Leistungsverläufe der Sportler- und Vergleichsgruppe im ZST	104
Abbildung 12: Übungsgewinne der Sportler- und Vergleichsgruppe im ZST	106
Abbildung 13: Anzahl der Probanden in der jeweiligen Aktivitätskategorie differenziert nach Sportlergruppe	109
Abbildung 14: Mittlerer Übungsgewinn und berechenbare Standardfehler der Sportler(alters)gruppen und der Vergleichsgruppe	111
Abbildung 15: Leistungsverläufe der drei Sportlergruppen mit Vergleichsgruppe im ZST	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Deskriptive Statistik der 5 Teilstudien	53
Tabelle 2:	Deskriptive Statistik der kombinierten Gesamtstichprobe	56
Tabelle 3:	Deskriptive Statistik ausgewählter Sportarten	57
Tabelle 4:	Deskriptive Statistik des Übungsgewinns sowie exekutiver Ergebnismaße der 5 Teilstudien	60
Tabelle 5:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für die Messung der kognitiven Reserve in der Gesamtstichprobe	65
Tabelle 6:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für die Messung der kognitiven Reserve bei Gymnasiasten	68
Tabelle 7:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit der Gesamtstichprobe	71
Tabelle 8:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit im Schulartenvergleich	72
Tabelle 9:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit der Gymnasiasten	73
Tabelle 10:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit ausgewählter Sportarten	74
Tabelle 11:	Soziodemografische Charakteristika der Sportlergruppe. Darstellung als Mittelwerte (Standardabweichung) oder prozentuale (absolute) Häufigkeiten	95
Tabelle 12:	Weitere deskriptive Daten der Sportlergruppe. Darstellung als Mittelwerte (Standardabweichung) oder prozentuale (absolute) Häufigkeiten	96
Tabelle 13:	Soziodemografische Charakteristika und deskriptive Daten der Sportlerteilstichproben. Darstellung als Mittelwerte (Standardabweichung) oder prozentuale (absolute) Häufigkeiten	97

Tabelle 14:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche physiologischer Kennwerte der Sportlergruppe getrennt nach Altersklassen und Geschlecht	102
Tabelle 15:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportler- und Vergleichsgruppe für Alter, fluide Intelligenz, Bildung und Depression	103
Tabelle 16:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportler- und Vergleichsgruppe für die Messung der kognitiven Reserve	105
Tabelle 17:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportler- und Vergleichsgruppe für Arbeitsgedächtnis, Konzentration und Verarbeitungsgeschwindigkeit	107
Tabelle 18:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportlerteilstichproben für fluide Intelligenz, Bildung und Depression	108
Tabelle 19:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportlerteilstichproben für typisches intellektuelles Engagement, Selbstbestimmtheit, Lebenszufriedenheit und Persönlichkeit	110
Tabelle 20:	Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportlerteilstichproben für die Messung der kognitiven Reserve	113
Tabelle 21:	Deskriptive Statistik, Mittelwertvergleiche und Prozentrangangaben der Sportlerteilstichproben für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Arbeitsgedächtnis	115
Tabelle 22:	Deskriptive Statistik, Mittelwertvergleiche und Prozentrangangaben der Sportlerteilstichproben für Verarbeitungs- geschwindigkeit, Aufmerksamkeitsaktivierung und Konzentration	116

1 Einleitung

„Nichts ist so beständig wie der Wandel“

(Heraklit von Ephesus)

Vor etwa 10.000 Jahren verwandelten sich europäische Jäger- und Sammlergemeinschaften in Agrar- und Weidengesellschaften. Dieser Übergang vom mobilen Leben als Jäger, Sammler und Fischer hin zum sesshaften Bauern veränderte zum ersten Mal grundlegend die Lebensweise des Homo sapiens seit seiner Entstehung vor über 150.000 Jahren (Reichholf, 2008). Unzählige Entwicklungen und Erfindungen in den darauffolgenden Jahrtausenden ließen die Produktivität der Agrargesellschaften enorm ansteigen und nötigten gleichzeitig den Menschen massive Anpassungen ihrer Lebensweise ab (Osterhammel, 2009). Die Industrialisierung der Landwirtschaft schritt voran. Agrargesellschaften wandelten sich ab dem Ende des 18. Jahrhunderts durch Mechanisierung, Elektrifizierung und Chemisierung menschlicher Arbeit und natürlicher Rohstoffe zu klassischen Industriegesellschaften (Kübler, 2009). Die Bevölkerungszahl und das Tempo der technischen und wissenschaftlichen Entwicklung explodierten. Es entstand ein technisierter Industrialismus (Gehlen, 1961) mit erneut gewaltigen Herausforderungen für die Anpassungsfähigkeit der Menschen, um tiefgreifende Veränderungen in bis dahin bestehende Arbeits- und Lebensumstände zu integrieren (Brock, 2012). Heute ist die traditionelle Industriegesellschaft für unser Leben nicht mehr allein prägend. Gegenwärtig verlangen zwei neue dynamische Entwicklungen den Menschen ein hohes Maß an Anpassungsleistung ab: Einerseits entstehen permanent neue Dienstleistungen in den Sektoren Handel, Verwaltung, Forschung und Entwicklung sowie personenbezogene Aufgaben in den Bereichen Bildung, Gesundheit und soziale Arbeit, die eine hohe Bereitschaft für Aus- und Weiterbildung sowie ein großes Lernpotential erfordern. Zum anderen verändern die explosionsartige Entwicklung der Informationstechnologien und der Medienlandschaft sowie die Verwissenschaftlichung aller Lebensbereiche ständig unsere Lebenswirklichkeit (Kübler, 2009). Angesichts des Wesens dieser Veränderungen wird gerne vom Wandel der modernen Industriegesellschaft

hin zu einer Informations- oder Wissensgesellschaft gesprochen (Danyel, 2012; Engelhardt, 2010). Festzuhalten bleibt, dass unsere alltäglichen Tätigkeiten immer mehr von Informationstechnologien beeinflusst werden und die Produktionsmenge immaterieller Güter, sprich Information, immer weiter anwächst (Kübler, 2009). Das vielleicht prägnanteste Charakteristikum der derzeitigen gesellschaftlichen Entwicklung ist die enorme Vermehrung, Beschleunigung, Verdichtung und Globalisierung unserer Kommunikation (Münch, 1991).

Wenn sich menschliche Gesellschaften, wie dargestellt und auch von Kübler (2009) angemerkt, mal in heftigerem oder auffälligerem, mal in gemächlichem oder auch latenten, aber grundsätzlich in stetem Wandel befinden, drängt sich die Frage auf, ob die derzeit beobachtbare Entwicklung hin zu einer Gesellschaftsform mit überragender Bedeutung von Information und Wissen sich überhaupt von früheren unterscheidet und zu welchen Ergebnissen das führt. Zur näheren Betrachtung dieser Entwicklung bieten sich zwei mögliche Ansatzpunkte. Einerseits haben sich die Anforderungen in unserer modernen Gesellschaft ebenso verändert, wie andererseits die damit verknüpften gesellschaftlichen Kontextbedingungen. In nahezu allen Bereichen unseres Lebens fanden in den letzten Jahrzehnten bedeutende Veränderungen statt. Die Lern- und Ausbildungssituation von Kindern und Jugendlichen hat sich verändert. Die Lage auf dem Arbeitsmarkt erfordert eine außergewöhnlich hohe Bereitschaft für Aus- und Weiterbildung, räumliche Mobilität sowie lebenslanges Lernen (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2013c). Mikroelektronik verändert grundlegend die berufliche wie auch private Lebenswirklichkeit jedes Einzelnen. Soziale Netzwerke wie Facebook oder Xing wachsen exponentiell. Neben der traditionellen Normfamilie entwickelten sich alternative Familienformen wie beispielsweise die Patchwork-, Regenbogen- oder auch Mehrgenerationenfamilie (Beck, 1986). Wir leben in einer multikulturellen Gesellschaft (Rommelspacher, 2002), in der sich das Tempo technischer Innovationen unaufhaltsam zu steigern scheint (Kübler, 2009). Globale Phänomene wie Umweltzerstörung, Klimawandel, Finanz- und auch Demokratiekrise gestalten die moderne Gesellschaft ständig um (Beck, 2007). Diese Beispiele verdeutlichen in welchem kurzem Zeitraum, verglichen mit den zeitlichen Dimensionen vorheriger Veränderungen gleichen Ausmaßes, sich die Anforderungen in unserer Gesellschaft zum Teil fundamental gewandelt haben und dem modernen Menschen eine außergewöhnlich große Anpassungs- und Lernfähigkeit abverlangen.

Zwei evidente Entwicklungen der heutigen Gesellschaft sind mit den dargestellten hohen Anforderungen eng verknüpft und stellen möglicherweise ungünstige Kontextbedingungen für die hohen Herausforderungen an die Lern- und Anpassungsfähigkeit dar. Die stetig steigende Lebenserwartung auf der einen Seite und der zunehmende Bewegungsmangel mit seinen gesundheitlichen Folgeerscheinungen andererseits, sind moderne und in diesem Ausmaß noch nie dagewesene Zivilisationsphänomene, die unsere Gesellschaft zukünftig vor große, auch die Lern- und Anpassungsfähigkeit betreffende Herausforderungen stellen werden.

Die prognostizierte demografische Entwicklung der kommenden Dekaden wird in vielen Ländern der Erde die Bevölkerungsstruktur verändern (United Nation, 2002). Im Jahr 2008 lebten in Deutschland etwa 4 Millionen Menschen die 80 Jahre oder älter waren, was 5 Prozent der Bevölkerung entsprach. Nach der im Jahr 2009 erstellten 12. Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes wird sich dieser Anteil bis zum Jahr 2060 mehr als verdoppeln: 9 Millionen Hochbetagte – das sind 14 Prozent der deutschen Bevölkerung – werden dann 80 Jahre oder älter sein. Zudem wird die Lebenserwartung weiter steigen. Können im Jahr 2008 geborene Frauen (Männer) mit durchschnittlich 82.4 (77.2) Lebensjahren rechnen, werden im Jahre 2060 geborene Frauen (Männer) im Mittel nochmal 6.8 (7.8) Jahre älter (Statistisches Bundesamt, 2009).

Die zweite Entwicklung betrifft die Bewegungssituation der Menschen. Der technologische Fortschritt steht in engem Zusammenhang mit zunehmend sitzenden Aktivitäten sowohl im Beruf als auch in der Freizeit (Ng & Popkin, 2012). Weltweit sind über 31 Prozent der Erwachsenen (15 Jahre und älter) körperlich inaktiv. Dieser Anteil wächst mit steigendem durchschnittlichem Einkommen. Führen in Südostasien durchschnittlich 17 Prozent ein bewegungsarmes Leben, liegt der Prozentsatz körperlich inaktiver Menschen mit 35 Prozent in Europa und sogar 43 Prozent in Amerika deutlich höher. Differenziert man nach dem Lebensalter, so sind 80 Prozent der Jugendlichen zwischen 13 und 15 Jahren weltweit weniger als eine Stunde am Tag körperlich aktiv, wohingegen bei der Altersgruppe der über 60-Jährigen der Anteil der körperlich Inaktiven zwischen 40 Prozent in Afrika und über 60 Prozent in Amerika liegt (Hallal et al., 2012).

Aber wie ist nun die offensichtlich gerade in der heutigen Zeit eminent wichtige Lern- und Anpassungsfähigkeit mit der demografischen Entwicklung und der körperlichen Aktivität der Menschen verknüpft? Die Notwendigkeit sich lebenslang möglichst erfolgreich dem

ständig stattfindenden Wandel anzupassen, erfordert lebenslange Lernprozesse und damit kognitive Plastizität. Unter kognitiver Plastizität oder auch kognitiver Reserve (Stern, 2002) versteht man das latente kognitive Leistungspotential des Menschen mit der Fähigkeit neuronale Netze effizient und flexibel zu nutzen – oder allgemeiner – die Lern- und Anpassungsfähigkeit des zentralen Nervensystems in Abhängigkeit von seiner Verwendung (Martin & Kliegel, 2010). Grundsätzlich bedeutet Lernen eine Zustandsveränderung des Gehirns, die ausnahmslos durch Interaktionen der sich verändernden physikalischen und kulturellen Umwelt mit dem Verhalten ausgelöst wird (Lindenberger, Li, & Bäckman, 2006). Evolutionär betrachtet sicherten (neu)gelernte und erfolgreich erprobte Verhaltensweisen, wie schon weiter oben dargestellt, die Anpassung und damit das Überleben im jeweils neuen Kontext. Somit ist Lernfähigkeit als Ausdruck der kognitiven Reserve, für den Menschen von existentieller Bedeutung. Einerseits ermöglicht sie uns, das eigene Verhalten kurzfristig und flexibel so anzupassen, dass wir jederzeit adäquat in einer bestimmten Situation reagieren können. Andererseits ist Lernen eben auch die entscheidende Voraussetzung, langfristig günstige und hilfreiche Verhaltensmuster aufzubauen (Lindenberger, et al., 2006).

Erfolgreiche Lernprozesse werden von den sogenannten exekutiven Funktionen und den damit in Verbindung stehenden frontalen Gehirnregionen organisiert (Karnath, 2003). Oberbegriffe wie „Exekutive Funktionen“ oder auch „Kognitive Kontrolle“ versuchen die vielfältigen Leistungen des präfrontalen Kortex zu fassen. Die Entwicklung von Problemlösestrategien, die Aufmerksamkeitssteuerung, die Organisation abstrakter Denkprozesse, die Handlungsplanung, die Ausführung und zeitliche Strukturierung einer Aufgabe, die Erkennung von Fehlern und deren Korrektur sowie eben auch die Organisation von Lern- und Anpassungsprozessen sind Leistungen dieses Systems (Andreasen, 2002; Baddeley & Sala, 1998; Carlson, 2003; Robbins, 1998; Roberts, Robbins, & Weiskrantz, 1998). In einer „Gesellschaft des langen Lebens“ wird es zukünftig immer mehr alte und sehr alte Menschen geben, bei denen aufgrund altersbedingter struktureller Veränderungen mit kognitiven Beeinträchtigungen gerechnet werden muss. Dieser mögliche Abbau funktionseller Kapazität verläuft inter- aber auch intraindividuell sehr unterschiedlich. Aus den asynchronen Alterungsverläufen der verschiedenen Hirnregionen ergeben sich unterschiedliche Zeitprofile für das Nachlassen spezifischer kognitiver Leistungen. Während kognitive Leistungen, die in hohem Maße auf lebenslang verwendetem Wissen und auf geübten Fertig-

keiten (Routinen) beruhen, vergleichsweise alterungsresistent bleiben, zeigen wissensunabhängige basale kognitive Funktionen wie beispielsweise die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung einen deutlichen altersbedingten Abbau (vgl. Baltes, Staudinger, & Lindenberger, 1999; Christensen, Henderson, Griffiths, & Levings, 1997; McArdle, Ferrer-Caja, Hamagami, & Woodcock, 2002; Park, Polk, Mikels, Taylor, & Marshuetz, 2001; Park & Reuter-Lorenz, 2009; Rabbitt & Lowe, 2000; Schaie, 2005). Die für Lern- und Anpassungsprozesse so wichtigen exekutiven Funktionen unterliegen im Alter einem unverhältnismäßig starken Abbau (Jurado & Rosselli, 2007; Kramer et al., 1999). Vor diesem Hintergrund wird deutlich, warum sich das Forschungsinteresse zunehmend auf die Grundlagen kognitiver Plastizität und deren Erhalt richtet (Greenwood, 2007; Lustig, Shah, Seidler, & Reuter-Lorenz, 2009).

Ein möglicher und bisher noch immer unterschätzter Einflussfaktor auf die Kognition ist körperlich-sportliche Aktivität, die diametral zum Alter zu wirken scheint. Seit den Studien von Colcombe, et al. (2003; 2004), die zum ersten Mal den positiven Zusammenhang von kardiorespiratorischer Fitness und Gehirnstruktur sowie kognitiver Leistung zeigen konnten, mehren sich verstärkt die Hinweise, dass körperliche Aktivität eine effektive Methode zu sein scheint, um Gesundheit und Funktionsfähigkeit des Gehirns auch im fortgeschrittenen Alter positiv zu beeinflussen (vgl. Kapitel 3: Forschungsstand). Die Leistungsfähigkeit des Gehirns ist selbstredend nicht nur im fortgeschrittenen Alter von entscheidender Bedeutung. Sie ist die notwendige Voraussetzung für jede Lern- und Anpassungsleistung in allen Phasen des Lebens. Die Forschung hat sich bislang mehrheitlich auf den Zusammenhang von Bewegung und absoluter Leistung in den verschiedenen Teilbereichen der Kognition konzentriert (vgl. Kapitel 3). Das Ausmaß des Veränderungspotentials im Rahmen von Lern- und Anpassungsleistungen, die kognitive Reserve, wird dabei zumeist nicht erfasst. Ziel der vorliegenden Dissertation ist es deshalb, explizit den Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und kognitiver Reserve zu thematisieren, wobei der Begriff „Kognitive Reserve“ hierbei für das Ausmaß an kognitiver Plastizität und damit Lern- oder Anpassungsfähigkeit steht (Stern, 2013). Dafür werden zwei empirische Grundlagenstudien mit Teilnehmern im Schulkind- sowie höheren Erwachsenenalter durchgeführt, um jene beiden Altersbereiche zu erfassen, in denen sich die stärkste strukturelle und damit in enger Verbindung stehende funktionelle Veränderungsdynamik zeigt (Sowell et al., 2003). Die positive Wirkung von körperlich-sportlicher Aktivität auf

die verschiedenen Zivilisationskrankheiten ist bekannt. Bei diesen empirischen Datenerhebungen geht es darum, weitere belastbare Hinweise zu erhalten, ob Bewegung sowohl für den Aufbau von Lern- und Anpassungsfähigkeit im Schulkindalter als Voraussetzung für das weitere Leben, als auch für den Erhalt dieser Fähigkeiten mit fortschreitendem Alter, einen Beitrag leisten kann. Es soll untersucht werden, ob es möglicherweise hilfreich sein könnte, zukünftig die derzeitige Entwicklung hin zu immer weniger körperlicher Aktivität zu stoppen und die beim Menschen sehr enge Koppelung von Bewegung und Kognition wieder stärker zu fördern (vgl. Sibley & Etnier, 2003; Thelen, 2000).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Menschen in sich stetig verändernden Gesellschaften nur durch Lernen und Anpassung ihr Überleben sichern können. In der gegenwärtigen Gesellschaft, in der sich die Menschen körperlich immer weniger bewegen, gleichzeitig aber auch immer älter werden, ist die Menge der aufzunehmenden, zu filternden und zu integrierenden Informationen, das Tempo und die Frequenz der Innovationen sowie die Zeitdauer, in der wir durch eine verlängerte Lebensarbeitszeit und eine insgesamt höhere Lebenserwartung wandlungsfähig bleiben müssen, deutlich angestiegen. Dies stellt eine außergewöhnliche Herausforderung für unsere Fähigkeit uns anzupassen und Neues zu lernen dar. Der Erhalt von Lern- und Anpassungsfähigkeit in einer Gesellschaft, deren Antriebsmotor die Information zu sein scheint, ist somit heutzutage so relevant wie niemals zuvor (Kübler, 2009). Empirische Evidenz aus den Bereichen des Lernens und Gedächtnisses lassen erwarten, dass körperlich-sportliche Bewegung auch positive Wirkung auf die kognitive Reserve haben könnte. Deshalb soll in zwei Studien mit Schulkindern sowie älteren Erwachsenen herausgefunden werden, ob Bewegung tatsächlich einen hilfreichen Beitrag leisten kann, die kognitive Reserve und damit die Möglichkeiten zur Anpassung an aktuelle Anforderungen in unserer Gesellschaft zu vergrößern.

2 Theoretische Grundlagen

Angesichts der zuvor geschilderten Veränderungen in unserer modernen Gesellschaft ist neben dem Aspekt der absoluten Leistungsfähigkeit in den unterschiedlichen Bereichen der Kognition auch die Lern- und Anpassungsfähigkeit und deren Erhalt wichtig. Lernfähigkeit als Ausdruck kognitiver Reserve ist die Fähigkeit, relevante Informationen speichern und nutzen zu können. Sie ermöglicht den Erwerb von neuen Kenntnissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten, was sowohl intentional als auch beiläufig geschehen kann (Pritzel, Brand, & Markowitsch, 2003). Das Ausmaß der Lernfähigkeit wird in dieser Arbeit als Lernpotential unter herausfordernden Bedingungen oder kognitive Reserve bezeichnet und definiert den Rahmen, in dem gewünschte und notwendige Anpassungsleistungen realisiert werden können. Das Lernpotential ist damit Kennwert für die Leistungsfähigkeit des Lernprozesses und Indikator für das Ausmaß der kognitiven Reserve als protektiver Faktor für die Anpassungsfähigkeit. Je größer das Lernpotential, desto ausgeprägter die Fähigkeit zu Lernen und desto größer die kognitive Reserve. Das Wort „Reserve“ stammt ursprünglich aus dem Französischen und bedeutet, „etwas, was für den Bedarfs- oder Notfall vorsorglich zurückbehalten, angesammelt wird“ (*Die deutsche Rechtschreibung*, 2013). Diese Definition umfasst sowohl den Aspekt etwas bereits Vorhandenes zu be- oder erhalten, als auch die Möglichkeit Neues aufzubauen – beide jeweils mit dem Ziel auf neue Herausforderungen vorbereitet zu sein.

Zunächst ein kurzer Ausblick auf das folgende Kapitel: Die beiden ersten Abschnitte orientieren sich an der Definition des Wortes „Reserve“ und den dort genannten Teilaspekten. Während zunächst die besonderen kognitiven Herausforderungen zweier wichtiger Lebensphasen skizziert werden, erfolgt im zweiten Abschnitt die Vorstellung und Verknüpfung relevanter theoretischer Reservekonzepte. Hieraus begründet sich die Wahl des methodischen Ansatzes, der zusammen mit seinem theoretischen Hintergrund im dritten Abschnitt beschrieben wird. Inhalt des vierten und letzten Abschnittes ist die Darstellung grundsätzlicher Wirkmechanismen kognitiver Reserve insbesondere in Zusammenhang mit körperlich-sportlicher Aktivität.

2.1 Kognitive Herausforderungen über die Lebensspanne

Im ersten Kapitel war überwiegend von wechselnden Umweltbedingungen die Rede, auf die der Mensch idealerweise mit adäquaten Verhaltensänderungen reagiert. Neben solchen durch die Außenwelt initiierten und u.a. von Lindenberger et al. (2006) als Lernen bezeichneten Zustandsveränderungen des Gehirns, gibt es umgekehrt spezifische Umstände, die unmittelbar die Funktionsfähigkeit des Gehirns verändern. Hier sind einerseits Entwicklungs- und Alterungsprozesse, sowie andererseits Hirninfarkte, -blutungen sowie Schädel-Hirn-Traumata mit zum Teil drastischen Folgen für das Gehirn zu nennen. In Folge solcher Umstände sind in der Regel immense Anpassungsleistungen erforderlich, um möglichst einen stabilen Funktionszustand wiederherzustellen. Letztgenannte Herausforderungen werden in dieser Arbeit nicht thematisiert. Vielmehr geht es um jene kognitiven Herausforderungen, mit denen jeder gesunde Mensch im Verlauf seines Lebens konfrontiert wird: Kognitive Herausforderungen im Schulkind- (Adoleszenz) und höheren Erwachsenenalter (etwa ab dem sechsten Lebensjahrzehnt), die aufgrund „normaler“ Reifungs- und Alterungsprozesse entstehen. In diesen Zeiträumen zeigen sich strukturelle und funktionale Veränderungen des Gehirns besonders deutlich (Park & Reuter-Lorenz, 2009; Sowell, et al., 2003).

2.1.1 Adoleszenz

Die Adoleszenz bezeichnet laut Definition der Weltgesundheitsorganisation (WHO) den Zeitabschnitt zwischen dem 10. und 20. Lebensjahr. Diese Entwicklungsphase des Menschen zwischen später Kindheit (Pubertät) und jungem Erwachsenenalter umfasst sowohl die physischen Veränderungen zum geschlechtsreifen Menschen, als auch die psychische Entwicklung zum selbstständigen Erwachsenen (Konrad, Firk, & Uhlhaas, 2013). Neben starken hormonellen Veränderungen, die schnelles körperliches Wachstum, die Ausdifferenzierung des Körperbaus sowie sexuelle Reifung auslösen, müssen weitere wichtige Entwicklungsaufgaben, die eigene Identität und das Selbst betreffend, gemeistert werden (Forbes & Dahl, 2010). Dazu gehören neben der Ausbildung von sozialer Kompetenz und der Fähigkeit zur Aufnahme intimer Beziehungen auch der Aufbau von Selbstwirksamkeitsüberzeugung, Selbstsicherheit, Selbstbewusstsein sowie nicht zuletzt Selbstkontrolle (Anderson, 2002; Blakemore & Choudhury, 2006; Crone & Dahl, 2012).

Die rasante Entwicklung der Neurowissenschaften in den letzten Jahren hat zu einer Fülle von wichtigen Erkenntnissen hinsichtlich der Pubertät geführt. Nach heutigem Stand der Forschung kann davon ausgegangen werden, dass die Umbau- und Reorganisationsprozesse während der Adoleszenz noch tiefgreifender und bedeutender sind, als bisher angenommen (Giedd & Rapoport, 2010). Neuropsychologische Forschungsbefunde aus struktureller und auch funktioneller Perspektive belegen die Dynamik anatomischer, physiologischer und nicht zuletzt funktionaler Reifungsprozesse in der Adoleszenz (Konrad, et al., 2013; Uhlhaas, 2011). So konnte der Abbau synaptischer Verbindungen (Huttenlocher & Dabholkar, 1997) bei gleichzeitiger Zunahme der weißen Substanz und damit der Konnektivität (Perrin et al., 2008) sowie Veränderungen der grauen Substanz (Giedd et al., 1999) und der Transmittersysteme (Hashimoto et al., 2009; Murrin, Sanders, & Bylund, 2007; Wahlstrom, Collins, White, & Luciana, 2010) gezeigt werden. Darüber hinaus wurden funktionale Veränderungen bei kortikalen Aktivierungsmustern gefunden (Durstun et al., 2006).

Dieser Zeitraum mit seinen „umbaubedingten Störungen“ (Spitzer, 2008, S. 677) ist für den jungen Menschen eine große Herausforderung. Auf neurobiologischer Ebene ist die Adoleszenz Umkehrpunkt der quantitativen Entwicklung der Synapsenanzahl: Steigt bis zur Pubertät die Anzahl der Synapsen im kindlichen Gehirn ständig an, so beginnt sie sich ab diesem Zeitpunkt zu reduzieren (McGivern, Andersen, Byrd, Mutter, & Reilly, 2002). Dabei verändert sich insbesondere der frontale Kortex mit den dort repräsentierten kognitiven Fähigkeiten. Aus neuroanatomischer Sicht reifen Hirnregionen, die eng mit sensorischen und motorischen Leistungen assoziiert sind, deutlich früher als jene präfrontalen Kortexareale, die mit höheren kognitiven Funktionen wie dem Planen von Handlungen, der Entscheidungsfindung und insbesondere der Handlungskontrolle verknüpft sind (Anderson, 2002; Konrad, 2011). Die vergleichsweise frühe Reifung subkortikaler Funktionssysteme wie des limbischen Systems und des Belohnungssystems, führt zusammen mit der verzögerten Reifung präfrontaler Kontrollareale zu einem Ungleichgewicht neuronaler Netzwerke (Casey, Getz, & Galvan, 2008). Casey und seine New Yorker Arbeitsgruppe entwickelten eines der aktuell einflussreichsten neurobiologischen Modelle zur Erklärung von typischem Verhalten in der Adoleszenz. Sie erklären adoleszenztypisches Verhaltens mit diesem Ungleichgewicht subkortikaler und präfrontaler Netzwerke infolge nichtlinearer Reifungsprozesse (Casey, et al., 2008; Somerville, Jones, & Casey, 2010). In emotionalen Situationen und bei Antizipation von Belohnung ist bei Jugendlichen im

Vergleich zu Kindern und Erwachsenen die Aktivität ihres limbischen Systems in solchem Ausmaß erhöht (Galvan et al., 2006), dass es zusammen mit dem „Reward-System“ sozusagen die Oberhand über das noch nicht ausgereifte präfrontale Kontrollsystem“ gewinnt (Konrad, et al., 2013, S. 428). Adoleszenztypisches provokantes, aggressives oder riskantes Verhalten dürfte damit in engem Zusammenhang stehen und wird dadurch vielleicht auch ein Stück nachvollziehbarer (vgl. auch Blakemore & Choudhury, 2006).

2.1.2 Höheres Erwachsenenalter

Die zweite kritische Phase für die Lern- und Anpassungsfähigkeit ist das Alter. Demografischer Wandel wird in vielen öffentlichen aber auch wissenschaftlichen Diskussionen aus durchaus nachvollziehbaren Gründen als primär ökonomische Belastung diskutiert (vgl. Schmähl, 2002). Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (2013) stiegen in Deutschland die Gesundheitsausgaben von 187 Milliarden Euro im Jahre 1995 auf 294 Milliarden Euro im Jahr 2011, was einer Steigerung der Ausgaben um 57 Prozent innerhalb dieser 16 Jahre entspricht. Es steht weiterhin zu erwarten, dass mit dem Anstieg des Anteils älterer und hochbetagter Menschen an der Gesamtbevölkerung, die Gesundheitskosten in den Bereichen Prävention, Behandlung, Rehabilitation sowie Pflege kontinuierlich weiter steigen und das Gesundheitssystem auch künftig unter Druck setzen werden (Statistisches Bundesamt, 2009, 2013). Allerdings dürfte es zu kurz gegriffen sein, die demografische Entwicklung als rein ökonomisches Problem zu bewerten. Angesichts der Tatsache, dass der Abbau kognitiver Leistungen vermutlich bereits im fünften Lebensjahrzehnt beginnt und sich mit fortschreitendem Alter noch verstärkt (vgl. Singh-Manoux et al., 2012), wird deutlich, dass das Thema „Alter“ gerade auch vor dem Hintergrund der steigenden Lebenserwartung eine immense individuelle Herausforderung darstellt (Fernández-Ballesteros, Robine, Walker, & Kalache, 2013).

Herrscht über den inversen Zusammenhang zwischen Alter und kognitiver Leistung vermeintlich Einigkeit (Brayne, 2007; Holland & Rabbitt, 1991), so sind darüber hinaus auch nach über einhundert Jahren Forschung in dem Bereich noch viele Fragen offen. Dies gilt insbesondere für die möglichen, hinter dem Abbau stehenden Wirkmechanismen. Selbst wenn Menschen gesund und ohne Krankheit altern (World Health Organization, 1946), verändert sich altersabhängig ihre neuronale Basis für kognitive Leistungen. Häufig

kommt es infolge dieser hirnstrukturellen Veränderungen zu kognitiven Beeinträchtigungen. Forschungsbefunde auf zwei unterschiedlichen Beschreibungsebenen scheinen zu belegen, dass kognitiver Abbau bereits relativ früh im Erwachsenenalter beginnt, nahezu kontinuierlich verläuft und mit wenigen Ausnahmen alle Bereiche betrifft (Salthouse, 2009). Auf neurobiologischer Ebene konnten altersbedingte Veränderungen des Gehirnvolumens (Allen, Bruss, Brown, & Damasio, 2005; Fotenos, Mintun, Snyder, Morris, & Buckner, 2008; Kruggel, 2006), der Myelinintegrität (Hsu et al., 2008; Sullivan & Pfefferbaum, 2006), der Stärke des zerebralen Kortex (Magnotta et al., 1999; Salat et al., 2004), der Anzahl Serotonin bindender Rezeptoren (Sheline, Mintun, Moerlein, & Snyder, 2002), des striatalen Dopamins (Erixon-Lindroth et al., 2005; Volkow et al., 2000), die Bildung und Anhäufung von neurofibrillären Bündeln betreffend (Del Tredici & Braak, 2008) sowie der Konzentration verschiedener Gehirnstoffwechselmetaboliten (Kadota, Horinouchi, & Kuroda, 2001) gezeigt werden. Nahezu analog ist die Befundlage auf der zweiten Beschreibungsebene, der Ebene der verschiedenen kognitiven Leistungsmessungen: Während mit den Aspekten der fluiden Intelligenz (Cattell, 1971) wie der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit, der Lernfähigkeit oder dem problemlösenden, abstrakten Denken sowie dem Arbeitsgedächtnis und den exekutiven Funktionen (hier insbesondere die Inhibitionsfähigkeit) eher basale kognitive Funktionen altersabhängig abbauen, können komplexe Fähigkeiten und Funktionen, die auf erworbenem Wissen basieren und damit eher dem Bereich der kristallinen Intelligenz zuzuordnen sind, relativ gut erhalten bleiben (Baltes, et al., 1999; Christensen, et al., 1997; Hedden & Gabrieli, 2004; Jurado & Rosselli, 2007; McArdle, et al., 2002; Park et al., 2002; Park & Reuter-Lorenz, 2009; Rabbitt & Lowe, 2000; Schaie, 2005).

Insgesamt deutet die aktuelle Befundlage darauf hin, dass der Abbau funktioneller Kapazitäten inter- aber auch intraindividuell (Raz & Rodrigue, 2006) sehr unterschiedlich verläuft, ganz allgemein aber einige Aspekte altersabhängigen kognitiven Abbaus früher zu beginnen scheinen als bisher angenommen. Während Längsschnittstudien vor gut zehn Jahren noch davon ausgingen, dass bis zum 60. Lebensjahr kaum kognitiver Abbau stattfindet (Schaie, 1996; Wilson et al., 2002), argumentieren Salthouse (2009), Finch (2009) und jüngst auch Singh-Manoux (2012), dass dieser Abbau bereits relativ im frühen Erwachsenenalter beginnt und sich mit zunehmendem Alter verstärkt. Hinweise dafür kommen auch aus der Demenzforschung. Seit längerem ist bekannt, dass amyloide Plaques und neurofibrilläre Bündel als Marker möglicher pathologischer Prozesse bereits in den

Gehirnen junger Erwachsener vorkommen (Braak & Braak, 1997; Duyckaerts & Hauw, 1997). Jüngste klinische Studien zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Neuro-pathologie und dem Ausmaß kognitiven Abbaus (Johnson, Storandt, Morris, & Galvin, 2009; Nelson, Braak, & Markesbery, 2009; Wilson, Leurgans, Boyle, Schneider, & Bennett, 2010).

2.1.3 Erfolgreiches Altern

Wissenschaft und Forschung beschäftigen sich in den letzten Jahren zunehmend mit Fragen nach der grundsätzlichen Bedeutung des Altseins in der heutigen Zeit, den Bedürfnissen der „neuen“ Alten in der Mitte unserer Gesellschaft und wie unsere Gemeinschaft von der Entwicklung profitieren kann. Levenson und Aldwin verwiesen bereits im Jahr 1994 auf eine Entwicklung der Altersforschung in den 1980er Jahren, die nicht mehr nur die frühere ausschließlich defizitorientierte Perspektive des Alterns und des Alters fokussiert (vgl. Havighurst, 1963), sondern Möglichkeiten und Kompetenzen thematisiert und damit in den Blick rückt (bereits Olbrich, 1987). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung überschreibt das Wissenschaftsjahr 2013 mit dem Leitsatz „Die demografische Chance“ (2013a) und betont mit seiner Forschungsagenda „Das Alter hat Zukunft“ (2013b) die Bedeutung, der prognostizierten demografischen Entwicklung aktiv zu begegnen.

Aus heutiger Sicht stellt Altern einen komplexen Anpassungsprozess an altersassoziierte biologische, psychische und soziale Veränderungen und damit eine große kognitive Herausforderung dar (Steverink, Lindenberg, & Ormel, 1998). Erfolgreich Altern bedeutet nicht nur die Lebenszeit zu verlängern, sondern insbesondere die Lebensqualität möglichst zu erhalten (vgl. Rowe & Kahn, 1998). Dafür ist es erforderlich, dass die Adaptationsprozesse an notwendige Veränderungen in den genannten Bereichen erfolgreich gelingen (Baltes & Baltes, 1990), um möglichst lange eine günstige Relation zwischen Anforderungen und Ressourcen (Olbrich, 1992) zu erhalten. Aus diesem Grund ist es für die Forschung im Bereich der kognitiven Reserve eine dringliche Aufgabe, mögliche Wirkfaktoren zu identifizieren, die zum Erhalt der Lern- und Anpassungsfähigkeit beitragen können (Greenwood, 2007; Lustig, et al., 2009).

2.2 Kognitive Reservekonzepte im Vergleich

Ausgehend von der vielfach beobachteten Diskrepanz zwischen dem Ausmaß einer Gehirnschädigung und ihrer klinischen Manifestation, entwickelte sich zur Erklärung dieser scheinbaren Widersprüchlichkeit die Idee einer Reservekapazität (vgl. Katzman et al., 1988; Mortimer, Schuman, & French, 1981). Die ursprünglich im Kontext der Demenzforschung entstandene Vorstellung einer Reserve ermöglicht es bei dementiellen Erkrankungen, bei andersartigen Hirnschädigungen oder im fortgeschrittenen Alter, den oft verhältnismäßig guten Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit zu erklären. Dies war Ausgangspunkt für die Entwicklung unterschiedlicher Konzepte, die entweder einen kompensatorischen, neuroprotektiven oder kombinierten Ansatz akzentuieren, wobei kompensatorisch hier Adaptation an nachlassende Funktionsfähigkeit oder geschädigte Hirnstrukturen bedeutet, während neuroprotektiv mögliche präventive Schutzfaktoren betont (Barulli & Stern, 2013). Die einflussreichsten Konzepte werden nachfolgend dargestellt.

2.2.1 Brain reserve

Der Ansatz der *brain reserve* (BR) und seine Festschreibung im Schwellenwertmodell (Katzman, 1993; Satz, 1993) ist eines von verschiedenen passiven Modellen (vgl. auch Mortimer, et al., 1981; Stern, 2009). Kennzeichnend für ein solch passives Modell ist ein fester anatomischer Grenzwert, der den Übergang zur funktionellen Beeinträchtigung definiert (Stern, 2002). Überdies differenzieren rein quantitative Modelle nicht, ob eine einzige oder mehrere wiederholte Schädigungen des Gehirns zu strukturellen Veränderungen vergleichbaren Ausmaßes und infolge zu funktionellen Beeinträchtigungen führen (Stern, 2009). Personen unterscheiden sich dort nur bezüglich ihrer unterschiedlich großen *brain reserve capacity* (BRC), die individuelle Unterschiede beim Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit erklärt (Stern, 2002). Die BRC ist ein rein quantitatives anatomisches Maß, wie etwa der Kopfumfang, das intrakranielle Gehirnvolumen, die Neuronen- oder Synapsenanzahl und auch die Dichte der dendritischen Verästelung, das in Abhängigkeit vom Ausmaß der jeweiligen Schädigung maßgeblich bestimmt, ob es zu kognitiven Beeinträchtigungen kommt (Stern, 2002). Laut Schwellenwert- oder BR-Modell führen Hirnläsionen immer dann zwangsläufig zu einem Abbau der kognitiven Leistungsfähigkeit, wenn das Verhältnis von geschädigter zu gesamter Quantität des gemessenen Parameters einen kritischen Wert

überschreitet (Barulli & Stern, 2013). Abbildung 1 veranschaulicht diese Modellannahme: Bei zwei Personen mit unterschiedlicher BRC führt ein bestimmtes Ausmaß einer Hirnläsion (grau), entstanden aufgrund pathologischer Prozesse, eines Traumas oder auch altersbedingtem Abbau, nur bei derjenigen Person mit geringerer Reservekapazität, in diesem Beispiel Person 2, zu Funktionseinbußen (Stern, 2002).

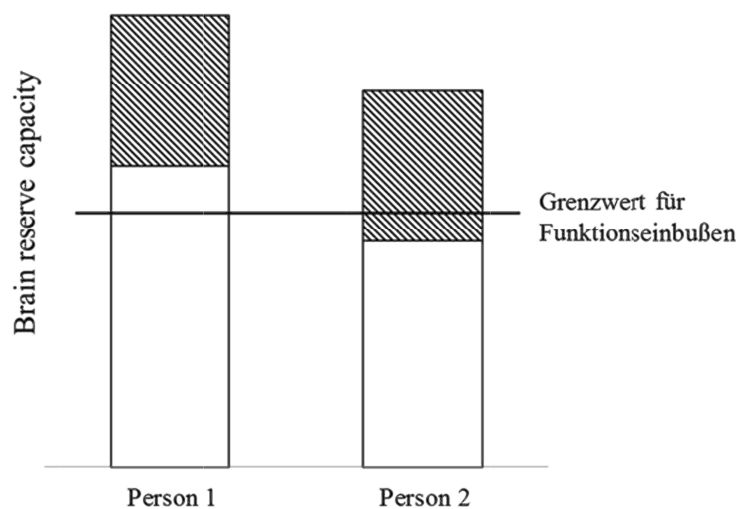


Abbildung 1. Das Schwellenwert- oder BR-Modell (Stern, 2002 abgeleitet von Satz, 1993).

In den meisten Studien mit der BR als theoretischem Rahmenkonzept wurden in der Vergangenheit sehr allgemeine Messgrößen zur Bestimmung der BRC verwendet, wie etwa der bereits genannte Kopfumfang (Barulli & Stern, 2013). Verschiedene Forschungsbefunde wie der gefundene Zusammenhang zwischen Kopfumfang und Resistenz gegenüber dementiellen Erkrankungen (Mortimer, Snowden, & Markesbery, 2003) waren infolge nicht haltbar (vgl. Borenstein Graves et al., 2001; Schofield, Logroscino, Andrews, Albert, & Stern, 1997). Moderne und sehr viel differenziertere quantitative Messverfahren könnten dem traditionellen Schwellenwertmodell allerdings neue Impulse geben (Barulli & Stern, 2013). Neben der Diffusions-Tensor-Bildgebung (DTI, engl.: diffusion tensor imaging), die mit Hilfe der Magnetresonanztomografie verändertes Diffusionsverhalten im Gehirn erfassen und darstellen kann (Chao et al., 2013; Wang et al., 2012), kommen dafür auch all jene Verfahren in Frage, die auf mikrostruktureller Ebene anatomische Quantitäten hinreichend genau messen können. Aufschlussreich wäre dies etwa bei neokortikalen Pyramidenneuronen, der Länge dendritischer Dorne, der Dendritendichte sowie bei

synaptischen Botenstoffen (Barulli & Stern, 2013; Lövdén, Wenger, Mårtensson, Lindenberger, & Bäckman, 2013; Sachdev, Valenzuela, & Hons, 2009).

2.2.2 Cognitive reserve

Das Modell der *cognitive reserve* (CR) von Stern (2002, 2009) postuliert im Gegensatz zur BR einen aktiven Ansatz der Reserveidee. Aktiv bedeutet in diesem Zusammenhang zunächst einmal, dass kein quantitativ bestimmter fester Grenzwert den Beginn des kognitiven Abbaus festlegt, sondern dass die Art und Weise der Nutzung neuronaler Netzwerke sowie die unterschiedliche Fähigkeit zur Rekrutierung alternativer Netzwerke entscheidenden Einfluss darauf haben, wie erfolgreich im Falle pathologischer oder altersbedingter Hirnschädigungen die aktiven Versuche des Gehirns sind, eigene strukturelle Veränderungen funktionell auszugleichen (Stern, 2009). Die Gemeinsamkeit der BR und der CR besteht darin, dass beide Ansätze grundsätzlich potentielle Mechanismen zur Bewältigung von Schädigungen des Gehirns konzeptualisieren (Stern, 2002).

Grundlegende Annahme in diesem Modell ist, dass individuell unterschiedliche kognitive Prozesse während einer Aufgabenbearbeitung das Ausmaß der Reserve (CR) gegenüber krankhaften oder auch normalen Veränderungen des Gehirns bestimmen (Stern et al., 2005). So wird verständlich, wie vergleichbare Hirnschädigungen zu unterschiedlichen funktionellen Einbußen führen. Die Effizienz, Kapazität und Flexibilität dieser aktiven kognitiven Prozesse und damit der darunterliegenden neuronalen Netzwerke entwickeln sich entsprechend den unterschiedlichen kognitiven Beanspruchungen und Aktivitäten der jeweiligen Person über die gesamte Lebensspanne. Effizientere neuronale Netzwerke benötigen für das Erreichen einer bestimmten Leistung eine geringere neuronale Aktivierung. Die Kapazität ist Ausdruck für die absolute Aktivierungsfähigkeit. Flexibilität bedeutet, sich bei der Auswahl alternativer Netzwerke anpassen zu können (Stern, 2009). Hier wird der aktive Ansatz der CR nochmal sehr deutlich. Sie stützt sich zur Erklärung von kognitiven Leistungsunterschieden im Unterschied zur BR viel mehr auf aktuelle neuronale Aktivierung, die durch kognitiv herausfordernde Situationen gebildet und geformt wird (Barulli & Stern, 2013).

Gute Prädiktoren für diese effizientere sowie flexiblere Nutzung neuronaler Netzwerke und somit einer größeren CR, sind das Intelligenzniveau, der Bildungsabschluss und berufliche

Erfolg sowie allgemein das Ausmaß lebenslanger kognitiver Herausforderungen (Barulli & Stern, 2013; Stern, 2002). Vergleicht man zwei Menschen mit einer gleich großen BRC (vgl. Abbildung 2), so können diese eine unterschiedlich große CR und damit ein unterschiedlich großes Potential zum Ausgleich struktureller Schädigungen haben. Abbildung 2 demonstriert, dass Patient 1 aufgrund einer effizienteren Nutzung seiner ihm noch zur Verfügung stehenden Gehirnstrukturen eine größere Gehirnschädigung (grau) tolerieren kann als Person 2 (Stern, 2002).

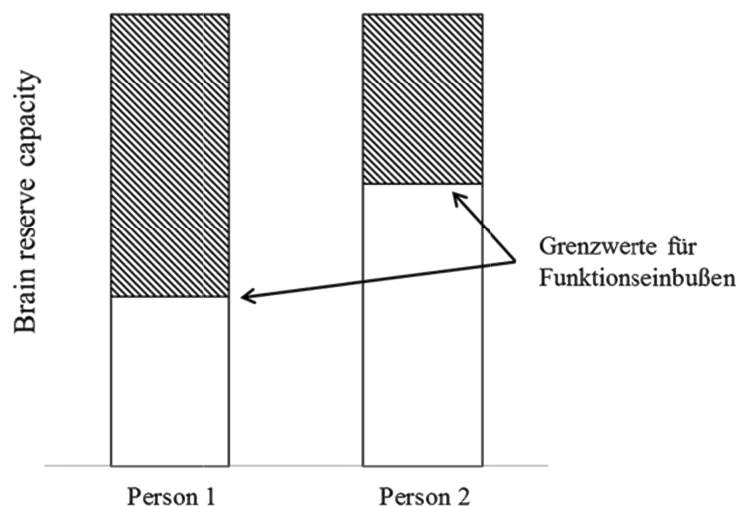


Abbildung 2. Das CR-Modell (Stern, 2002).

Stern et al. (2005) unterscheiden bei der neuronalen Implementierung der CR zwei sich ergänzende Formen: *Neural reserve* (NR) und *neural compensation* (NC). Die Nutzung der ersten Form der CR, der *neural reserve* (NR), ist bei gesunden Erwachsenen ein normaler Prozess und bezieht sich auf jene neuronalen Netzwerke, die aufgrund ihrer größeren Effizienz und/oder Kapazität weniger störungsanfällig sind (Stern, 2006). Diese Form der CR kann sich bei ansteigender Aufgabenschwierigkeit sowohl durch die veränderte Aktivierung eines, aber auch durch die Rekrutierung weiterer neuronaler Netzwerke manifestieren, wenn die Aufgabenanforderungen die Leistungsfähigkeit des ursprünglichen Netzwerkes übersteigen (Stern, et al., 2005). Eine größere NR bedeutet somit eine flexiblere Verfügbarkeit von effizienten neuronalen Netzwerken mit hoher Kapazität, deren Ausmaß sich in Abhängigkeit vom angeborenem Ausgangsniveau, den lebenslangen kognitiven Herausforderungen sowie möglicherweise weiteren Faktoren wie der körperlich-sportlichen Aktivität entwickeln kann (Barulli & Stern, 2013). Ergänzend sei hier auf

das von Fabiani (2012) vorgestellte Konzept „GOLDEN aging“ (growing of lifelong differences explains normal aging) hingewiesen, das einen Bezugsrahmen für normales, nicht pathologisches kognitives Altern liefert und vollständig kompatibel mit dem Konzept der CR ist (Barulli & Stern, 2013). Dieses Konzept basiert zum einen auf der Annahme, dass die Leistungsfähigkeit inhibitorischer Prozesse über die Lebensspanne nachlässt (Hasher & Zacks, 1988). Zum anderen wird der Ansatz aufgegriffen, dass eine bestehende Diskrepanz zwischen Anforderung und Kapazität durch eine Steigerung der Aktivierung – im Alter möglicherweise Überaktivierung – sowie Rekrutierung der verarbeitenden Ressourcen kompensiert werden soll (vgl. compensation-related utilization of neural circuits hypothesis (CRUNCH) von Reuter-Lorenz & Cappell, 2008). Das Konzept „GOLDEN aging“ postuliert, dass normales gesundes Altern die Fortführung lebenslang existenter Reifungsprozesse ist, die zunehmend Veränderungen der Streuung individueller Leistungsfähigkeit auf unterschiedlichem Niveau bedingen und das Gehirn beständig formen und verwandeln. Phänomene, die bei normalem Altern beobachtet werden, können sich deshalb unter bestimmten Bedingungen bereits bei jungen Erwachsenen zeigen (Fabiani, 2012).

Die zweite von Stern, et al. (2005) vorgeschlagene Form der CR, die *neural compensation* (NC), bezieht sich auf Situationen, in denen aufgrund von pathologischen oder altersbedingten Veränderungen die ursprünglich aufgabenrelevanten Gehirnstrukturen so geschädigt wurden, dass für die erfolgreiche Durchführung einer geforderten Aufgabe neuronale Netzwerke kompensatorisch eingesetzt werden, die normalerweise gesunde Personen so nicht benutzen (Stern, 2009). Kompensatorisch bedeutet hier entweder die Nutzung dieser betroffenen Gehirnareale in alternativer Art und Weise oder die Rekrutierung zusätzlicher Areale (Stern, et al., 2005). Wichtig scheint in diesem Zusammenhang, dass Stern und Kollegen den Ausdruck NC nur für diejenigen Situationen verwenden, in denen eine differierende Netzwerknutzung von stärker geschädigten Personen im Vergleich zu weniger geschädigten nachgewiesen werden kann (Stern, 2009). Im Unterschied zur NR geht es bei der NC ausschließlich um den Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit vor dem Hintergrund einer Gehirnschädigung, nicht jedoch um eine Steigerung der kognitiven Leistung aufgrund einer alternativer Netzwerknutzung beim gesunden Menschen (Stern, et al., 2005).

Inzwischen liegt eine umfangreiche Anzahl epidemiologischer und experimenteller Indizien für die Existenz einer solchen CR vor. Es konnte gezeigt werden, dass Bildungs-

abschluss und beruflicher Erfolg sowohl mit der CR (Charness, 2006; Foubert-Samier et al., 2012; Le Carret et al., 2003; Staff, Murray, Deary, & Whalley, 2004) als auch mit einem verminderten Risiko für dementielle Erkrankungen (Sattler, Toro, Schönknecht, & Schröder, 2012; Stern et al., 1994) in engem Zusammenhang stehen. Ferner haben möglicherweise Persönlichkeitsmerkmale Einfluss auf die CR (David & Suls, 1999; Schaie, Willis, & Caskie, 2004; Vollrath & Torgersen, 2000; Ziegler, Danay, Heene, Asendorpf, & Bühner, 2012). Neben Ausbildung und Beruf sind überdies soziale Aktivitäten, intellektuelles Engagement und Freizeitverhalten mit der CR (Baltes, et al., 1999; Foubert-Samier, et al., 2012; Hulstsch, Hertzog, Small, & Dixon, 1999; Kramer, Bherer, Colcombe, Dong, & Greenough, 2004; Seeman, Lusignolo, Albert, & Berkman, 2001) sowie der Prävalenzrate von Demenzerkrankungen (Scarmeas, Levy, Tang, Manly, & Stern, 2001; Valenzuela & Sachdev, 2006; Wilson, 2009) assoziiert. Jüngere Forschungsbefunde liefern darüber hinaus evidente Hinweise auf eine protektive Wirkung der CR bei Morbus Parkinson (Poletti, Emre, & Bonuccelli, 2011), Multipler Sklerose (Langdon, 2011; Sumowski, Chiaravalloti, & DeLuca, 2009), HIV-bedingter Demenz (Foley et al., 2012) sowie Schädelhirntraumata bei Kindern (Fay et al., 2010). Eine Voraussetzung für gelingende Adaptationsprozesse und damit erfolgreiches Altern ist auch die Bewusstheit für eigene Schwächen. Die CR leistet hier einen hilfreichen Beitrag (Suchy, Kraybill, & Franchow, 2011).

2.2.3 Brain maintenance

Während die bisher vorgestellten Reservekonzepte zu erklären versuchen, warum manche Menschen trotz pathologischen oder altersbedingten Veränderungen des Gehirns noch intakte kognitive Fähigkeiten zeigen, konzentriert sich das Konzept der „*brain maintenance*“ (BM) auf Faktoren und Bedingungen, die den Erhalt der neurochemischen, strukturellen und funktionellen Intaktheit des Gehirns fördern (Nyberg, Lövdén, Riklund, Lindenberger, & Bäckman, 2012). Betont das BM-Konzept eher die Notwendigkeit einer relativ intakten zerebralen Infrastruktur, fokussieren sowohl BR als auch CR mehr den kompensatorischen Umgang mit Gehirnveränderungen. Nyberg und Kollegen (2012) sehen in ihrem Konzept der BM eine Ergänzung der beschriebenen Reservekonzepte (siehe auch Lindenberger, Burzynska, & Nagel, 2013). Zentrale Annahme dieses Konzeptes ist es, dass ein neuroanatomisch und neurochemisch gut erhaltenes Gehirn mit nur minimalen altersbedingten

oder pathologischen Veränderungen die entscheidende Voraussetzung für den erfolgreichen Alterungsprozess ist (Nyberg, et al., 2012). Ältere Menschen mit dieser Voraussetzung scheinen dann funktionelle Aktivierungsmuster im Gehirn realisieren zu können, die vergleichbar mit denen junger Erwachsener sind und ihnen den Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit ermöglichen (Waiter et al., 2008). Nyberg et al. (2012) schließen hieraus, dass Interventions- und Trainingsmaßnahmen das Ziel haben sollten, typische jugendliche Aktivierungsmuster und Gehirnstrukturen zu erhalten (vgl. Colcombe, et al., 2004; Erickson et al., 2007b), um so altersbedingte Veränderungen der Gehirnphysiologie reduzieren oder gar beseitigen zu können (vgl. Kramer & Erickson, 2007; Lövdén et al., 2010b). Auch im Konzept der BM sind individuelle kognitive Unterschiede eng assoziiert mit genetischen Faktoren, reichhaltigen Umweltangeboten und kognitiv herausfordernden Lebenserfahrungen (Nyberg, et al., 2012).

Für Barulli und Stern (2013) sind die Konzepte der BM und BR vergleichbar. Die Forscher kritisieren am Ansatz der BM allerdings, dass individuelle Unterschiede der kognitiven Leistungsfähigkeit bei bestehenden Hirnschädigungen wie Schlaganfall, Demenz oder Multipler Sklerose nicht erklärt werden könnten. Für sie liefert dieses Konzept keinen Erklärungsrahmen für jüngere empirische Forschungsergebnisse, die neben neurodegenerativen Pathologien von weiteren wichtigen Wirkfaktoren des kognitiven Abbaus im Alter ausgehen (Boyle et al., 2013). Dementgegen existieren Hinweise, dass gemeinsame Prädiktoren der CR und BM, wie etwa die Bildung kompensatorisch und nicht neuroprotektiv wirken, wie es die BM vorhersagt. Brayne und ihre Kollegen (2010) fanden etwa heraus, dass eine bessere Bildung zwar nicht vor degenerativen oder vaskulären Neuropathien schützt, ihre klinische Manifestation aber durch eine größere Anzahl an Bildungsjahren abgeschwächt wird. Barulli (2013) hält weitere Studien für notwendig, um die unterschiedliche Wirkung von BM und CR auf die kognitive Leistungsfähigkeit differenzieren zu können.

2.2.4 Rahmenkonzept von Lövdén

Mit dem Ziel, das in der Definition vage Konzept kognitiver Plastizität konzeptionell zu präzisieren, entwickelte die Arbeitsgruppe um Lövdén (2010a) ein Rahmenkonzept, das die Konzepte der BR und CR verbindet (Barulli & Stern, 2013). Ihr Konzept unterscheidet zwei verschiedene jedoch miteinander verbundene Aspekte adulter kognitiver Plastizität:

Zum einen die Plastizität, die angeeignetes Wissen oder Gedächtnisinhalte modifiziert sowie zum anderen jene Plastizität, die kognitive Prozesse und ihre Effizienz verändert. Unter kognitiven Prozessen sind hier all jene Erscheinungsformen gemeint, die in qualitativ unterschiedlicher Art und Weise auf geistige Inhalte wirken und diese verändern. Beide genannten Aspekte der Plastizität, sowohl die flexible Aneignung von Wissen (mit in Folge mehr und differenzierteren Repräsentationen der Umwelt), als auch die Verbesserung der Prozesseffizienz (mit in Folge größerem Leistungsvermögen), machen das Gehirn anpassungsfähiger (Lövdén, et al., 2010a).

Bedingt wird kognitive Plastizität bei Erwachsenen laut diesem Konzept durch eine Diskrepanz zwischen individuell verfügbaren funktionellen Ressourcen und Anforderungen intrinsischer oder extrinsischer Art. Reichen die im Rahmen der aktuellen kognitiven Leistungsfähigkeit genutzten wissensbasierten Strategien zur Bewältigung jener Anforderungen nicht aus, muss das Gehirn mit plastischen und kompensatorischen Veränderungen reagieren, die vergleichbar mit denen der NC sind. Für die Leistungsfähigkeit in solch herausfordernden Situationen spielen möglicherweise individuelle Unterschiede bei prozessbasierenden, kompensatorischen Mechanismen (z.B. abhängig von der Arbeitsgedächtnisleistung) eine größere Rolle, als Differenzen bei wissensbasierenden Mechanismen wie Gedächtnisstrategien (Barulli & Stern, 2013).

2.2.5 The scaffolding theory of aging and cognition (STAC)

Ausgangspunkt für die Überlegungen von Park und Reuter-Lorenz (2009) war die Idee, zwei miteinander in Verbindung stehende Phänomene des Alterungsprozesses zu integrieren. Mit zunehmendem Alter steht einem vermehrten Rückgang auf funktioneller (z.B. kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit, Arbeitsgedächtnis, exekutive Leistungen) und struktureller Ebene (z.B. graue, weiße Substanz) eine Zunahme präfrontaler Aktivierung gegenüber. Als Erklärungsansatz dafür entwickelten sie ihre Scaffolding Theory of Aging and Cognition (STAC), die über das kognitive Altern hinaus, einen konzeptuellen Rahmen für das Ansprechverhalten des Gehirns auf verschiedenste Erkrankungen im Verlauf des Lebens sowie normale aufgabenspezifische Herausforderungen beim Erlernen neuer Fähigkeiten bieten soll (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Wie bei Lövdén et al. (2010a) zuvor, stehen auch in diesem Ansatz kompensatorische Mechanismen im Mittelpunkt. Die

STAC postuliert, dass eine funktionelle Neuorganisation die Anpassung an strukturelle Veränderungen oder aufgabeninduzierte Grenzen ermöglicht. Dies geschieht entweder dadurch, dass neu entwickelte oder zusätzliche kompensatorische neuronale Netzwerke das ursprünglich aufgabenrelevante, jetzt geschädigte und deshalb suboptimal arbeitende Netzwerk unterstützen, oder durch Rekrutierung eines auf die geforderte Aufgabe spezialisierten Netzwerkes, wie es beim Lernen passiert (Barulli & Stern, 2013). Diese Sichtweise kompensatorischer Mechanismen ist vergleichbar mit den zwei Implementierungsformen (NR, NC) der CR und wird gut durch empirische Daten gestützt (Ilg et al., 2008; Steffener, Brickman, Rakitin, Gazes, & Stern, 2009).

2.2.6 Zusammenfassung und Einordnung

Mit fortschreitender Entwicklung und dem Einsatz moderner insbesondere bildgebender Verfahren nähern sich die ursprünglich strikt getrennten Konzepte BR und CR immer weiter an (Barulli & Stern, 2013). Während das Modell der BR (Katzman, 1993; Satz, 1993) schwerpunktmäßig den Fokus auf individuelle Differenzen bei quantitativen Maßen des Gehirns legt, die es manchen Personen besser erlauben mit pathologischen oder altersbedingten Gehirnschädigungen zurechtzukommen als anderen, stehen bei der CR (Stern, 2002, 2009) individuelle Unterschiede bei der Aufgabenbearbeitung im Mittelpunkt, die einigen Menschen Vorteile bei besonderen Herausforderungen wie Hirnschädigungen oder Altern verschaffen. Als logische Konsequenz aus der größtenteils methodisch ermöglichten Annäherung dieser beiden Reservekonzepte verbindet Lövdén diese Ansätze (Lövdén, et al., 2010a). Bei der STAC (Park & Reuter-Lorenz, 2009), wie auch bei Lövdén zuvor, stehen kompensatorische Mechanismen im Mittelpunkt. Die Rekrutierung zusätzlicher neuronaler Netzwerke als lebenslange Fähigkeit des menschlichen Gehirns zur Unterstützung ineffizienter oder geschädigter Netzwerke bildet die Kernannahme des Konzeptes, dass völlig kompatibel mit dem Konzept der CR ist. Diese Kurzzusammenfassung beschließt das Konzept der BM (Nyberg, et al., 2012). Im Unterschied zu den bisherigen Theorien, die kompensatorische Mechanismen in den Vordergrund stellen, konzentriert sich dieser Ansatz auf jene Faktoren, die den Erhalt eines intakten Gehirns als Voraussetzung erfolgreichen Alterns fördern und kann somit als neuroprotektiv bezeichnet werden.

Alle vorgestellten Konzepte leisten relevante und hilfreiche Ansätze, um sich den zugrunde liegenden Mechanismen erfolgreichen Alterns anzunähern. Die Aufweichung der Grenze zwischen den Konzepten der CR und BR sowie große Überschneidungen bei den Grundlagen und Mechanismen aller kompensatorischen Modelle (CR mit BR, Lövdén und STAC) ließen es sinnvoll erscheinen, für die vorliegende Dissertation das CR-Modell als konzeptionellen Rahmen zu wählen. Die durch lebenslange Erfahrungen aufgebaute CR (Valenzuela & Sachdev, 2007) scheint mit wichtigen Fähigkeiten für erfolgreiches Altern in Verbindung zu stehen (Barulli, Rakitin, Lemaire, & Stern, 2013), Einfluss auf das Risiko von Gehirnerkrankungen zu haben (Katzman, 1993; Koenen et al., 2009) sowie die Effizienz und Kapazität neuronaler Netzwerke vorhersagen zu können (Stern et al., 2012). Genannte Befunde verdeutlichen den breiten Anwendungsbereich des CR-Modells. Es kann sowohl zeitlich über die gesamte Lebensspanne (vgl. Richards & Deary, 2005), als auch inhaltlich die verschiedenartigsten Herausforderungen des Gehirns betreffend, angewendet werden (Barulli & Stern, 2013).

2.3 Messung der kognitiven Reserve: Testing the limits

Grundsätzlich wird versucht die CR entweder auf direktem oder indirektem Wege zu ermitteln. Zwei unterschiedliche Messansätze sind dafür üblich. Sehr häufig verwenden Studien verschiedene Stellvertretervariablen wie Intelligenz (z.B. Corral, Rodriguez, Amenedo, Sanchez, & Diaz, 2006), Bildung (z.B. Le Carret, et al., 2003), Beruf (Charness, 2006), intellektuelles Engagement (Hultsch, et al., 1999) oder soziale Aktivitäten (Seeman, et al., 2001), um die CR indirekt zu ermitteln. Jüngere methodologische Ansätze versuchen die CR mit Hilfe von Strukturgleichungsmodellen zu quantifizieren (Jones et al., 2011). Dabei geht man davon aus, dass diese Variablen oder Variablenkombinationen eng mit effizienten kognitiven Prozessen verknüpft sind, die so indirekt die CR repräsentieren (Richards & Deary, 2005).

Eine inzwischen gut etablierte Möglichkeit zur direkten Messung der CR auf funktioneller Ebene eröffnet das „*Testing-the-limits*“-Paradigma (Kliegl, Smith, & Baltes, 1989). Bei diesem methodischen Ansatz geht es anstelle der Ausgangsleistung, um das Verbesserungspotential in einer kognitiven Aufgabe, das sich entweder als Ergebnis von Training oder durch wiederholtes Testen manifestiert (Lindenberger & Baltes, 1995). Ausgehend von der

Annahme, dass sich das Ausmaß individueller kognitiver Reservekapazität am ehesten im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit zeigt, ist es Ziel dieses Ansatzes, die Grenzen des individuellen Lernzuwachses – auch Lernpotential genannt – zu ermitteln (Baltes, 1987). Der Lernzuwachs in einer kognitiv herausfordernden Aufgabe stellt ein sensitiveres Maß für individuelle Leistungsunterschiede dar als die einfache Messung der Ausgangsleistung. Ein größerer Lernzuwachs spiegelt dabei eine größere CR wider (Baltes, Kühl, Gutzmann, & Sowarka, 1995; Lindenberger & Baltes, 1995).

Eingesetzt wird das „*Testing-the-limits*“-Paradigma in verschiedenen Teilbereichen der Kognition wie dem Gedächtnis (z.b. Kliegl, et al., 1989), der Aufmerksamkeit (z.b. Bherer et al., 2008), dem logischen Denken und der Verarbeitungsgeschwindigkeit (z.b. Yang, Krampe, & Baltes, 2006). Die Umsetzung variiert dabei von einfachen Testwiederholungen (z.b. Yang, et al., 2006) über intensive Trainingsprogramme (z.b. Bherer et al., 2006) bis hin zu selbstgesteuertem Lernen (z.b. Baltes, Sowarka, & Kliegl, 1989) oder item-unspezifischem Wiederholungslernen (z.b. Yang, Reed, Russo, & Wilkinson, 2009). Abhängig von der Art der Fragestellung können bei diesem Ansatz entweder die durch Training oder wiederholtes Testen gesteigerten Endleistungen, aber auch die erreichten Leistungsverbesserungen im Vordergrund stehen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Ausmaß der Leistungsverbesserung als relevantes Ergebnismaß gewählt. Die Leistungsverbesserung errechnet sich aus der erreichten Endleistung im gewählten Testverfahren abzüglich der jeweiligen Ausgangsleistung. Das Verfahren wird unter Punkt 5.1.1 genau erklärt.

2.4 Neurobiologische Wirkmechanismen kognitiver Reserve

Neue Erfahrungen aufgrund kognitiver Herausforderungen, einer stimulierenden Lebensumwelt, aber auch durch körperlich-sportliche Aktivitäten können lebenslang Struktur und Funktion des menschlichen Gehirns verändern (Raz & Lindenberger, 2013). Über die gesamte Lebensspanne hinweg ist das Gehirn sowohl auf synaptischer als auch auf kortikaler Ebene plastisch (Greenwood, 2007; van Praag, Kempermann, & Gage, 2000). Die Umbau- und Reorganisationsprozesse im äußerst plastischen Gehirn adoleszenter Jugendlicher sind zwar vermutlich noch dynamischer und tiefgreifender als bislang angenommen, grundsätzlich aber schon lange gut belegt (vgl. Giedd, et al., 1999; Giedd &

Rapoport, 2010). In jüngster Zeit verdichten sich zusätzlich die Hinweise, dass auch die Gehirne älterer Menschen nicht ausschließlich durch Abbau gekennzeichnet sind, sondern dort kompensatorisch eine plastische Anpassung an diesen Abbau stattfinden kann (Greenwood, 2007). Körperlich-sportliche Aktivität scheint als Wirkfaktor auf die kognitive Reserve sowohl in der Adoleszenz als auch im höheren Erwachsenenalter eine wichtige Rolle zu spielen (vgl. Kapitel 3). In diesem letzten Abschnitt des Kapitels werden drei miteinander verbundene Bereiche neurobiologischer Wirkmechanismen vorgestellt, die in engem Zusammenhang mit Bewegung und Sport stehen.

2.4.1 Vaskuläre Veränderungen

Körperlich-sportliche Aktivitäten haben zunächst einmal transiente vaskuläre Veränderungen zur Folge. Ziel der zerebralen Durchblutung ist die Aufrechterhaltung des Systemgleichgewichtes. Dafür müssen angesichts ständiger innerer und äußerer Veränderungen die Stoffwechsellanforderungen im Gehirn stets erfüllt werden (Lojovich, 2010). Sportliche Aktivität erhöht diese Anforderungen und führt in Folge zu einer Veränderung der zentralen Hämodynamik mit steigendem zerebralen Blutfluss (cerebral blood flow, CBF) und erhöhtem Blutsauerstoffgehalt im Gehirn (Gonzalez-Alonso et al., 2004; Ide, Horn, & Secher, 1999). Bleibt der globale CBF in Ruhe oder bei moderater körperlicher Aktivität relativ konstant, kann sich der regionale CBF bei intensiver Bewegung um bis zu 30 Prozent steigern (Christensen et al., 2000; Ide & Secher, 2000). Der Anstieg des CBF ist insbesondere in der mittleren sowie anterioren Zerebralarterie zu beobachten, die für die Blutversorgung des Frontallappens inklusive präfrontaler Areale, des Temporallappens sowie Teile des Parietallappens verantwortlich sind (Hellstrom, Fischer-Colbrrie, Wahlgren, & Jogstrand, 1996; Jørgensen, Perko, Hanel, Schroeder, & Secher, 1992; Pott et al., 1996).

Körperlich-sportliche Aktivität steigert darüber hinaus die Proliferation von Endothelzellen sowie die Angiogenese im ganzen Gehirn (Cotman, Berchtold, & Christie, 2007). Unter Angiogenese versteht man die Bildung neuer Blutgefäße durch einen Spaltungsprozess oder durch Sprossung aus den Endothelzellen existierender Blutgefäße (Lojovich, 2010; Makanya, Hlushchuk, & Djonov, 2009). Dabei spielen die Wachstumsfaktoren IGF (insulin-like growth factor) und VEGF (vascular endothelial growth factor) eine zentrale Rolle (van Praag, 2009). Als Beispiel erhöht Laufen sowohl die IGF Genexpression im

Hippocampus als auch den Serumspiegel von IGF und VEGF (Carro, Nuñez, Busiguina, & Torres-Aleman, 2000; Fabel et al., 2003). Musste bis vor kurzem noch angenommen werden, dass mit zunehmendem Alter die Angiogenese nachlässt, lassen neuere Untersuchungen vermuten, dass die Abnahme dieser Fähigkeit durch regelmäßige physische Aktivität zumindest verlangsamt werden kann (Ding et al., 2006). Essentiell für den Erhalt der Funktionalität jedweder Art von Gewebe ist seine Versorgung. Neben mechanischem Stress auf die Wände der Kapillargefäße, ausgelöst durch den Anstieg des CBF, ist möglicherweise die temporäre Reduzierung des Sauerstoffgehaltes im Blut und eine dadurch reduzierte Gewebeversorgung Auslöser für eine gesteigerte Angiogeneserate (Makanya, et al., 2009; Thomas, Dennis, Bandettini, & Johansen-Berg, 2012). Körperlich-sportliche Aktivität sichert so durch den Erhalt von Angiogenese die notwendige Sauerstoffversorgung des Gewebes auch im Alter. Befunde, die aufgrund physischer Aktivität eine erhöhte Kapillardichte und Perfusion in kortikalen und subkortikalen Arealen zeigen konnten, haben gerade auch im Hinblick auf Lernen und Gedächtnis große Bedeutung (Black, Isaacs, Anderson, Alcantara, & Greenough, 1990; Edelberg & Reed, 2003). Gehirnareale wie der Hippocampus, die mit diesen kognitiven Leistungen sehr eng assoziiert sind, reagieren höchst empfindlich auf eine Sauerstoffunterversorgung. Umgekehrt betrachtet könnte demzufolge regelmäßig betriebene körperlich-sportliche Aktivität mit dadurch langfristig gesteigertem CBF große Auswirkungen sowohl auf die Angiogenese als auch auf die Sauerstoffnutzung und damit den Erhalt kognitiver (Gedächtnis-)Leistungen haben. Obwohl alle bisherigen Befunde aus Tierstudien stammen, gibt es doch starke Hinweise darauf, dass die Ergebnisse auf den Menschen übertragbar sind (Ding, Vaynman, Akhavan, Ying, & Gomez-Pinilla, 2006; Ding et al., 2004; Lojovich, 2010; Swain et al., 2003). Festzuhalten bleibt, dass alle genannten Forschungsbefunde zum positiven Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität in Einklang mit den bereits 1980 von Spirduso vorgestellten Überlegungen stehen.

2.4.2 Neurotransmitter

Der zweite wichtige Bereich neurobiologischer Wirkmechanismen sind die Neurotransmitter. Auch hier konnten bewegungsinduzierte Veränderungen in den verschiedenen Systemen gezeigt werden. Körperlich-sportliche Bewegung scheint die Aktivität sowohl des opioiden (Sforzo, Seeger, Pert, & Pert, 1986) als auch des glutamatergen Systems (Molteni, Ying, &

Gómez-Pinilla, 2002) zu steigern und Auswirkungen auf die jeweiligen Rezeptoren zu haben. Im Hippocampus nimmt infolge von Bewegungsaktivität die Expression beider Untereinheiten des N-Methyl-D-Aspartat(NMDA)-Rezeptors zu (Farmer et al., 2004; Molteni, et al., 2002). Ein Mangel an einer dieser Untereinheiten (NR2A) verhindert die bewegungsinduzierte Steigerung der Expression des Proteins BDNF (brain-derived neurotrophic factor) und der Neurogenese (Kitamura, Mishina, & Sugiyama, 2003). Dem NMDA-Rezeptor-Komplex wird eine wichtige Funktion im Zusammenhang mit Lernen und dem Gedächtnisabruf zugeschrieben.

Daneben regt körperliche Aktivität auch das monaminerge System an (Chaouloff, 1989). Der bewegungsinduzierte Anstieg des Kalziumspiegels im Serum führt mittels Aktivierung bestimmter Enzyme zu einem Anstieg der Katecholaminsyntheserate (Noradrenalin und Dopamin) im Gehirn (Sutoo & Akiyama, 1996). In Bezug auf den peripheren Dopaminspiegel ist die Studienlage allerdings nicht eindeutig. Während einige Studien weder während (Kraemer et al., 1999; Nybo, Nielsen, Blomstrand, Møller, & Secher, 2003) noch nach (Wang et al., 2000) körperlicher Belastung einen Anstieg feststellen konnten, gelang dies in anderen Studien (Meeusen & De Meirleir, 1995; Ruscheweyh et al., 2011; Sutoo & Akiyama, 2003). Dopamin spielt bei Lernvorgängen und kognitiven Kontrollprozessen eine zentrale Rolle. Lernen dürfte sowohl bei Tieren (Jay, 2003; Wise, 2004) als auch beim Menschen (Fiorillo, 2004; Flöel et al., 2005; Flöel, Hummel, Breitenstein, Knecht, & Cohen, 2005; Knecht et al., 2004) durch Dopamin moderiert sein (Ruscheweyh, et al., 2011). Ferner spielt es bei kognitiven Kontrollprozessen insbesondere auch des Arbeitsgedächtnisses eine wichtige Rolle. Kognitive Kontrolle scheint in Abhängigkeit von der geforderten Aufgabe und den betrachteten Gehirnregionen jeweils ein optimales (und nicht maximales) Dopamin-Niveau zu erfordern, um die notwendige Ausgewogenheit zwischen kognitiver Stabilität und kognitiver Flexibilität zu sichern (Cools & D'Esposito, 2011).

Bewegung vermehrt ferner die Tryptophan-Hydroxylase, den limitierenden Faktor bei der Biosynthese von Serotonin in den Raphe-Kernen (Nuclei raphes) im Hirnstamm (Chaouloff, 1989). Serotonin-Rezeptoren des Gyrus dentatus, einem Teil des Hippocampus, empfangen dann von dort verstärkt serotonerge Signale (van Praag, 2009). Serotonin spielt im Zusammenhang mit Depression eine Schlüsselrolle. Die bewegungsinduzierte Aktivierung des serotonergen Systems wirkt sich somit günstig auf depressive Erkrankungen aus (Cooney et al., 2013; Lawlor & Hopker, 2001). Es existieren darüber hinaus Hinweise,

dass körperlich-sportliche Aktivität ähnlich effektiv wie eine Behandlung mit Antidepressiva (Babyak et al., 2000) wirken könnte.

2.4.3 Neurotrophine

Neurotrophine sind körpereigene Neuromodulatoren, die in engem Zusammenhang mit strukturellen und funktionalen Veränderungen des Gehirns stehen (Lojovich, 2010). Bei diesem dritten Bereich handelt sich um eine Familie von Proteinen, die als Signalstoffe entscheidende Bedeutung für die Entwicklung, Funktionalität und den Erhalt der Neuronen sowohl im peripheren als auch zentralen Nervensystem haben (Hempstead, 2006; Reichardt, 2006). Neben den Wachstumsfaktoren NGF (nerve growth factor), Neurotrophin-3 (NT-3) und Neurotrophin-4/5 (NT 4/5) wird auch das bereits erwähnte und mit den Nervenwachstumsfaktoren eng verwandte Protein BDNF zu den Neurotrophinen gezählt.

Dieses Protein gilt als wesentlicher und durch sportlich-körperliche Aktivität gut hochregulierbarer Wirkfaktor auf synaptische Plastizität (van Praag, 2009). Es moduliert über den Synaptophysin/Synaptobrevin-Komplex synaptische Aktivität. Die Vesikelproteine dieses Komplexes ermöglichen das Andocken und Verschmelzen von Vesikeln mit der Synapse. Je mehr Vesikel andocken, desto besser kann die Synapse auf hochfrequente präsynaptische Stimulation reagieren, was zu einer anhaltenden Stärkung dieses synaptischen Kontaktes (= Langzeit-Potenzierung; eng: long-term potentiation, LTP) und verbesserter Lernleistung führt (Lojovich, 2010; Pozzo-Miller et al., 1999). Die erwartete positive Wirkung von körperlicher Bewegung auf das Lernpotential, die Anpassungsfähigkeit und damit kognitive Reserve könnte deshalb über die Hochregulation des Neurotrophins BDNF und die dadurch verbesserte synaptische Plastizität moderiert werden (Cotman, et al., 2007; Vaynman, Ying, Yin, & Gomez-Pinilla, 2006).

Viele Tierstudien (u.a. Cotman & Berchtold, 2002; Neeper, Goautomez-Pinilla, Choi, & Cotman, 1995; Neeper, Gómez-Pinilla, Choi, & Cotman, 1996; van Praag, Christie, Sejnowski, & Gage, 1999; Vaynman & Gomez-Pinilla, 2005) und in zunehmendem Maße auch Studien mit Menschen (Ferris, Williams, & Shen, 2007; Gold et al., 2003; Schulz et al., 2004; Winter et al., 2007) zeigen einen Anstieg der BDNF Genexpression (BDNF mRNA) infolge von körperlich-sportlicher Aktivität. Dabei erscheinen für die vorliegende Arbeit drei Dinge bemerkenswert: Zum einen ist die über Neurotrophine initiierte

Neurogenese infolge körperlich-sportlicher Aktivität vorrangig auf die hippocampale Region beschränkt (Brown et al., 2003; Galvao, Garcia-Verdugo, & Alvarez-Buylla, 2008; Neeper, et al., 1995; Neeper, et al., 1996; Scharfman et al., 2005). Weiterhin haben vermutlich Dauer (Neeper, et al., 1995) und Intensität der Bewegung (Ferris, et al., 2007) direkten Einfluss auf die Veränderungen von BDNF bzw. BDNF mRNA. Überdies interagieren BDNF Genexpression und Serotonin (van Praag, 2009): Eine Aktivierung von Serotoninrezeptoren führt zu einer erhöhten BDNF Genexpression im Hippocampus (Vaidya, Marek, Aghajanian, & Duman, 1997), während umgekehrt die Verabreichung von BDNF die Expression von Tryptophan-Hydroxylase in den Raphe-Kernen steigert (Siuciak, Clark, Rind, Whitemore, & Russo, 1998).

Neben diesen strukturellen Befunden stehen schließlich auch Verhaltensmaße kognitiver Leistungen in enger Verbindung mit dem Neurotrophin BDNF. So korreliert ein höherer BDNF Serumspiegel positiv mit allgemeinen kognitiven Fähigkeiten sowie Teilaspekten des Gedächtnisses (Erickson et al., 2010b; Erickson et al., 2011; Komulainen et al., 2008).

3 Forschungsstand: Körperliche Aktivität und Kognition

Ziel dieses dritten Kapitels ist es, anhand aktueller Forschungsbefunde den lebenslangen Einfluss körperlich-sportlicher Aktivität und der dadurch bedingten körperlichen Fitness auf die kognitive Gesundheit zu skizzieren. Dafür werden, unterteilt in die Lebensphasen Adoleszenz sowie höheres Erwachsenenalter, aktuelle Befunde zu strukturellen und funktionellen Aspekten dargestellt.

Doch vorab ein kurzer Hinweis bezüglich der verwendeten sportwissenschaftlichen Fachtermini: Ganz allgemein hat körperlich-sportliche Aktivität positive Auswirkungen auf die körperliche Fitness. In der vorliegenden Arbeit geht es insbesondere um die Wirkung von körperlich-sportlicher Aktivität auf die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit, auch kardiorespiratorische oder aerobe Fitness genannt. Kardiorespiratorische Fitness ist als zentraler Aspekt der körperlichen Fitness Indikator für die Leistungsfähigkeit der Atmung und des Blutkreislaufes bei der Sauerstoffversorgung des Körpers. Aerobe Trainingsformen verbessern die Sauerstoffaufnahmefähigkeit und damit die kardiorespiratorische oder aerobe Fitness. Aerob bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Intensität der körperlich-sportlichen Aktivität so gewählt ist, dass der Körper mit mindestens soviel Sauerstoff versorgt werden kann, wie er verbraucht (Wilmore, Costill, & Kenney, 2008)

3.1 Adoleszenz

Die Forschung in den neurokognitiven Bewegungswissenschaften fokussierte sich seit dem Ende der 1990er Jahre zunächst verstärkt auf das höhere Erwachsenenalter (vgl. Kramer, et al., 1999). Im Vergleich entwickelte sich das Interesse an der Wirkung von Bewegung auf die kognitive Leistungsfähigkeit bei jungen Menschen erst in den letzten Jahren (Hillman & Schott, 2013). Dementsprechend gibt es bis dato nur wenige Befunde für genau diesen Altersbereich. Die nachfolgend dargestellte Forschung bezieht deshalb die angrenzenden Zeitabschnitte der Präadoleszenz und des jungen Erwachsenenalters mit ein. Ausgangsbasis ist die Metaanalyse von Sibley und Etnier (2003). Sie war ein wichtiger Impuls, der weitreichenden Bedeutung von körperlich-sportlicher Aktivität für die im Entwicklungsprozess befindlichen kognitiven Funktionen grundsätzlich mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Die Autoren konnten zeigen, dass verschiedene kognitive Teilbereiche wie die Wahrnehmung,

der Intelligenzquotient sowie die verbalen und mathematischen Fähigkeiten, positiv mit körperlicher Aktivität korrelieren. Mittlerweile beschäftigt sich eine stetig wachsende Anzahl von Studien mit diesem Zusammenhang, auf die im Folgenden eingegangen wird.

3.1.1 Strukturelle Befunde

Drei jüngere Untersuchungen nutzten zum ersten Mal die Magnetresonanztomographie (MRT) als bildgebendes Verfahren, um bei Kindern neue Erkenntnisse über die Zusammenhänge von kardiorespiratorischer Fitness, Gehirnstruktur und Kognition zu gewinnen. Die Forschungsbefunde beziehen sich zum einen auf die hippocampale Region (Chaddock et al., 2010a; Chaddock, Pontifex, Hillman, & Kramer, 2011b) und zum anderen auf die Basalganglien (Chaddock et al., 2010b). In der Studie von Chaddock et al. (2010a) wurde bei präadoleszenten Kindern (9-10 Jahre) mit hoher aerober Leistungsfähigkeit ein größeres bilaterales Volumen des Hippocampus festgestellt als bei Kindern der weniger fiten Vergleichsgruppe¹. Das relationale oder explizite Gedächtnis speichert Informationen, die bewusst wiedergegeben werden können. Leistungen dieses Gedächtnissystems werden dabei durch den Hippocampus mediiert (Cohen & Eichenbaum, 1993; Cohen et al., 1999). Bestätigend konnte nun hier bei Kindern gezeigt werden, dass relationale Gedächtnisleistungen, die mit Strukturen des Hippocampus assoziiert sind, von körperlich-sportlicher Aktivität profitieren, während sich bei anderen Teilaspekten des Gedächtnisses kein Leistungsvorteil ergab. Das bilaterale hippocampale Volumen vermittelt somit den Zusammenhang zwischen Fitness und relationaler Gedächtnisleistung (Chaddock, et al., 2010a). Diese Ergebnisse stehen sowohl im Einklang mit jüngeren Daten präadoleszenter Kinder (Chaddock, Hillman, Buck, & Cohen, 2011a), als auch mit Ergebnissen älterer Erwachsener (Erickson et al., 2009) sowie tierexperimentellen Befunden (Neeper, et al., 1995; van Praag, et al., 1999). Ergänzend sei angemerkt, dass Sibley und Etnier (2003) in ihrer Metaanalyse keinen Zusammenhang zwischen körperlich-sportlicher Aktivität und Gedächtnisleistungen feststellen konnten. Dies liegt möglicherweise darin begründet, dass dort eher allgemeine Gedächtnisleistungen verglichen wurden, während Chaddock et al. (2010a) Gedächtnisleistungen mit und ohne hippocampaler Beteiligung unterschieden haben. In

¹ Ist im Folgenden von fiten und weniger fiten Studienteilnehmern die Rede, so meint dies in der Regel mindestens Prozentrang 70 (fit) und höchstens Prozentrang 30 (weniger fit) bezogen auf die Normdaten der aeroben Fitness von Shvartz und Reibold (1990).

einer weiteren Studie haben Chaddock und ihre Kollegen (2011b) nachfolgend überprüft, ob das aerobe Fitnessniveau sowie das hippocampale Volumen der Kinder zukünftige räumliche Gedächtnisleistungen vorhersagen können. Beide Parameter erwiesen sich ein Jahr später als zuverlässige Prädiktoren.

Eine zweite Gehirnregion, die sich aufgrund körperlich-sportlicher Aktivität strukturell zu verändern scheint, sind die Basalganglien. Es handelt sich dabei um eine Gruppe subkortikaler Strukturen, die sich in das dorsale und ventrale Striatum aufteilen (Chaddock, et al., 2011b). Letzteres ist ein wichtiger Teil des Affekt- und Belohnungssystems, während das dorsale Striatum in solchen Reiz-Reaktions-Situationen eine zentrale Rolle spielt, die vermehrt kognitive Kontrolle erfordern (vgl. Aron, Poldrack, & Wise, 2009; Casey, et al., 2008; Di Martino et al., 2008; Draganski et al., 2008; Graybiel, 2005, 2008; Ragozzino, Jih, & Tzavos, 2002). Chaddock et al. (2010b) verglichen bei 9 bis 10 Jährigen mit unterschiedlicher aerober Fitness die Fähigkeit zur kognitiven Kontrolle als wichtigen Parameter für alle Lernprozesse und das Volumen spezifischer Regionen der Basalganglien. Die gefundenen Ergebnisse entsprachen den Erwartungen und gehen mit bisherigen Daten konform (Aron, et al., 2009; Casey, et al., 2008; Graybiel, 2005): Kinder mit geringer aerober Leistungsfähigkeit zeigten verminderte kognitive Kontrollfähigkeiten, die mit kleinerem Volumen im dorsalen Striatum (u.a. Nucleus caudatus, Putamen, Globus pallidus) assoziiert waren. Der Volumenvergleich des ventralen Striatum hingegen ergab keinen Unterschied zwischen den Fitnessgruppen (Chaddock, et al., 2010b). Dieses Ergebnis stützt jene Befunde, die einen positiven Zusammenhang zwischen aerober Fitness, Inhibition und dem Volumen des Globus pallidus, einer Ausgangsregion der Basalganglien, zeigen konnten (Aron, et al., 2009; Di Martino, et al., 2008; Draganski, et al., 2008). Jüngste Forschungsergebnisse legen außerdem nahe, dass neben dem Volumen des dorsalen Striatums auch die Mikrostruktur der weißen Substanz eine wichtige Rolle bei der kognitiven Kontrolle spielt (Chaddock-Heyman et al., 2013). Positive Auswirkungen von körperlich-sportlicher Aktivität auf die weißen Substanz erscheinen in dem Zusammenhang plausibel (vgl. Perrin, et al., 2008; Scholz, Klein, Behrens, & Johansen-Berg, 2009).

3.1.2 Funktionelle Befunde

Eine zunehmende Anzahl von Studien versucht mit Hilfe neuroelektrischer Methoden wie der Elektroenzephalografie (EEG), moderner bildgebender Verfahren wie der funktionalen

Magnetresonanztomographie (fMRT) sowie Verhaltensmaßen die Auswirkungen körperlich-sportlicher Aktivität auf die Gehirnfunktion im Kindesalter zu untersuchen. Nachfolgend werden zuerst Befunde zur Auswirkung von aerober Leistungsfähigkeit betrachtet und anschließend akute Trainingseffekte dargestellt.

Aerobe Leistungsfähigkeit

Bei der Analyse von elektroenzephalografischer Aktivität im Zusammenhang mit aerober Fitness und körperlicher Bewegung interessieren meist zwei Typen ereigniskorrelierter Potentiale (EKPs): Zum einen wird die P300-Komponente (\cong P3) genutzt, um Informationen bezüglich der Aufmerksamkeitsressourcen und der Qualität der Reizentdeckung und Reizevaluation zu erhalten. Zum anderen kann die sogenannte Error-Related Negativity (ERN) Aussagen bezüglich der Handlungsüberwachung machen. Die P3-Komponente ist ein im EEG gut nachweisbarer und aufgrund neuronaler Inhibition positiverer Aktivierungsgipfel, der ungefähr 300 Millisekunden nach dem relevanten Reiz auftritt (Polich, 2007). Die Amplitude der P3-Amplitude repräsentiert das Ausmaß der Unterdrückung irrelevanter neuronaler Aktivitäten zur Erleichterung von Aufmerksamkeitsprozessen (Azizian & Polich, 2007; Kok, 2001; Polich, 1987; Polich & Heine, 1996). Sie ist somit das elektrophysiologische Korrelat von veränderten mentalen Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis aufgrund neuer Stimuli (Context Updating Theory, Donchin, 1981; Donchin & Coles, 1988). Die P3-Latenzzeit hingegen gilt als Zeitmaß für Reizklassifizierung, Reizevaluation und antwortbezogene Prozesse (Duncan-Johnson, 1981; Ilan & Polich, 1999; Kutas, McCarthy, & Donchin, 1977; Magliero, Bashore, Coles, & Donchin, 1984; Verleger, 1997). Sowohl bei der Amplitude wie auch den Latenzzeiten der P3-Komponente unterschieden sich sportlich aktive präadoleszente Kinder zwischen 9 und 10 Jahren von ihren weniger aktiven Altersgenossen. Aerob fittere Kinder realisierten in Reizdiskriminierungsaufgaben sowohl größere P3-Amplituden, die auf größere zur Verfügung stehende Aufmerksamkeits- und Arbeitsgedächtnisressourcen verweisen, als auch kürzere P3-Latenzzeiten, die auf eine schnellere Reizklassifizierung hindeuten (Hillman, Buck, Themanson, Pontifex, & Castelli, 2009a; Hillman, Castelli, & Buck, 2005). Fittere Kinder des gleichen Altersbereiches waren darüber hinaus deutlich besser in der Lage, die P3-Amplitude entsprechend den Anforderungen an die kognitive Kontrolle zu modulieren und so flexibel ihre Aufmerksamkeitsressourcen zuzuweisen (Pontifex et al., 2011). Hillman (2012) schlägt aufgrund seiner Daten vor, die P3-Komponente als einen möglichen

neuroelektrischen Biomarker für Schulleistung zu nutzen. Er konnte an präadoleszenten Kindern zeigen, dass größere P3-Amplituden mit besseren Inhibitions- und Arbeitsgedächtnisleistungen assoziiert sind, von denen die Rechen- und Leseleistungen der jungen Schüler profitieren.

Das zweite aussagekräftige Ergebnismaß in EKP-Studien sind die ERN-Potentiale. Sie ermöglichen die Untersuchung von verschiedenen kognitiven Aspekten, die in Zusammenhang mit der Handlungsüberwachung stehen (Hillman, et al., 2009a; Pontifex, et al., 2011). ERN-Potentiale sind antwortabhängige ereigniskorrelierte negative Potentiale, die nach dem Erkennen einer fehlerhaften Reaktion auftreten und als elektrophysisches Korrelat von Fehlerentdeckung und -verarbeitung (Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993; Holroyd & Coles, 2002) sowie Konfliktüberwachung (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001; Yeung, Botvinick, & Cohen, 2004) aufgefasst werden. Für Chaddock, et al. (2011b) signalisieren ERN-Potentiale die Initiierung der Handlungsüberwachung, um als Reaktion auf fehlerhaftes Verhalten kompensatorische Top-down-Prozesse zu aktivieren. Als kritische Gehirnregion für die Erzeugung dieser ERN gilt der dorsale Teil des anterioren cingulären Cortex (Carter et al., 1998; Dehaene, Posner, & Tucker, 1994; Miltner et al., 2003). Sowohl bezüglich der realisierten ERN-Amplitude als auch der Fähigkeit die ERN-Amplitude zu modulieren, differieren unterschiedlich fitte Kinder: Die aerob leistungsfähigeren Kinder erzeugten bei Reizdiskriminierungsaufgaben bei denen eine hohe Antwortgeschwindigkeit gefordert war, kleinere ERN-Amplituden und gingen effektiver mit Ressourcen zur Handlungsüberwachung um (Hillman, et al., 2009a; Pontifex, et al., 2011). Insgesamt legen die Ergebnisse der Studien mit neuroelektrischen Methoden nahe, dass aerob fittere präadoleszente Kinder offenbar über größere Ressourcen für eine effizientere Verarbeitung von Umweltreizen verfügen, ohne gleichzeitig übermäßig Ressourcen zur Handlungsüberwachung einzusetzen. Bei ihnen kommen diese erst bei steigender Aufgabenschwierigkeit zum Einsatz. Körperlich weniger fitte Kinder mit geringerer Flexibilität bei der Ressourcenzuteilung zeigen hingegen bei steigender Aufgabenschwierigkeit und dadurch höherem Konfliktpotential schlechtere Leistungen (Chaddock, et al., 2011b; Hillman, et al., 2009a; Hillman, et al., 2005; Pontifex, et al., 2011).

Neuere Ergebnisse einer ersten fMRT-Studie mit normalgewichtigen Kindern stützen diese Forschungsbefunde. Voss et al. (2011a) konnten zeigen, dass in einer modifizierten Flanker-Aufgabe, eingesetzt zur Erforschung kognitiver Kontrollprozesse, die Fehlerrate

der aerob weniger fitten 9 bis 10 Jährigen unverhältnismäßig stark anstieg, wenn die Aufgabenschwierigkeit zunahm. Diese verhaltensbasierten Befunde standen im Einklang mit der beobachteten Aktivitätserhöhung in präfrontalen Gehirnarealen (Gyrus frontalis medius, anteriorer cingulärer Cortex), die für verändertes Antwortverhalten und schlechtere Inhibition sowie Aufmerksamkeitskontrolle relevant sind. Neben dieser Studie mit normalgewichtigen Kindern unterstreichen zwei Interventionsstudien mit übergewichtigen Altersgenossen noch weiter die enorme Bedeutung von körperlicher Aktivität auf die kognitive Entwicklung. Infolge eines 3-monatigen Sportprogramms konnten dort signifikante Verbesserungen im Bereich der Planungsleistung, Aufmerksamkeitskontrolle und Inhibition gezeigt werden (Davis et al., 2007; Davis et al., 2011). Die fMRT-Daten der zweiten Studie spiegelten konsistent die beobachteten Verhaltensmaße wider. Im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigte die aktive Interventionsgruppe bilateral eine erhöhte präfrontale Kortexaktivierung bei gleichzeitiger posteriorer Aktivitätsabnahme (Davis, et al., 2011). Diese Beobachtungen stehen in Einklang sowohl mit den Verhaltensmaßen als auch den Veränderungen der Aktivierungsmuster, die infolge von körperlich-sportlicher Aktivität bei Erwachsenen gefunden wurden (Colcombe, et al., 2004; Pereira et al., 2007). Eine weitere Querschnittsstudie mit präadoleszenten Kindern im Altersbereich von 7 bis 12 Jahren beschäftigte sich mit dem Einfluss unterschiedlicher aerober Leistungsfähigkeit auf die Kontrolle von Interferenz, einem Teilaspekt kognitiver Kontrolle (Buck, Hillman, & Castelli, 2008). Als Verhaltensmaß der Interferenzkontrolle diente die Anzahl korrekt benannter Items im Stroop-Test, einem Verfahren, das die Fähigkeit der Reaktionshemmung auf irrelevante Stimuli überprüft (vgl. Stroop, 1935). Auch hier bestätigte sich der positive Einfluss von Fitness auf die kognitive Kontrolle während der präadoleszenten Entwicklung: Unabhängig von Alter, Geschlecht und Intelligenz konnten die aerob leistungsfähigeren Kinder mehr Items korrekt benennen als die weniger fitte Vergleichsgruppe (Buck, et al., 2008).

Die verschiedenen Bereiche der exekutiven Funktionen (oder kognitiven Kontrolle) entwickeln sich insbesondere, aber keinesfalls ausschließlich während der Kindheit und sind von zentraler Bedeutung für die Anpassungsfähigkeit und Verhaltenskontrolle (Best, Miller, & Jones, 2009). Angesichts der heutigen schulischen Anforderungen einerseits und des zunehmenden Bewegungsmangels mit seinen gesundheitlichen Folgeerscheinungen andererseits, haben die vorgestellten Studien von Voss et al. (2011a), Buck, et al. (2008)

und Davis, et al. (2007; 2011) eine besondere Bedeutung. Sie leisten einen wichtigen Beitrag das bidirektionale Zusammenspiel von körperlicher Fitness respektive Übergewicht und Kognition gerade auch im Kindes- und Jugendalter besser zu verstehen. Die Studien liefern Hinweise darauf, welche neuronalen Substrate durch körperlich-sportliche Aktivität in diesem Altersbereich beeinflusst werden können. Außerdem festigen sie die Annahme, dass körperlich-sportliche Bewegung eine einfache und wichtige Methode zu sein scheint, exekutive Leistungen wie die Kontrolle der Aufmerksamkeit und die Inhibition positiv zu beeinflussen (Buck, et al., 2008; Davis, et al., 2007; Davis, et al., 2011; Stroth et al., 2009; Voss, et al., 2011a).

Akute Trainingseffekte

Während sich die bisher skizzierten Forschungsergebnisse auf regelmäßige sportliche Aktivität beziehen, konnte sich die Forschung zum Einfluss einmaliger sportlicher Belastungen auf die kognitive Leistung innerhalb der neurokognitiven Bewegungswissenschaften bislang noch nicht wirksam etablieren. Blickt man auf den Alltag unserer Schüler, erscheint es wichtig, die bereits existierenden Forschungsergebnissen als Ausgangspunkt für weitere Studien zu nutzen, um tiefergehende Erkenntnisse zum unmittelbaren Einfluss einzelner Trainingseinheiten auf die Kognition zu erhalten. Bestehende Literaturübersichten und Metaanalysen deuten darauf hin, dass schon einzelne körperliche Belastungen positiven Einfluss sowohl auf die kognitive als auch schulische Leistungsfähigkeit von Kindern haben können (vgl. Chang, Labban, Gapin, & Etnier, 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010; Sibley & Etnier, 2003; Tomporowski, 2003; Tomporowski, Davis, Miller, & Naglieri, 2008). Die ersten Studien in diesem Bereich lieferten bereits vor einigen Jahren Hinweise, dass Konzentrations- und Schulleistungen positiv durch einzelne Trainingseinheiten beeinflusst werden können (Gabbard & Barton, 1979; McNaughten & Gabbard, 1993).

Verschiedene Studien mit jungen Erwachsenen zeigten, dass es aktivierungsbedingt zu verbesserten Reaktionszeiten bei gleichzeitig nachlassender Genauigkeit kam, wenn während körperlicher Belastung Aufgaben durchgeführt wurden, die kognitive Kontrolle erforderten (Audiffren, Tomporowski, & Zagrodnik, 2009; Davranche, Hall, & McMorris, 2009; Davranche & McMorris, 2009; McMorris, Sproule, Turner, & Hale, 2011). Dies steht im Einklang mit dem theoretischen Modell der transienten Hypofrontalität und den Befunden von Dietrich und Sparkling (2004), die beeinträchtigte exekutive Leistungen

während körperlicher Aktivität beschreiben (vgl. auch Dietrich, 2006). McMorris et al. (2011) halten die aufgrund von Bewegung gesteigerte Katecholaminkonzentration sowie das Ansteigen von neuronalem Rauschen verantwortlich für die erhöhte Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und den Genauigkeitsabfall. Interessant erscheint in diesem Zusammenhang allerdings, dass präadoleszente Kinder während einer moderaten Walking-Belastung keine Einbußen bezüglich kognitiver Kontrolle zeigten (Drollette, Shishido, Pontifex, & Hillman, 2012). Dies könnte entweder am Altersbereich oder an der Art der Belastungen liegen (vgl. Lambourne & Tomporowski, 2010).

Betrachtet man nun akute Trainingseffekte nach einer einzelnen körperlichen Belastung, so zeigen sich die Aufmerksamkeitsleistung und die kognitive Kontrolle verbessert: Yanagisawa et al. (2010) führten mit 19 bis 24jährigen jungen Erwachsenen eine Untersuchung zum Zusammenhang von zerebraler Aktivierung und Interferenzkontrolle infolge einer einzelnen körperlichen Belastung durch. Die Autoren konnten mittels funktioneller Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) zeigen, dass eine 10-minütige Fahrradergometerbelastung zu einer erhöhten Aktivierung des linken dorsolateralen präfrontalen Kortex und einer damit in Verbindung stehenden signifikant verbesserten Interferenzkontrolle im Stroop-Test führte (Yanagisawa, et al., 2010). Auch in der Studie von Hillman et al. (2009b) reichte bereits eine einmalige Ausdauertrainingseinheit aus, um positive Effekte bezüglich der Aufmerksamkeit, der kognitiven Kontrollfähigkeit sowie der Schulleistung zu erzielen. Nach einer 20-minütigen Laufbandbelastung im Bereich von etwa 60 % der maximalen Herzfrequenz zeigten 9 bis 10 Jährige eine höhere Antwortgenauigkeit in einer modifizierten Flanker-Aufgabe, größere P3-Amplituden unter Bedingungen, die ein größeres Ausmaß an kognitiver Kontrolle erforderten sowie verbesserte Leseleistungen im Vergleich zur Ruhebedingung (vgl. Hillman, Snook, & Jerome, 2003; Magnié et al., 2000). Drollette et al. bestätigten 2012 diese Ergebnisse bezüglich der inhibitorischen Kontrolle in einer Flanker-Aufgabe nochmals. Eine erst jüngst veröffentlichte Studie konnte die genannten Befunde sowohl auf neuropsychologischer und neuroelektrischer Beschreibungsebene als auch auf Verhaltensebene erneut replizieren (Pontifex, Saliba, Raine, Picchiatti, & Hillman, 2013). Diese Studie von Pontifex et al. (2013) zeigte darüber hinaus, dass intensive Übungseinheiten auch bei Kindern mit einer Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS) zu vergleichbaren positiven Effekten bezüglich Antwortgenauigkeit, kognitiver Kontrolle sowie Schulleistungen führten. Einen anderen, sehr

praxisorientierten Forschungsansatz zum Einfluss von Bewegung auf die Aufmerksamkeitsleistung verfolgt Mahar (2011). Er untersucht mittels direkter Verhaltensbeobachtung („attention-to-task“-Variable) den positiven Einfluss von aktiven Bewegungspausen auf die aufgabenbezogene schulische Aufmerksamkeit (Mahar et al., 2006; Mahar, 2011).

Neben den Befunden die Aufmerksamkeit und kognitive Kontrolle betreffend, liegen vereinzelt auch Daten zu akuten Trainingseffekten aus dem Bereich des Gedächtnisses vor, auf die nachfolgend kurz eingegangen wird. Aus konzeptioneller Sicht liegt das Arbeitsgedächtnis an der Schnittstelle zwischen Aufmerksamkeit und Gedächtnis (Baddeley & Sala, 1998), was eine exakte Zuordnung der Befunde nicht immer leicht macht (vgl. McMorris, et al., 2011). Die Leistungen in einer klassischen Arbeitsgedächtnisaufgabe (n-back) scheinen bei 9 bis 11 jährigen präadoleszenten Kindern weniger von einmaligen Trainingseinheiten zu profitieren, als die zuvor genannten Bereiche. In einer räumlichen Variante der n-back Aufgabe konnte kein positiver akuter Effekt nach körperlicher Aktivität festgestellt werden (Drollette, et al., 2012). Andererseits sind Arbeitsgedächtnisleistungen auch für das Lernen und den Abruf von Gedächtnisinhalten eminent wichtig. Eine Studie mit 11 bis 12 Jährigen zum Einfluss von Bewegung auf das Gedächtnis verglich zwei unterschiedliche Interventionsgruppen (Ausdauerzirkel versus Mannschaftsspiel) bezüglich ihrer unmittelbaren sowie verzögerten Gedächtnisleistung (Pesce, Crova, Cereatti, Casella, & Bellucci, 2009). Die Kinder sollten nach ihrem jeweiligen Training 20 Wörter auswendig lernen und diese 100 bzw. 720 Sekunden nach Beendigung der Lernphase wiedergeben. Das Training der beiden Interventionsgruppen unterschied sich dabei weder bezüglich der Dauer (40 Minuten) noch der Intensität (Mittlere Herzfrequenz: 140 Schläge/Minute). Ergebnis: Im Vergleich zum Prätest war die Anzahl der erinnerten Wörter beim verzögerten Abruf bei beiden Interventionsgruppen höher. Allerdings konnte beim unmittelbaren Abruf nur die Spielgruppe eine bessere Leistung erzielen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass neben physischer Aktivierung auch kognitive Aktivierung durch soziale Anforderungen Einspeicherungsprozesse erleichtern könnten (Pesce, et al., 2009).

Bislang wurden nur die akuten Trainingseffekte einzelner Ausdauertrainingseinheiten betrachtet. Die Studie von Budde et al. (2008) ging der Frage nach, welchen Effekt auf die Aufmerksamkeits- und Konzentrationsleistung ein 10-minütiges Koordinationstraining im Vergleich mit gewöhnlichen Trainingsinhalten hat. Die 13 bis 16 jährigen Teilnehmer trainierten in der einen Gruppe bilaterale koordinative Fertigkeiten, während in der

Vergleichsgruppe die Inhalte einer normalen Sportstunde ohne koordinative Aspekte geübt wurden. Die moderate Intensität beider Programme wurde mittels Herzfrequenz kontrolliert (Mittlere Herzfrequenz: 120 Schläge/Minute). Die gefundenen Ergebnisse sind sowohl für den Schulalltag als auch für weitere Forschung relevant: Das Koordinations-training führte zu einer besseren Aufmerksamkeits- und Konzentrationsleistung als eine rein körperliche Aktivierung vergleichbaren Ausmaßes. Die koordinativen Inhalte dieses Trainings, so mutmaßen die Autoren, könnten zu einer Voraktivierung von Gehirnarealen führen, die eng mit Aufmerksamkeitsleistungen assoziiert sind (Budde, et al., 2008). Neben Ausdauerbelastungen könnten somit koordinative Trainingsinhalte ganz spezifische Effekte auf das Gehirn haben, was bereits tierexperimentell gezeigt werden konnte (Isaacs, Anderson, Alcantara, Black, & Greenough, 1992).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bislang noch sehr wenige Studien vorliegen, die sich genau auf den Altersbereich der Adoleszenz beziehen. Die meisten Untersuchungen wurden entweder mit präadoleszenten Kindern oder jungen Erwachsenen durchgeführt. Trotzdem kann mit wachsender Evidenz resümiert werden, dass sportliche Aktivitäten förderlich für die körperliche und kognitive Entwicklung junger Menschen sind. Insbesondere profitieren im kognitiven Bereich auf struktureller und funktioneller Ebene die Domänen Aufmerksamkeit, kognitive Kontrolle und Gedächtnis.

3.2 Höheres Erwachsenenalter

Die prognostizierte demografische Entwicklung unserer Gesellschaft zusammen mit den empirischen Daten altersbedingter kognitiver Abbauprozesse veranlassten die Wissenschaft in den letzten Jahren, verstärkt nach Wirkfaktoren erfolgreichen Alterns zu suchen (vgl. Lustig, et al., 2009; Raz, 2005). Ein Aspekt der dabei zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist körperlich-sportliche Bewegung mit ihren unterschiedlichen Effekten auf die kognitive Gesundheit. Es mehren sich die Befunde, dass physische Aktivität zugleich Erklärung und Schutzfaktor für individuell unterschiedliche Verläufe des altersbedingten kognitiven Abbaus sein könnte. Gerade jene frontalen, parietalen und medial-temporalen Gehirnareale, die mit Gedächtnisleistungen und exekutiven Funktionen assoziiert, aber auch chronologisch am frühesten vom Abbau betroffen sind, scheinen diejenigen zu sein,

die am sensibelsten auf körperlich-sportliche Aktivität reagieren. Nachfolgend ein Überblick zur aktuellen Forschung in diesem Altersbereich.

3.2.1 Strukturelle Befunde

Die erste Studie von zentraler Bedeutung zum Zusammenhang von aerober Fitness und der biologischen Basis kognitiver Funktionen wurde 2003 von Colcombe et al. durchgeführt. Sie untersuchten mittels voxel-basierter Morphometrie sowohl die graue als auch die weiße Hirnsubstanz einer Gruppe älterer Menschen zwischen 55 und 79 Jahren mit unterschiedlicher kardiorespiratorischer Fitness. Erwartungsgemäß fand man zunächst einen altersabhängigen Abbau der Gewebsdichte im präfrontalen, parietalen und temporalen Lappen. Entscheidend war jedoch, dass dieser Abbau in Abhängigkeit vom Niveau der aeroben Fitness unterschiedlich stark ausfiel. So konnten zum ersten Mal positive Effekte aerober Fitness auf das Gehirnvolumen in vivo nachgewiesen sowie erste Hinweise auf eine noch immer hohe Plastizität des alternden Gehirns gefunden werden (Colcombe, et al., 2003). Einen weiteren Beleg für den positiven Einfluss von körperlich-sportlicher Leistungsfähigkeit auf Gehirnstrukturen lieferte eine Studie von Erickson et al. (2007a) zu interaktiven Effekten von Fitness und Hormontherapie bei postmenopausalen Frauen im Alter von 58 bis 80 Jahren. Neben den wichtigen Erkenntnissen, dass eine Hormontherapie ab einer Dauer von 10 Jahren mit einem deutlich verstärkten Abbau des präfrontalen Gehirnvolumens gepaart mit größeren exekutiven Leistungseinbußen einhergeht, zeigte sich erneut, dass bei aerob fitteren Frauen im Vergleich altersbedingte Substanzverluste signifikant reduziert waren. Darüber hinaus ergab sich eine Wechselwirkung zwischen Therapiedauer und Fitnessniveau: Präfrontale Areale profitierten mit zunehmender Dauer der Therapie verstärkt von einer größeren kardiovaskulären Fitness (Erickson, et al., 2007a).

In den Folgejahren verstärkte sich das Interesse am Zusammenhang zwischen kognitiven Leistungen und deren neuronalem Korrelat. Es konnte in verschiedenen Studien die naheliegende Annahme untermauert werden, dass der Zusammenhang zwischen aerobem Fitnessniveau und kognitiver Leistungsfähigkeit durch das Volumen der jeweils relevanten Gehirnareale vermittelt wird. So konnten Erickson et al. (2009) den positiven Zusammenhang zwischen aerober Fitness und Hippocampusgröße belegen: In ihrer Studie medierte das hippocampale Volumen den Zusammenhang zwischen kardiorespiratorischer Fitness

und den Ergebnissen in einer räumlichen Gedächtnisaufgabe (Erickson, et al., 2009). Angesichts der zentralen Rolle des Hippocampus im Rahmen von Demenzerkrankungen, haben diese Befunde besondere Bedeutung. Sie fügen sich zudem konsistent in die bereits umfangreich bestehende epidemiologische Literatur zu körperlicher Aktivität und Demenzrisiko ein (Andel et al., 2008; Barnes, Whitmer, & Yaffe, 2007; Larson et al., 2006; Podewils et al., 2005). Ergänzend sei angemerkt, dass körperlich-sportliche Bewegung auch bei bereits dementiell erkrankten älteren Menschen positive Effekte auf physische und kognitive Parameter hat (Heyn, Abreu, & Ottenbacher, 2004).

Eine im Jahre 2012 veröffentlichte Querschnittsstudie von Weinstein et al. kam zu vergleichbaren Ergebnissen wie die zuvor vorgestellte Studie von Erickson et al. (2009). Es wurde untersucht, ob das Volumen der grauen Substanz insbesondere im dorsolateralen präfrontalen Kortex Mediator der Zusammenhänge zwischen kardiorespiratorischer Fitness und Interferenzkontrolle im Stroop-Test einerseits sowie räumlicher Arbeitsgedächtnisleistung andererseits ist. Für beide exekutiven Leistungen konnte dies an einer 142 Probanden umfassenden Stichprobe älterer Menschen (Durchschnittsalter: 66.6 Jahre) mittels voxelbasierter Morphometrie gezeigt werden. Interessanterweise wurden die Zusammenhänge mit den zwei unterschiedlichen exekutiven Teilleistungen von unterschiedlichen Regionen im dorsolateralen präfrontalen Kortex mediiert: Während für die Interferenzkontrolle die rechten Gyri frontalis inferior und praecentralis relevant zu sein scheinen, spielt bei der räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgabe vornehmlich bilateral der Gyrus frontalis medius eine wichtige Rolle (Weinstein et al., 2012).

Um Fragen zur Kausalität beantworten und diesen immanenten Nachteil querschnittlicher Untersuchungen ausgleichen zu können, müssen Interventionsstudien durchgeführt werden. Bereits 2006 interessierte die Forschergruppe um Colcombe, welche Effekte ein systematisches Ausdauertraining auf das Gehirnvolumen älterer Menschen hat. Dafür analysierten sie 59 Studienteilnehmer im Alter von 60 bis 79 Jahren mittels MRT und verteilten sie dann zufällig auf zwei Gruppen. Während die Interventionsgruppe über einen Zeitraum von 6 Monaten an 3 Tagen in der Woche ein 60-minütiges moderates Ausdauertraining (Gehen) absolvierte, durchlief die Kontrollgruppe ein zeitlich identisches Dehn- und Kräftigungsprogramm. Nach Abschluss des Ausdauerprogrammes wurden nur bei der Interventionsgruppe signifikante strukturelle Veränderungen in präfrontalen Regionen festgestellt, die mit der Aufmerksamkeitskontrolle und verschiedenen Gedächtnisprozessen

assoziiert sind. Neben der erhöhten Gewebsdichte der grauen Substanz im anterioren cingulären Cortex, dem supplementär-motorischen Areal, dem rechten Gyrus frontalis inferior sowie dem Gyrus temporalis superior, fanden die Forscher auch Veränderungen im Bereich der anterioren weißen Substanz (Colcombe et al., 2006). Dieses Areal ermöglicht die interhemisphärische Kommunikation des Gehirns und scheint bei altersbedingter Schädigung mit dem Abbau kognitiver Leistungen in Verbindung zu stehen (Colcombe, Kramer, Erickson, & Scalf, 2005; O'Sullivan et al., 2001). Das Bemerkenswerte an der Studie von Colcombe et al. (2006) ist, dass zum ersten Mal gezeigt wurde, dass körperliches Training eine Volumenveränderung des präfrontalen Kortex auslösen kann und dafür bereits eine moderate Belastung ausreicht.

Nach dem 55. Lebensjahr atrophiert der Hippocampus im Jahr um etwa 1 bis 2 Prozent (Raz, 2005; Raz, Rodrigue, Head, Kennedy, & Acker, 2004). Dies gilt für Menschen ohne dementielle Erkrankung. Der Schwund von Strukturen des Hippocampus führt zu beeinträchtigten Gedächtnisleistungen und erhöht das Risiko an Demenz zu erkranken (Kramer et al., 2007; Petersen et al., 2000). Bei erkrankten Personen ist ein Volumenverlust von 3 bis 5 Prozent im Jahr zu beobachten (Jack et al., 2000; Jack et al., 1998; Mungas et al., 2005). Nachdem belegt werden konnte, dass ein Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und dem Hippocampusvolumen besteht (Erickson, et al., 2009) und darüber hinaus präfrontale Strukturen (Colcombe, et al., 2006) sowie die Durchblutung des Hippocampus (Burdette et al., 2010) positiv durch körperlich-sportliche Aktivität beeinflusst werden können, fragten sich Erickson et al. (2011), ob es möglich ist, durch ein Ausdauertraining gezielt die Größe des Hippocampus bei älteren Menschen zu beeinflussen. Um dieser Frage nachzugehen wurde in Anlehnung an Colcombe et al. (2006) eine einjährige MRT-Interventionsstudie mit 120 älteren Studienteilnehmern (Durchschnittsalter: 66.6 Jahre) durchgeführt. Diese wurden zufällig in eine Interventions- und Kontrollgruppe aufgeteilt, in der sie entweder ein 12 Monate dauerndes Ausdauerprogramm an 3 Tagen der Woche mit 30 bis 45 Minuten Trainingszeit oder ein zeitlich vergleichbares Kombinationsprogramm mit Dehn- und Kräftigungsübungen absolvierten. Die interessierenden Gehirnregionen in dieser Studie waren der Hippocampus, der Thalamus sowie der Nucleus Caudatus, bei denen zu Beginn der Intervention kein Gruppenunterschied bezüglich ihrer räumlichen Ausdehnung bestand. Trainingsinduzierte Volumenzunahmen konnten nach Abschluss der einjährigen Intervention wie erhofft beim Hippocampus, nicht jedoch beim Thalamus und

Nucleus Caudatus festgestellt werden. Das moderate Ausdauertraining bewirkte somit im Bereich des anterioren Hippocampus diametral zum altersbedingten Abbau eine effektive Volumenzunahme von etwa 2 Prozent, während bei den Teilnehmern am Dehn- und Kräftigungsprogramm ein Volumenverlust von 1,5 Prozent zu verzeichnen war (Erickson, et al., 2011).

Neben dem Informationsgewinn aus Querschnitts- und Interventionsstudien können Daten aus längsschnittlichen Untersuchungen wichtige Erkenntnisse für einen Forschungsbereich liefern. Eine solche Studie führten Erickson et al. (2010a) durch. Um einen langfristigen Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität auf die graue Substanz abschätzen zu können, begann man in den Jahren 1989/1990 bei mindestens 65 Jahre alten Personen die selbstberichtete körperliche Aktivität mit der zurückgelegten Fußstrecke pro Woche als Parameter für physische Aktivität zu erfassen. 9 Jahre später wurden aus dieser Gruppe 299 kognitiv gesunde Personen zu einer MRT-Untersuchung eingeladen, bei der mittels hochauflösender Bilder und voxel-basierter Morphometrie das Volumen der grauen Substanz in spezifischen Gehirnarealen erfasst wurde. Dabei erwies sich die zurückgelegte Fußstrecke als guter Prädiktor für ein höheres Volumen an grauer Gehirnmasse. Insbesondere in frontalen und parietalen Arealen und bei Studienteilnehmern, die mindestens 72 Häuserblocks pro Woche liefen (\cong 4. Quartil des Umfangs der körperlichen Aktivität), zeigte sich dieser Effekt (Erickson, et al., 2010a). Weitere 4 Jahre später erfolgte eine klinische Beurteilung des kognitiven Status sowie eine weitere MRT-Untersuchung mit der gleichen Personengruppe. Hier stellte sich das durch vermehrte körperliche Aktivität vergrößerte Gehirnvolumen als Schutzfaktor heraus: Das Risiko für eine Beeinträchtigung der kognitiven Fähigkeiten wurde dadurch halbiert. Erickson et al. (2010a) konnten somit als erste langfristige Effekte von körperlicher Fitness auf das Gehirnvolumen und das Erkrankungsrisiko im kognitiven Bereich zeigen.

Insgesamt ergibt die Gesamtheit der strukturellen Forschungsbefunde ein konsistentes Bild: Körperliche Aktivität und Fitness haben insbesondere auf den präfrontalen Kortex und die hippocampale Region positive Effekte. Der altersbedingte neuronale Abbau in diesen kritischen Arealen kann durch Ausdauertraining möglicherweise nicht nur verlangsamt, sondern sogar umgekehrt werden. Die Plastizität des älteren Gehirns scheint somit bereits durch moderate körperlich-sportliche Betätigung gut erhalten werden zu können. Bewegungsprogramme mit Inhalten, die über rein aerobes Training hinausgehen, könnten

möglicherweise auch in diesem Altersbereich positive Effekte erzielen, stehen bisher aber noch aus (vgl. Budde, et al., 2008).

3.2.2 Funktionelle Befunde

Tierexperimentelle Studien in den 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts fanden metabolische und neurochemische Veränderungen im Gehirn in Zusammenhang mit aerober Fitness (Black, et al., 1990; Neeper, et al., 1995). Eine erste große Interventionsstudie mit 124 älteren Erwachsenen führten Kramer et al. 1999 durch. Mit der einen Hälfte der 60 bis 75 jährigen Studienteilnehmer wurde ein 6-monatiges Walking-Programm durchgeführt, während die anderen Probanden als Kontrollgruppe ein Dehn- und Kräftigungsprogramm absolvierten. Die Hypothese, dass aerobes Training zu Verbesserungen bei kognitiven Kontrollprozessen, wie Planen, Inhibition und Arbeitsgedächtnisleistung führt, konnte zum ersten Mal bei Menschen bestätigt werden (Kramer, et al., 1999). In der Folgezeit steigerten sich die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich enorm, nicht zuletzt aufgrund verbesserter technischer Möglichkeiten. Colcombe et al. nutzten als erste Forschungsgruppe überhaupt im Jahr 2004 fMRT für eine 2-teilige Studie. In der querschnittlich angelegten ersten Phase wurden 41 Teilnehmer (Durchschnittsalter: 67.0 Jahre) per Mediansplit in zwei aerob unterschiedlich fitte Gruppen aufgeteilt und bezüglich ihrer selektiven Aufmerksamkeit und exekutiven Kontrolle verglichen. Die Gruppe mit einer höheren maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max) zeigte dabei eine höhere aufgabenspezifische Aktivität in präfrontalen und parietalen Arealen bei zugleich geringerer Aktivität im anterioren cingulären Kortex. Erstgenannte Regionen sind mit selektiver Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnisleistung assoziiert, während der anteriore cinguläre Kortex bei widersprüchlichen Informationen und der Fehlerüberwachung aktiviert ist. Die gefundenen Ergebnisse bei der Aktivierung spiegeln sich konsistent in den Verhaltensmaßen wider: Die aerob fitteren Versuchsteilnehmer zeigten ein deutlich effizienteres Verhalten in Konfliktsituationen (Colcombe, et al., 2004). Vergleichbar mit Kramer et al. (1999) wurden im zweiten Teil der Studie die gleichen Probanden per Zufall in eine Interventions- und Kontrollgruppe aufgeteilt. Nach 6 Monaten Ausdauertraining zeigte diese Gruppe sowohl bezüglich der Aktivierung (fMRT) als auch bei der Flanker-Aufgabe Resultate, die mit denen der Teilstudie 1 vergleichbar waren (Colcombe, et al., 2004). So konnte gezeigt werden, dass physisches Training und Fitness neben den positiven Effekten

auf das Gehirnvolumen (Colcombe, et al., 2003) auch Aktivierungsmuster verändern und damit für funktionelle Verbesserungen sorgen können (Colcombe, et al., 2004).

Jüngere fMRT-Studien konnten die beschriebenen positiven Effekte bestätigen und weiter ergänzen. Prakash et al. (2011) interessierten sich für den Zusammenhang von kardiorespiratorischer Fitness und der Aktivierung jener relevanten neuronalen Netzwerke, die bei 60 bis 75 Jährigen an der Aufmerksamkeitskontrolle beteiligt sind. Sie konnten zeigen, dass eine gute aerobe Leistungsfähigkeit positive Effekte insbesondere auf neuronale Netzwerke in anterioren Gehirnregionen hat, jedoch keine auf Verarbeitungsareale im posterioren Bereich. Die fitteren Probanden zeigten auf der Verhaltensebene entsprechend auch bessere Leistungen im Stroop-Test, einem Maß für die Güte der Reaktionshemmung auf irrelevante Stimuli (Prakash, et al., 2011). Während ein kurzfristig positiver Effekt von körperlich-sportlicher Aktivität auf die psychomotorische Verarbeitungsgeschwindigkeit inzwischen gut belegt ist (Colcombe & Kramer, 2003; Kramer & Erickson, 2007; Small et al., 2006), konnten Rosano et al. (2010) ergänzend zeigen, dass diese Vorteile auch 2 Jahre nach der ursprünglichen Intervention zu finden waren. Die Studienteilnehmer behielten dabei ihren jeweiligen körperlich aktiven versus bewegungsarmen Lebensstil bei (Rosano, et al., 2010). Eine wichtige Frage ist, inwieweit körperlich-sportliche Aktivität in Zusammenhang mit unterschiedlichen genetischen Dispositionen das Risiko für eine dementielle Erkrankung senken kann. Smith et al. (2011) liefern dazu erste wichtige Hinweise. Ihre Daten legen die Vermutung nahe, dass physische Aktivität bei älteren Menschen mit genetisch bedingtem Erkrankungsrisiko für eine Alzheimer-Erkrankung (APOE- ϵ 4-Träger) die Aktivierungsmuster gedächtnisassoziierter Gehirnareale so verbessert, dass dies ein Schutz vor zukünftigem kognitivem Abbau sein könnte. Insbesondere längsschnittliche Studien sind jedoch nötig, um dafür weitere Belege zu erhalten (Smith, et al., 2011).

In den bisherigen Interventionsstudien wurden meist aerobe Trainingsprogramme eingesetzt, um den Einfluss von physischer Aktivität auf die kognitive Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Einen anderen Ansatz verfolgten Liu-Ambrose et al. (2010; 2012): Ihre Arbeitsgruppe führte eine 12-monatige Interventionsstudie mit älteren Frauen durch, bei der die Wirkung von unterschiedlich häufig durchgeführtem Krafttraining sowie kombiniertem Gleichgewichts- und Tonisierungstraining auf die Leistung im Stroop-Test verglichen wurde. Die 155 Studienteilnehmerinnen im Alter von 65 bis 75 Jahren wurden dafür randomisiert auf drei Gruppen verteilt. Die selektive Aufmerksamkeit und Inter-

ferenzkontrolle in Konfliktsituationen verbesserte sich im Unterschied zur Gleichgewichts- und Tonisierungsgruppe in beiden Krafttrainingsgruppen deutlich, unabhängig ob ein- oder zweimal pro Woche trainiert wurde (Liu-Ambrose, et al., 2010). Über die genannten kognitiven Aspekte hinaus, scheint allerdings die Trainingshäufigkeit für Inhibitionsprozesse von Bedeutung zu sein. Bei der Gruppe, die zweimal in der Woche das Krafttrainingsprogramm absolvierte, konnten signifikante hämodynamische Effekte in 2 Regionen des Kortex nachgewiesen werden, die mit Inhibitionsprozessen in engem Kontakt stehen (vorderer Anteil des linken Gyrus temporalis medius sowie linker vorderer Inselcortex). Diese Effekte gingen mit besseren Leistungen bei der Flanker-Aufgabe einher. Zweimaliges Krafttraining pro Woche beeinflusst neben positiven Effekte auf die selektive Aufmerksamkeit und Interferenzkontrolle, auch Inhibitionsprozesse positiv (Liu-Ambrose, et al., 2012).

Die Weitung des neuroanatomischen Blickwinkels, ausgehend von der Idee einer genauen regionalen Lokalisierbarkeit kognitiver Funktionen hin zu komplexeren Netzwerkgedanken, führte dazu, dass neben Struktur und Funktion einzelner Areale auch die Kohärenz von mehreren relevanten Gehirnregionen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Im Verständnis der modernen funktionellen Neuroanatomie werden kognitive Funktionen nicht durch einzelne Gehirnareale, sondern durch weit im Gehirn verzweigte neuronale Netzwerke repräsentiert. Fast zwangsläufig rückt damit die Bedeutung der Interkonnektivität einzelner Areale in den Fokus (Watson, Kirkcaldie, & Paxinos, 2010). Strukturelle Basis für den Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Gehirnarealen ist die weiße Substanz. Ihre Integrität ist entscheidend für den Erhalt dieser Kommunikationsfähigkeit. Neben den bereits im letzten Abschnitt dargestellten Befunden, gibt es darüber hinaus weitere Studien, die den positiven Einfluss von körperlicher Aktivität auf die weiße Substanz belegen (vgl. Marks et al., 2007; Voss et al., 2013).

Vor dem Hintergrund dieser strukturellen Befunde stellte sich die Frage, welchen Einfluss, insbesondere in Zusammenhang mit altersbedingten Veränderungen, physische Aktivität auf das funktionelle Zusammenspiel einzelner Areale hat. Voss et al. (2010a) konnten als erste zeigen, dass die funktionelle Konnektivität im „Default Mode Network“ (DMN; Ruhezustandsnetzwerk) Mediator des Zusammenhangs von aerober Fitness und exekutiver Leistungsfähigkeit ist. Das DMN ist ein funktionelles Netzwerk, das den Zustand des Gehirns im Ruhezustand repräsentiert. Es ist aktiviert wenn keine externalen Verarbeitungsanforderungen an das Gehirn gestellt werden. Die Subsysteme dieses weitverzweig-

ten Netzwerkes umfassen Teile des medialen Temporallappens, des medialen präfrontalen Kortex, des posterioren cingulären Kortex mit angrenzenden ventralen Anteilen des Precuneus sowie des medialen, lateralen und inferioren parietalen Kortex (Andrews-Hanna et al., 2007; Buckner, Andrews-Hanna, & Schacter, 2008; Gusnard & Raichle, 2001). Die Studie von Voss et al. (2010a) konzentrierte sich auf das DMN, weil Störungen dieses Netzwerkes sowohl mit gesundem kognitivem Altern einhergehen (Andrews-Hanna, et al., 2007; Damoiseaux et al., 2008) als auch in Verbindung zur Alzheimer-Demenz stehen (Lustig et al., 2003; Supekar, Menon, Rubin, Musen, & Greicius, 2008; Zhou et al., 2008). Bei den älteren Teilnehmern dieser Studie (55 bis 80 Jahre) mit einer höheren maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max) waren altersbedingte Konnektivitätsverluste im DMN geringer ausgeprägt als bei weniger fitten Teilnehmern. Darüber hinaus zeigte sich ein enger Zusammenhang zwischen funktioneller Konnektivität und exekutiver Leistungsfähigkeit, was bedeutet, dass höhere Fitness, vermittelt durch die bessere Konnektivität, zu besseren kognitiven Leistungen führte (Voss, et al., 2010a).

Die im Anschluss von der gleichen Forschungsgruppe durchgeführte Interventionsstudie (Voss et al., 2010b) bestätigte und spezifizierte die Ergebnisse dieser Querschnittsstudie. Ziel war es, mit Hilfe von fMRT die Effekte eines aeroben Walking-Programmes und eines nicht-aeroben kombinierten Flexibilitäts-, Kräftigungs- und Dehnungsprogramms auf die funktionelle Konnektivität bei älteren Erwachsenen (Durchschnittsalter: 66.3 Jahre) zu vergleichen (vgl. Erickson, et al., 2011). Während das einjährig durchgeführte Ausdauertrainingsprogramm nach 12 Monaten positive Veränderungen bezüglich der funktionellen Konnektivität zwischen frontalen, posterioren und temporalen Regionen des DMN und des fronto-exekutiven Netzwerkes (vgl. Dosenbach et al., 2006) initiierte, war bei der nicht-aerob trainierenden Gruppe eine verbesserte Kohärenz im DMN bereits nach 6 Monaten sowie im fronto-parietalen Netzwerk nach 12 Monaten feststellbar. Darüber hinaus konnten die Verbesserungen der funktionellen Konnektivität auch auf der Verhaltensebene nachgewiesen werden. Eine höhere Kohärenz in relevanten Arealen des DMN korrelierte mit einer besseren exekutiven Leistung. Insgesamt demonstriert die Studie mit älteren Erwachsenen in den Interventionsgruppen und jungen Erwachsenen in der Kontrollgruppe (Durchschnittsalter: 23.9 Jahre), dass altersbedingte Veränderungen der funktionellen Konnektivität bereits durch moderate Bewegungsaktivität möglicherweise rückgängig

gemacht, aber zumindest in ihrer Entwicklung so umgekehrt werden können, dass wieder ähnliche Bedingungen wie bei jungen Erwachsenen herrschen (Voss, et al., 2010b).

Burdette et al. (2010) konnten in einer 4-monatigen fMRT-Interventionsstudie Vergleichbares zeigen. Mit Hilfe neuer Analysemethoden für die Gesamthirnkonnektivität auf Basis der Graphentheorie, konnten die Autoren belegen, dass körperliche Aktivität bei älteren Erwachsenen (70 bis 85 Jahre) im Vergleich zu einer inaktiven Kontrollgruppe zu einer deutlich besseren funktionellen Konnektivität des Hippocampus führte. Dabei zeigte sich nur in der körperlich aktiven Gruppe eine sehr enge funktionelle Koppelung des Hippocampus mit dem anterioren cingulären Kortex (Burdette, et al., 2010).

Die vorliegenden Befunde belegen eindrucksvoll, dass auch im höheren Erwachsenenalter die Plastizität des Gehirns gut erhalten bleibt. Bereits moderate körperlich-sportliche Aktivität führt zu positiven Effekten übereinstimmend die Struktur und die Funktion des Gehirns betreffend. Durch Bewegung kann das Gehirnvolumen vergrößert sowie der altersbedingte Abbau von Gehirnmasse verlangsamt werden. Überdies verbessern sich funktionelle Aktivierungsmuster im Gehirn und die Kohärenz relevanter Gehirnareale. Wichtige Regionen für die kognitive Leistungsfähigkeit, wie der präfrontale Kortex oder viele gedächtnisassoziierte Gehirnareale, bleiben besonders sensitiv für körperlich-sportliche Aktivität. In Summe führt ein aktiver Lebensstil zu vergleichsweise besseren kognitiven Leistungen, die im Alter länger aufrechterhalten werden können.

Abschließend kann resümiert werden, dass körperlich-sportliche Bewegung zu positiven Effekten sowohl in der Adoleszenz als auch im höheren Erwachsenenalter führt. Aus struktureller und funktioneller Sicht profitieren Menschen in beiden Lebensphasen enorm von physischer Aktivität, was sich insbesondere in ihrer kognitiven Leistungsfähigkeit in den Bereichen der exekutiven Funktionen und des Gedächtnisses ausdrückt.

4 Fragestellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, in zwei Studien mit Schulkindern (Studie I) sowie älteren Erwachsenen (Studie II) den Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität auf die kognitive Reserve zu untersuchen. Kognitive Reserve wird dafür als das Ausmaß an kognitiver Leistungsverbesserung in einer herausfordernden *Testing-the-limits*-Aufgabe nach ausreichender Übung definiert (Stern, 2002, 2009; Zihl et al., 2014). Mögliche Unterschiede in der Leistungsfähigkeit zwischen körperlich-aktiven und inaktiven Studienteilnehmern sollen die Wirkung von Bewegung auf die kognitive Reserve und damit Anpassungsfähigkeit in herausfordernden Situationen empirisch begründen. Der bisherige Forschungsstand belegt deutlich die positiven Effekte von körperlicher Aktivität auf die kognitive Leistungsfähigkeit. Deshalb ist davon auszugehen, dass auch die kognitive Reserve und deren Erhalt über die Lebensspanne von körperlich-sportlicher Aktivität profitiert. Allerdings wurde in ausnahmslos allen dargestellten Studien die kognitive Leistungsfähigkeit durch einzelne absolute Maße in einer einmaligen Leistungsmessung erfasst. Nachteil dabei ist, dass eine Veränderungsdynamik durch Lernen, wie sie zwingend in kognitiv herausfordernden Situationen über die Lebensspanne erforderlich ist, so nicht hinreichend valide erfasst werden kann. Positive Effekte von körperlich-sportlicher Aktivität auf die so operationalisierte kognitive Reserve konnten bis dato noch nicht gezeigt werden. In beiden Studien werden deshalb anhand eines modifizierten Zahlen-Symbol-Tests (ZST) aus dem Wechsler Intelligenztest für Erwachsene (WIE, Aster, Neubauer, & Horn, 2006) sowie weiteren neuropsychologischen Testverfahren die kognitive Reserve und möglicherweise assoziierte exekutive Teilleistungen untersucht. Zusätzlich wird in Studie I überprüft, ob die ausgeübte Sportart Einfluss auf die kognitive Reserve sowie exekutive Teilleistungen hat und in welchem Zusammenhang physische Aktivität, kognitive Reserve und Schulnoten stehen. Um Aussagen über altersabhängige Veränderungen machen zu können, findet in Studie II ein Vergleich von drei Sportlerteilstichproben statt. Die darüber hinaus erhobenen Fragebogenmaße aus den für die kognitive Reserve relevanten Bereichen „Typisches intellektuelles Engagement“, „Selbstbestimmtheit“, „Lebenszufriedenheit“ und „Persönlichkeit“ dienen zusammen mit den neuropsychologischen Variablen einer ersten Einordnung des Reservekonstruktes im Kontext körperlicher-sportlicher Aktivität. Um das Verständnis der in den jeweiligen Studien unter Punkt 5.4 sowie Punkt 6.4 aufgeführten Hypothesen zu gewährleisten, wird im Folgenden die Methode der jeweiligen Untersuchung beschrieben.

5 Studie I: Adoleszenz

Die Adoleszenz ist ein Zeitraum des radikalen Umbaus und Wandels aufgrund natürlicher Reifungs- und Entwicklungsprozesse. Er stellt besondere kognitive Herausforderungen an die heranwachsenden jungen Menschen. Forschungsbefunde aus den zeitlich angrenzenden Entwicklungsphasen der Präadoleszenz und des jungen Erwachsenenalters zeigen deutlich positive Effekte von körperlich-sportlicher Aktivität auf die kognitive Leistungsfähigkeit. Bislang existieren allerdings nur wenige Befunde für den Altersbereich der Adoleszenz. Dort setzt die vorliegende Studie an.

5.1 Untersuchungsdesign

Zur Klärung der Fragestellung wurde bei sportlich aktiven adoleszenten Kindern aller Schularten und aus Sportarten mit koordinativ-kognitiv unterschiedlichem Anforderungsprofil (siehe Beckmann & Kazén, 1994, S. 445) sowie einer sportlich inaktiven Kontrollgruppe eine Datenerhebung jeweils zu einem Messzeitpunkt durchgeführt. Als inaktiv wurden all jene Versuchsteilnehmer klassifiziert, die neben dem normalen Pflichtsport in der Schule keine körperlich-sportlichen Aktivitäten angaben. Die Untersuchung war in 5 Teilstudien unterteilt. Die eingesetzten Messinstrumente sowie Angaben über Stichprobe und den Ablauf sind nachfolgend detailliert beschrieben (Abschnitt 5.2 sowie 5.3).

5.2 Messinstrumente

5.2.1 Kognitive Reserve

Zur Ermittlung der kognitiven Reserve in den fünf Teiluntersuchungen wurde für ein Retest-Paradigma (Yang, et al., 2006; Yang, et al., 2009) im Rahmen des „*Testing-the-limits*“-Ansatzes (Kliegl, et al., 1989) der Zahlen-Symbol-Test (ZST) aus dem Wechsler Intelligenztest für Erwachsene (WIE, Aster, et al., 2006) ausgewählt und angepasst (siehe Anhang A). Bei dieser veränderten Variante des ZST tragen die Versuchspersonen mit Hilfe

eines Kodierungsschlüssels, der den Ziffern 1 bis 9 spezifische Symbole zuordnet, in 90 Sekunden möglichst viele korrekt-korrespondierende Symbole unter den vorgegebenen Ziffern ein. Dieser Kodierungsschlüssel ist oben auf dem Testbogen abgedruckt und steht auch während der Testdurchführung zur Verfügung. Neben den wichtigen perzeptuellen und motorischen Geschwindigkeitsaspekten beeinflussen auch die Effizienz der visuellen Suche, Lern- und Gedächtnisaspekte sowie basale exekutive Funktionen das Testergebnis (Joy, Fein, & Kaplan, 2003).

In der vorliegenden Studie I wie auch in der nachfolgend dargestellten Studie II bearbeiteten die Teilnehmer den ZST zehnmal hintereinander mit jeweils einer Minute Pause zwischen den Durchgängen. Die ursprünglich im Testmanual vorgegebene Bearbeitungszeit von 120 Sekunden wurde auf 90 Sekunden reduziert, um mögliche Deckeneffekte zu vermeiden (Zihl, et al., 2014). Eingang in die statistische Auswertung fand nur die Anzahl der korrekt übertragenen Symbole. Das relevante Ergebnismaß für die kognitive Reservekapazität berechnete sich in beiden Studien aus der Differenz der korrekt übertragenen Symbole des zehnten und ersten Durchgangs oder mit anderen Worten aus dem Übungsgewinn (ÜG) über die jeweils zehn Wiederholungen².

5.2.2 Exekutive Funktionen

Um unterschiedliche exekutive Funktionsbereiche (Miyake, 2000) und ihren möglichen Einfluss auf die kognitive Reserve differenziert betrachten zu können, wurden in den 5 Teilstudien zwei Verfahren aus dem Bereich Inhibition (5.2.2.1, 5.2.2.2) sowie jeweils ein Verfahren im Bereich der kognitiven Flexibilität (5.2.2.3) eingesetzt. Instruktion, Durchführung sowie Auswertung der Tests erfolgten gemäß den Vorgaben des jeweiligen Testmanuals.

5.2.2.1 Inhibition: Inhib (WTS)

Inhib ist ein Verfahren des Wiener Testsystems (WTS), das die Erfassung unterschiedlicher Aspekte der Antwortinhibition (Response Inhibition) ermöglicht. Neben Go/Nogo-Paradigmen (vgl. 6.1.2.1) sind Stop-Signal-Paradigmen die am häufigsten verwendeten

² Die individuelle Maximalleistung wird nicht zwangsläufig im 10. Durchgang erreicht. Da die Rohdaten der Studie von Zihl et al. (2014) nicht zur Verwendung freigegeben wurden, konnte in dieser Arbeit nur mit der konservativen Berechnung des Übungsgewinns gearbeitet werden.

Verfahren zur Untersuchung von Response Inhibition. Stop-Signal-Aufgaben, wie die für diese Studie ausgewählte Testform S1/S2 des Inhib (WTS), erfordern das Inhibieren einer bereits initiierten motorischen Antwort und stehen damit der Motorik am Nächsten (Verbruggen & Logan, 2008). Den Studienteilnehmern werden bei dieser Testform nacheinander einzelne Pfeile präsentiert, die entweder nach links oder nach rechts zeigen. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, so schnell wie möglich die mit der angezeigten Richtung assoziierte Taste zu drücken. Dies gilt allerdings nur, wenn kein akustisches Stop-Signal ertönt. Der Test teilt sich in zwei durch eine kurze Unterbrechung getrennte Hälften mit jeweils 100 randomisiert dargebotenen Reizen: 76 „Go Trials“ ohne / und 24 „Stop Trials“ mit nachfolgendem Stop-Signal. Eine Besonderheit bei dieser Testform ist die adaptive Anpassung der Aufgabenschwierigkeit bei den Stop Trials: Das Stop-Signal ertönt zwischen minimal 50 und maximal 350 Millisekunden nach Erscheinen des Pfeiles. Schafft es ein Teilnehmer, die bereits angesteuerte motorische Reaktion unter diesen Bedingungen zu unterdrücken, wird beim nächsten Stop-Trial der Abstand zwischen der Präsentation des Pfeiles und dem Stop-Signal um 50 Millisekunden heraufgesetzt. Im umgekehrten Fall wird der Abstand um 50 Millisekunden verkürzt. Die Schwierigkeit passt sich somit adaptiv der gezeigten Testleistung an. Als Ergebnismaße für diese Untersuchung werden die mittleren Reaktionszeiten (nur richtige Go-Stimuli) und die Stop-Signal-Reaktionszeiten (SSRT)³ über die gesamte Testdauer berücksichtigt: Je kürzer die Stop-Signal-Reaktionszeiten, desto schneller und damit effektiver der Inhibitionsprozess.

5.2.2.2 Interferenz: Farb-Wort-Test (NAI)

Der Farb-Wort-Test aus dem Nürnberger-Alters-Inventar (NAI) von Fleischmann und Oswald (1999) ist ein auf dem Stroop-Paradigma aufgebauter Interferenztest, der die Fähigkeit der Reaktionshemmung auf irrelevante Stimuli überprüft. Die Teilnehmer sollten in diesem Speed-Test in drei unterschiedlichen Durchgängen immer schnellstmöglich alle dargebotenen Reize benennen. Ergebnismaß in jedem dieser Durchgänge war die benötigte Zeit zum lauten Vorlesen der Reize. Fehler wurden nicht zusätzlich ausgewertet, weil aufgrund von Monitoringprozessen im Fehlerfall die Verarbeitungsgeschwindigkeit beim Probanden sinkt und so die Zeit negativ beeinflusst wird. Der erste Teil des Tests, bei dem

³ Zur Berechnung der Stop-Signal Reaktionszeit wird die mittlere Stop-Signal Verzögerung von der mittleren Reaktionszeit subtrahiert.

die Teilnehmer aufgefordert wurden sechs Zeilen mit jeweils sechs Wörtern laut und so schnell wie möglich vorzulesen, wurde ordnungsgemäß durchgeführt, jedoch in dieser Studie in der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Aufgabe des zweiten Durchgangs, das Benennen der Druckfarbe von sechs mal sechs farbigen Rechtecken diente zur Bestimmung der Messbasis. Im letzten Teil, der eigentlichen Inkongruenzbedingung, musste die Druckfarbe von sechs Wörtern in jeweils sechs Zeilen benannt werden, deren Wortbedeutung nicht der Druckfarbe entsprach. Das Ergebnismaß dieses Testes sind die so genannten Interferenzkosten, die der Differenz der per Stoppuhr ermittelten Zeiten aus Inkongruenz- und Basisbedingung entsprechen.

5.2.2.3 Kognitive Flexibilität: Flexibilität (TAP)

Zur Messung der kognitiven Flexibilität wurde der Untertest „Flexibilität“ aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung 2.2 (TAP, Zimmermann & Fimm, 2009) eingesetzt. Er prüft mittels einer „set shifting“-Aufgabe die Fähigkeit, sich auf neue Situationen und Anforderungen einzustellen. Bei der für diese Untersuchung ausgewählten Durchführungsbedingung wurden den Probanden in jedem Durchgang rechts und links von der Bildschirmmitte jeweils eine runde und eine eckige Figur variierend dargeboten. Die Reaktion sollte von Versuch zu Versuch jeweils auf den komplementären (wechselnden) Zielreiz in der Art erfolgen, dass die mit dem aktuell gültigen Zielreiz räumlich korrekt assoziierte Taste gedrückt wird. Nach einem Fehler wurde dem Versuchsteilnehmer der jeweilige Zielreiz mit einem Quadrat angezeigt. Aufnahme in die Auswertung fanden von den 100 dargebotenen Zielreizen nur die korrekten Reaktionen ohne Hinweisquadrat. Das erste verwendete Ergebnismaß der vorliegenden Studie ist die Kombination aus dem Median der Reaktionszeit und der Fehlerzahl, der Index für die Gesamtleistung (vgl. Handbuch TAP S. 35 sowie S. 86): Ein negativer Indexwert bedeutet eine unterdurchschnittliche Leistung (hohe Fehlerrate bei langsamen Reaktionen), ein positiver Wert eine überdurchschnittliche Leistung bei niedriger Fehlerrate und relativ kurzen Reaktionszeiten. Das zweite verwendete Ergebnismaß ist der Speed-Accuracy-Index. Bei diesem Index entspricht ein negativer Wert einer Geschwindigkeitsstrategie (kurze Reaktionszeiten bei verhältnismäßig hoher Fehlerrate) und ein positiver Wert einer Genauigkeitsstrategie (geringe Fehlerrate bei relativ langsamen Reaktionszeiten).

5.3 Teilnehmer und Ablauf

5.3.1 Teilstudie I: Tanztraining und kognitive Reserve

Teilnehmerinnen: Die 28 freiwilligen Versuchsteilnehmerinnen der Teilstudie I im Alter von 12 bis 15 Jahren wurden aus einer Tanzschule in Ebersberg und weiterführenden Schulen in Kirchseeon akquiriert. Es konnten 11 Tänzerinnen ($M = 13.82$, $SD = 1.08$) und 17 Nichttänzerinnen ($M = 13.88$, $SD = .99$) getestet werden. 14 Nichttänzerinnen waren in anderen Sportarten aktiv, die übrigen drei betrieben keinen Sport. Ausführliche deskriptive Details zum Alter, den sportlichen Aktivitäten, dem Body-Mass-Index sowie der besuchten Schulart aller Teilnehmer dieser und aller weiteren Teilstudien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1

Deskriptive Statistik der 5 Teilstudien

		n	Geschlecht (w / m)	Alter $M (SD)$	Sport/Woche $M (SD)$	Jahre/Sport $M (SD)$	BMI $M (SD)$	Schulart G / R / H
(I) Tanz	T	11	11 / 0	13.82 (1.08)	5.55 (1.67)	7.55 (2.84)	20.6 (4.1)	10 / 1 / 0
	NT	17	17 / 0	13.88 (.99)	5.26 (2.42)	5.85 (3.18)	19.1 (3.2)	14 / 3 / 0
(II) Triathlon	Tri	13	4 / 9	13.46 (1.20)	10.27 (4.72)	6.15 (2.51)	18.6 (2.1)	8 / 4 / 1
	NSpo	10	5 / 5	13.40 (1.17)	4.60 (2.12)	3.20 (3.43)	23.9 (8.3)	3 / 4 / 3
(III) Fußball	F	15	8 / 7	13.73 (.96)	6.87 (2.36)	7.33 (2.82)	20.8 (3.2)	4 / 7 / 4
	NSpo	14	3 / 11	13.71 (1.07)	1.64 (1.26)	.11 (.21)	22.2 (6.7)	2 / 8 / 4
(IV) Basketball	B	12	6 / 6	13.17 (.72)	7.00 (1.48)	7.83 (1.75)	20.4 (2.3)	8 / 4 / 0
(V) Gymn	Spo	12	12 / 0	13.83 (.58)	4.67 (1.98)	6.33 (4.08)	18.4 (1.5)	12 / 0 / 0
	NSpo	14	14 / 0	14.21 (.70)	1.07 (1.04)	2.21 (3.21)	21.2 (3.8)	14 / 0 / 0

Anmerkung. BMI = Body-Mass-Index. G, Gymn = Gymnasium. R = Realschule. H = Hauptschule. T = Tänzer. NT = Nichttänzer. Tri = Triathlet. F = Fußballspieler. B = Basketballspieler. Spo = Sportler. NSpo = Nichtsportler.

Ablauf: Die Teilnehmerinnen bekamen per Email eine von den Erziehungsberechtigten zu unterschreibende Einverständniserklärung sowie einen soziodemografischen Fragebogen zugeschickt. Zudem erfolgte eine Aufteilung der Probandinnen in Dreiergruppen, die im vierzigminütigen Abstand zeitversetzt an zwei Testterminen (März 2011) in die Räume des Tanzstudios einbestellt wurden. Unter der Leitung eines Psychologen und vier geschulten

studentischen Assistentinnen⁴ durchliefen die Versuchspersonen in vorher festgelegter Reihenfolge und in separaten Räumen den Farb-Wort-Test, den Stop-Signal-Test und den Test zur kognitiven Flexibilität, um danach abschließend in der Gruppe den ZST zu absolvieren. Die Pause zwischen den einzelnen Tests war auf 5 Minuten festgelegt. Der gesamte Zeitaufwand für die einzelne Probandin betrug etwa eine Stunde.

5.3.2 Teilstudie II: Kognitive Reserve bei jugendlichen Triathleten

Teilnehmer: Die Gesamtstichprobe der Teilstudie II setzt sich aus zwei Untergruppen mit 13 und 10 Probanden im Alter von 12 bis 15 Jahren zusammen: Während für die Sportlergruppe Triathleten des Vereins „München Road Runners Club“ akquiriert wurden ($M = 13.46$, $SD = 1.20$), konnten für die Kontrollgruppe in Zusammenarbeit mit einer Allgemeinarztpraxis in Geiselhöring bei Straubing sportlich inaktive Jugendliche gewonnen werden ($M = 13.40$, $SD = 1.17$).

Ablauf: Der Ablauf der Datenerhebung dieser Teilstudie war bis auf die unten beschriebene Abweichung identisch mit jenem der Teilstudie I: Die komplette Datenerhebung der Kontrollgruppe erfolgte an einem Termin im Juli 2011 in den Behandlungsräumen der Allgemeinarztpraxis. Die neuropsychologische Testung der Experimentalgruppe erfolgte im Zeitraum April/Mai 2011 parallel zu vier Trainingseinheiten im Schwimmbad des Gymnasiums Moosach in München. Abweichend vom Ablauf der Teilstudie I, war es hier nicht möglich, den ZST als Abschluss der Testung gemeinsam durchzuführen. Diese Datenerhebung fand im Anschluss an einen Triathlon-Wettkampf im Juni 2011 an der Ruderregattastrecke in Oberschleißheim statt.

5.3.3 Teilstudie III: Kognitive Reserve im Jugendfußball

Teilnehmer: Für die Teilstudie „Exekutive Funktionen im Jugendfußball“ konnten als Sportlergruppe 15 jugendliche Fußballspieler im Alter von 12 bis 15 Jahren ($M = 13.73$, $SD = .96$) des Turn- und Sportvereins St. Wolfgang gewonnen werden. Die Kontrollgruppe bestand aus 14 Heranwachsenden der Jugendtreffs „Haus am Schuttberg“ (München) und „Kinder- und Jugendtreff Milbertshofen (München), des Horts „Palladi“ (Landshut) und

⁴ Entspricht dem Testteam aller fünf Teilstudien.

der Musikgruppe „Da Veldener Blechhaufa“ (Velden) im Alter von 12 bis 15 Jahren ($M = 13.71$, $SD = 1.07$), die sich sportlich als gänzlich inaktiv einschätzten. Dabei wurden nur Jugendliche für die Kontrollgruppe akzeptiert, bei denen sportliche Freizeitaktivitäten in und außerhalb eines Vereines sowie lange Schulwege zu Fuß oder mit dem Fahrrad gegenwärtig und in der Vergangenheit ausgeschlossen werden konnten.

Ablauf: Der Ablauf der Teilstudie III unterschied sich von den zwei vorhergehenden Teilstudien. Zu Beginn der zehn Testtage zwischen Mitte April und Anfang August 2012 durchliefen alle Probanden gleichzeitig den ZST. Danach wurden die Jugendlichen nacheinander und einzeln aus den Betreuungsgruppen oder dem Training geholt, um immer in gleicher Reihenfolge den Farb-Wort-Test, den Stop-Signal-Test sowie den Test zur kognitiven Flexibilität zu absolvieren.

5.3.4 Teilstudie IV: Jugendbasketball und kognitive Reserve

Teilnehmer: Die Untersuchungsteilnehmer der Teilstudie „Basketball“ waren 12 jugendliche Basketballspieler des ESV Staffelsee (Murnau) im Alter von 12 bis 14 Jahren ($M = 13.17$, $SD = .72$).

Ablauf: Die Datenerhebungen dieser und der Teilstudie II waren identisch. Sowohl die neuropsychologischen Einzeltestungen Anfang Dezember 2012 wie auch die eine bzw. zwei Wochen später durchgeführten Erhebungen des ZST in der Gruppe fanden nach dem Basketballtraining in den Räumen des Gymnasiums Murnau statt.

5.3.5 Teilstudie V: Kognitive Reserve bei jugendlichen Gymnasiastinnen

Teilnehmerinnen: 26 Schülerinnen im Alter von 13 bis 15 Jahren ($M = 14.04$, $SD = .66$) der Jahrgangsstufe 8 des Erasmus-Grasser-Gymnasiums München meldeten sich freiwillig für diese letzte Teilstudie und konnten im Mai 2013 in den Räumen des Gymnasiums getestet werden. Die ursprüngliche Planung alle 52 Schülerinnen der 8. Jahrgangsstufe in die Testung einzubeziehen, ließ sich leider aus schulorganisatorischen Gründen nicht umsetzen. 12 Schülerinnen ($M = 13.83$, $SD = .58$) gaben an, aktiv Sport zu betreiben. 14 Schülerinnen ($M = 14.21$, $SD = .70$) waren sportlich inaktiv. Detaillierte Informationen zur Stichprobe sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Ablauf: Die Erziehungsberechtigten der Teilnehmerinnen wurden per Rundbrief informiert und erteilten schriftlich ihr Einverständnis. Die Schülerinnen erhielten zusammen mit dem Laufzettel für die Testdurchführung einen soziodemografischen Fragebogen, den sie in den Testpausen ausfüllten. Die Teilnehmerinnen durchliefen in Dreiergruppen und in vorher festgelegter Reihenfolge die vier in separaten Räumen aufgebauten Teststationen „Stop-Signal-Test“, „Kognitive Flexibilität“, „Farb-Wort-Test“ sowie „ZST“. An den zwei durchgeführten Testterminen konnten 17 bzw. 9 Probandinnen getestet werden.

5.3.6 Zusammengesetzte Gesamtstichprobe

Die Tabelle 2 zeigt die deskriptive Statistik der kombinierten Gesamtstichprobe, differenziert nach den Sportartengruppen „Flow-Sportart“, „Feedback-Individualsportart“ und „Feedback-Mannschaftssportart“ jeweils mit koordinativ-kognitiv unterschiedlichem Anforderungsprofil (siehe Beckmann & Kazén, 1994).

Tabelle 2

Deskriptive Statistik der kombinierten Gesamtstichprobe

	n	Geschlecht (w / m)	Alter M (SD)	Sport/Woche M (SD)	Jahre/Sport M (SD)	BMI M (SD)	Schulart G / R / H
FLW	20	11 / 9	13.60 (1.14)	8.55 (4.62)	5.73 (3.07)	19.2 (2.8)	15 / 4 / 1
FBI	24	24 / 0	13.83 (.87)	5.21 (1.71)	7.19 (3.07)	19.3 (3.2)	23 / 1 / 0
FBM	33	20 / 13	13.52 (.91)	6.86 (1.96)	7.52 (2.43)	20.4 (2.8)	18 / 11 / 4
Sport gesamt	77	55 / 22	13.64 (.96)	6.79 (3.07)	6.95 (2.87)	19.8 (2.9)	56 / 16 / 5
Nichtsportler	41	25 / 16	13.85 (.99)	2.16 (1.98)	1.76 (2.80)	21.9 (6.2)	19 / 15 / 7

Anmerkung. BMI = Body-Mass-Index. G = Gymnasium. R = Realschule. H = Hauptschule. FLW = Flow-Sportart (Anzahl): Triathlon (15), Joggen (6), Schwimmen (2). FBI = Feedback-Individualsportart (Anzahl): Tanz (19), Sporttheater (8), Reiten (5), Taekwondo (4), Eiskunstlauf (2), Golf (2), Turnen (2), Akrobatik (1), Klettern (1), Tennis (1). FBM = Feedback-Mannschaftssportart (Anzahl): Fußball (20), Basketball (12), Handball (3), Volleyball (1). Mehrfachnennungen neben Hauptsportart waren möglich.

In Tabelle 3 auf der folgenden Seite sind die deskriptiven Daten von drei unterschiedlichen Sportarten dargestellt. Sie sind jeweils eine Unterstichprobe aus den einzelnen Sportartengruppen der kombinierten Gesamtstichprobe.

Tabelle 3

Deskriptive Statistik ausgewählter Sportarten

		n	Geschlecht (w / m)	Alter M (SD)	Sport/Woche M (SD)	Jahre/Sport M (SD)	BMI M (SD)	Schulart G / R / H
Triathlon	FLW	13	4 / 9	13.46 (1.20)	10.27 (4.72)	6.15 (2.51)	18.6 (2.1)	8 / 4 / 1
Tanz	FBI	16	16 / 0	13.88 (.89)	5.09 (1.66)	6.76 (2.23)	19.9 (3.7)	15 / 1 / 0
Fußball	FBM	17	10 / 7	13.76 (.97)	6.76 (2.23)	7.29 (2.73)	20.7 (3.0)	6 / 7 / 4
Nichtsportler		41	25 / 16	13.85 (.99)	2.16 (1.98)	1.76 (2.80)	21.9 (6.2)	19 / 15 / 7

Anmerkung. BMI = Body-Mass-Index. G = Gymnasium. R = Realschule. H = Hauptschule. FLW = Flow-Sportart; FBI = Feedback-Individualsportart; FBM = Feedback-Mannschaftssportart.

5.4 Hypothesen

Forschungsergebnisse sowohl aus den Bereichen des Lernens und Gedächtnisses (u.a. Chaddock, et al., 2010a; Chaddock, et al., 2010b; Chaddock, et al., 2011b) als auch der exekutiven Funktionen (u.a. Chaddock, et al., 2011a; Hillman, et al., 2009a; Hillman, et al., 2005; Pontifex, et al., 2011) lassen Vorteile von körperlich-sportlicher Aktivität auf die kognitive Reserve sowie weitere kognitive Parameter erwarten. Nachfolgend die drei Haupt-hypothesen dieser Studie.

5.4.1 Hypothese 1: Kognitive Reserve

- *Hypothese 1a:* Sportlich aktive Schüler realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn im ZST und profitieren dabei überzufällig mehr von den Übungsdurchgängen als gleichaltrige inaktive Schüler.

Intelligenz und kognitive Reserve stehen in einem engen Zusammenhang. Nach Stern (2009) kann Schulbildung als Indikator für Intelligenz verwendet werden. Deshalb erfolgt, durch eine Reduzierung der Gesamtstichprobe auf Gymnasiasten, die Kontrolle der Schulbildung.

- *Hypothese 1b:* Sportlich aktive Gymnasiasten realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn im ZST und profitieren dabei überzufällig mehr von den Übungsdurchgängen als gleichaltrige inaktive Mitschüler.

Sportarten können bezüglich ihres koordinativ-kognitiv unterschiedlichen Anforderungsprofils unterschieden werden. Während die Leistung bei sogenannten Flow-Sportarten mit relativ geringer koordinativer Anforderung sehr von Aspekten der intrinsischen Motivation abhängt, sind bei den sogenannten Feedback-Sportarten viele externale Informationen im Rahmen der Leistungsrealisation zu verarbeiten (Beckmann & Kazén, 1994). Es stellt sich die Frage inwieweit die ausgeübte Sportart Einfluss auf die kognitive Reserve der Schulkinder hat.

- Hypothese 1c: Die ausgewählten Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball unterscheiden sich signifikant bezüglich ihres Übungsgewinns im ZST und profitieren dabei unterschiedlich von den Übungsdurchgängen.

5.4.2 Hypothese 2: Exekutive Funktionen

Die Leistungen in den unterschiedlichen exekutiven Teilbereichen wurden zum einen erhoben um bestehende Befunde für den Altersbereich der Adoleszenz zu replizieren. Zum anderen untersucht die Studie explorativ den Zusammenhang von exekutiven Leistungen und der kognitiven Reserve (vgl. 5.5.6).

- Hypothese 2a: Sportlich aktive Schüler zeigen signifikant bessere Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz und kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit als gleichaltrige inaktive Schüler.

Auch hier wird am Beispiel von Gymnasiasten die Schulbildung kontrolliert.

- Hypothese 2b: Sportlich aktive Gymnasiasten zeigen signifikant bessere Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz und kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit als gleichaltrige inaktive Mitschüler.

Sportartspezifische Anforderungen im koordinativ-kognitiven Bereich induzieren möglicherweise unterschiedliche Leistungen in den exekutiven Teilbereichen.

- Hypothese 2c: Die ausgewählten Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball unterscheiden sich signifikant bezüglich der Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz und kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit.

5.4.3 Hypothese 3: Schulkontext

Abschließend interessiert aus schulpraktischer Sicht inwieweit physische Aktivität, kognitive Reserve und schulische Noten miteinander in Zusammenhang stehen.

- Hypothese 3a: Es gibt einen signifikanten Zusammenhang zwischen der kognitiven Reserve und den Schulnoten in den Fächern Mathematik, Deutsch und Musik.
- Hypothese 3b: Sportlich aktive Schüler haben signifikant bessere Schulnoten in den Fächern Mathematik, Deutsch und Musik als gleichaltrige sportlich inaktive Schüler.

5.5 Ergebnisse

5.5.1 Hinweise zur Datenauswertung

Für die Aufbereitung der Untersuchungsdaten wurde Microsoft® Excel 2010 verwendet, die Auswertung und statistische Analyse erfolgte mit IBM® SPSS® Statistics 21 für Windows®. Die Untersuchungsergebnisse der fünf Teilstudien wurden zu einem Gesamtdatensatz zusammengestellt.

Bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wurden deskriptiv Mittelwerte sowie Standardabweichungen (bzw. Standardfehler) berechnet und gegenübergestellt. Für die Mittelwertvergleiche kamen t-Tests für unabhängige Stichproben zum Einsatz. Dabei wurde als Maß für die Effektstärke Cohen's d^5 angegeben. Zur eigentlichen Prüfung der Hypothesen wurden abhängig von der zu beantwortenden Fragestellung univariate Varianzanalysen ohne und mit Messwiederholung berechnet. Dort wurde als Maß für die

⁵ Nach Cohen (1988) zeigt $d = .20$ einen kleinen, $d = .50$ einen mittleren und $d = .80$ einen starken Effekt an.

Effektstärke das partielle Eta-Quadrat⁶ angegeben. Korrelationen wurden mit dem Korrelationskoeffizient nach Pearson ermittelt. Die Voraussetzungen für alle eingesetzten Verfahren waren gegeben. Einzelne Ausnahmen sind explizit angegeben.

5.5.2 Teilstudienvergleich und Kontrollvariablen

Zu Beginn des Ergebnisteils steht ein Vergleich der Teilstudien, die kognitive Reserve (ÜG) und exekutiven Ergebnismaße der sportlich aktiven versus sportlich inaktiven Schüler betreffend. Anschließend werden die Kontrollvariablen der jeweiligen Untersuchungsgruppen dargestellt. Beides dient dazu, die Vergleichbarkeit der Stichproben sicherzustellen.

5.5.2.1 Vergleich der Teilstudien

Die Ergebnismaße der kognitiven Reserve und der exekutiven Teilleistungen sind getrennt nach den fünf Teilstudien in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4

Deskriptive Statistik des Übungsgewinns sowie exekutiver Ergebnismaße der fünf Teilstudien

		n	ÜG	SSRT	FWT	FLEX
(I) Tanz	T	11	26.45 (4.52)	238 (55)	12.3 (4.3)	6.85 (6.27)
	NT	17	27.88 (10.40)	235 (56)	14.2 (7.0)	2.28 (11.91)
(II) Triathlon	Tri	13	28.15 (9.69)	265 (50)	10.9 (4.7)	- 2.27 (10.44)
	NSpo	10	21.20 (11.09)	268 (54)	17.8 (6.2)	- 7.71 (21.00)
(III) Fußball	F	15	17.87 (6.48)	252 (54)	12.5 (4.4)	- 2.49 (11.09)
	NSpo	14	11.79 (7.22)	316 (62)	19.4 (7.3)	- 5.37 (11.33)
(IV) Basketball	B	12	23.42 (10.93)	224 (55)	14.4 (6.1)	.71 (9.53)
(V) Gymn	Spo	12	30.92 (9.71)	229 (64)	15.0 (4.8)	4.59 (5.89)
	NSpo	14	19.79 (10.66)	217 (63)	15.4 (5.1)	2.95 (5.26)

Anmerkung. SSRT = Stop-Signal-Reaktionszeit (Inhibition). FWT = Farb-Wort-Test: Interferenzkosten. FLEX = Indexwert kognitive Flexibilität. ÜG = Übungsgewinn im ZST. T = Tänzer, NT = Nichttänzer. Tri = Triathlet. F = Fußballspieler. B = Basketballspieler. Spo = Sportler. NSpo = Nichtsportler. Gymn = Gymnasium.

⁶ Multipliziert mit dem Faktor 100 gibt dieses Maß den prozentualen Anteil der durch die unabhängige Variable aufgeklärten Varianz an.

Die statistische Überprüfung inwieweit sich Sportler sowie Nichtsportler der fünf Teilstudien in den vier Ergebnismaßen (siehe Tabelle 4) unterschieden, erfolgte jeweils mittels einer univariaten ANOVA mit den Kontrollvariablen „Geschlecht“ und „Schulart“ sowie bei den Sportlern zusätzlich mit der Variable „Sportartengruppe“. Bei den Nichtsportlern wurden weder bei der Inhibition noch bei der Interferenz oder dem Übungsgewinn signifikante Differenzen festgestellt. Einzig die kognitive Flexibilität zwischen den Nichtsportlern der Fußballteilstudie und den sportlich inaktiven Gymnasiasten wurde signifikant, $F(3, 35) = 4.23, p < .05, \eta_p^2 = .27$. Bei den Sportlern gab es bei keinem der vier Ergebnismaße einen signifikanten Unterschied.

5.5.2.2 Kontrollvariablen Gesamtstichprobe

Die Gesamtstichprobe setzte sich aus 77 sportlich aktiven („Sportler“) und 41 sportlich inaktiven („Nichtsportler“) Schülern zusammen. Der Altersunterschied zwischen Sportlern ($M = 13.64, SD = .96$) und Nichtsportlern ($M = 13.85, SD = .99$) war nicht signifikant. Bei der Verteilung des Geschlechtes zeigt sich bei den männlichen Probanden (Pb) kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen, bei den weiblichen Pb nahmen jedoch signifikant mehr weibliche Sportlerinnen an der Untersuchung teil, $\chi^2(1) = 11.25, p < .01$, Odds Ratio = 1.60. Der Vergleich der besuchten Schule ergab nur für die Schulart „Gymnasium“ eine signifikante Differenz, $\chi^2(1) = 18.25, p < .01$: Es nahmen überzufällig mehr sportlich aktive als inaktive Gymnasiasten teil. Insgesamt besuchten in der Sportlergruppe 56 Pb das Gymnasium, 16 eine Realschule sowie 5 die Hauptschule. Bei den Nichtsportlern wurden 19 Gymnasiasten, 15 Realschüler und 7 Hauptschüler getestet. Diese inhomogene Zusammensetzung wurde bei allen weiteren Berechnungen berücksichtigt. Die sportlich aktiven Schüler betrieben erwartungsgemäß signifikant mehr und länger Sport als ihre sportlich inaktiven Mitschüler (Sportstunden/Woche: $M = 6.79, SD = 3.07$ vs. $M = 2.16, SD = 1.98, t(112) = -9.90, p < .001$ bzw. Sport/Jahre: $M = 6.95, SD = 2.87$ vs. $M = 1.76, SD = 2.80, t(116) = -9.44, p < .001$).

5.5.2.3 Kontrollvariablen Schulart

Der Altersvergleich der Pb aus den verschiedenen Schularten (Hauptschule: $n = 12, M = 14.00, SD = 1.13$; Realschule: $n = 31, M = 13.61, SD = .92$; Gymnasium: $n = 75, M = 13.71, SD = .97$) ergab keinen signifikanten Unterschied. Das Geschlechtsverhältnis war

nur für das Gymnasium nicht ausgeglichen: hier überwogen die weiblichen Pb, $\chi^2(1) = 24.65$, $p < .01$. Die Schularten unterschieden sich weder hinsichtlich der durchschnittlichen Sportstunden pro Woche noch bezogen auf die Zeitdauer in Jahren, die die sportlich Aktiven bereits Sport betreiben.

5.5.2.4 Kontrollvariablen Gymnasiasten

In der Teilstichprobe der Gymnasiasten war kein Altersunterschied zwischen Sportlern ($n = 56$, $M = 13.59$, $SD = .97$) und Nichtsportlern ($n = 19$, $M = 14.05$, $SD = .91$) zu beobachten. Diese Stichprobe setzte sich aus 45 Mädchen und 11 Jungen in der Sportlergruppe sowie 14 Mädchen und 5 Jungen in der Nichtsportlergruppe zusammen, Odds Ratio = 1.55. Auch sportlich aktive Gymnasiasten betrieben erwartungsgemäß signifikant mehr und länger Sport als ihre sportlich inaktiven Mitschüler (Trainingsstunden/Woche: $M = 6.19$, $SD = 2.31$ vs. $M = 1.84$, $SD = 2.13$, $t(73) = -7.22$, $p < .001$ bzw. Sport/Jahre: $M = 6.93$, $SD = 2.88$ vs. $M = 2.37$, $SD = 2.94$, $t(73) = -5.93$, $p < .001$).

5.5.2.5 Kontrollvariablen Sportart

Aus den Sportartengruppen wurde jeweils eine Sportart ausgewählt. Diese Sportarten repräsentieren unterschiedliche koordinativ-kognitive Anforderungsprofile: 13 junge Triathleten ($M = 13.46$, $SD = 1.20$), 16 junge Tänzer ($M = 13.88$, $SD = .89$) und 17 junge Fußballer ($M = 13.76$, $SD = .97$), die sich nicht signifikant bezüglich des Alters sowie im Triathlon und im Fußball nicht signifikant bezüglich des Geschlechts unterschieden. Die Tänzerinnen waren alle weiblich und bis auf eine Ausnahme Gymnasiasten. 8 Triathleten besuchten das Gymnasium, 4 die Realschule und 1 die Hauptschule. Die Gruppe der Fußballer setzte sich aus 6 Gymnasiasten, 7 Realschülern und 4 Hauptschülern zusammen. Die Wochentrainingszeit beim Triathlon lag mit 10.27 Stunden pro Woche ($SD = 4.72$) signifikant höher als im Fußball ($M = 6.76$, $SD = 2.23$) und im Tanz ($M = 5.09$, $SD = 1.66$), wo jeweils deutlich weniger Trainingsumfänge pro Woche realisiert wurden, $F(2, 43) = 10.91$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .34$. Die paarweisen Vergleiche zwischen Triathlon und Tanz sowie Triathlon und Fußball wurden beide bezüglich der wöchentlichen Trainingsdauer signifikant ($p < .001$ und $p < .01$). Die Zeitdauer in Jahren seit Beginn der Sportausübung unterschied sich nicht zwischen den Sportarten.

5.5.3 Hypothese 1: Kognitive Reserve

In den nachfolgenden Abschnitten werden deskriptive und inferenzstatistische Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsgruppen dargestellt. Dies gilt für die kognitive Reserve und alle weiteren Ergebnismaße.

5.5.3.1 Gesamtstichprobe

Deskriptive Ergebnisse

Das Ergebnismaß der kognitiven Reserve ist der gemittelte Übungsgewinn von Sportlern und Nichtsportlern über 10 Übungsdurchläufe. Abbildung 3 stellt die mittleren Übungsgewinne und Standardfehler sowohl der Gesamtstichprobe also auch getrennt nach Schularten dar.

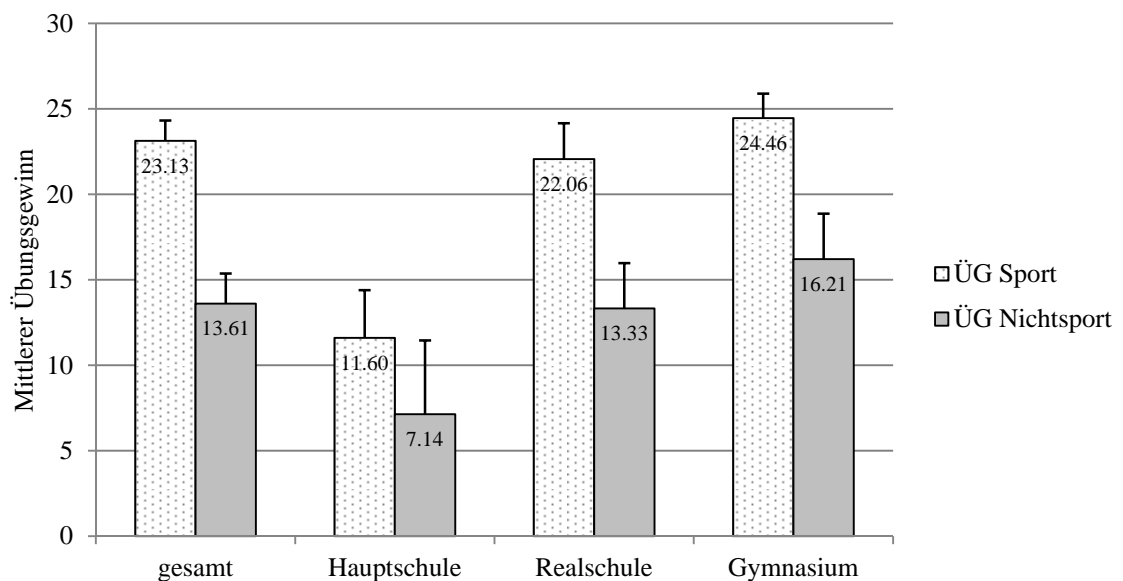


Abbildung 3. Mittlerer Übungsgewinn und Standardfehler von Sportlern und Nichtsportlern der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach besuchter Schulart.

Die Abbildungen 4 und 5 veranschaulichen grafisch die unterschiedlichen Leistungsentwicklungen von sportlich aktiven und inaktiven Probanden der Gesamtstichprobe sowie ergänzend die schulartabhängigen Leistungsverläufe.

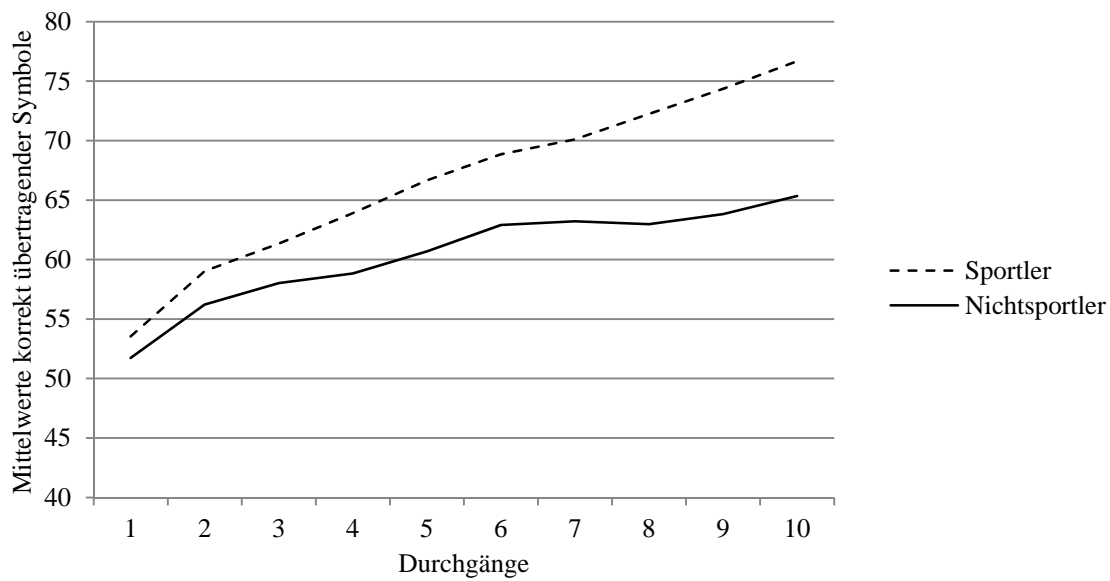


Abbildung 4. Leistungsverläufe der Sportler- und Nichtsportler.

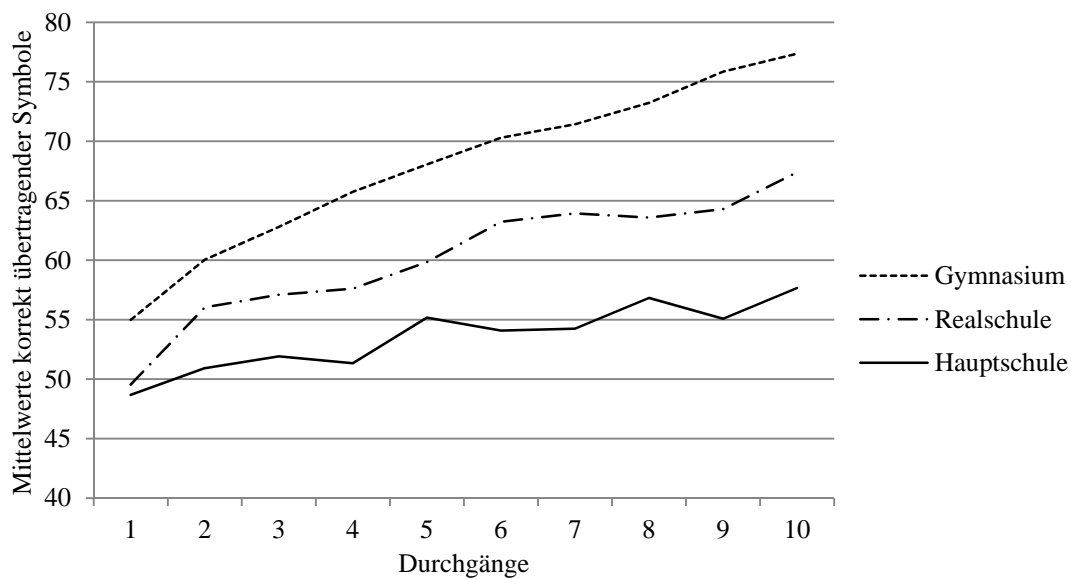


Abbildung 5. Leistungsverläufe differenziert nach besuchter Schulart.

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 1a: Sportlich aktive Schüler realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn im ZST und profitieren dabei überzufällig mehr von den Übungsdurchgängen als gleichaltrige inaktive Schüler.

Tabelle 5 stellt die Übungsgewinne mit den entsprechenden Mittelwertvergleichen der sportlich aktiven und inaktiven Schüler aller 10 Übungsdurchgänge dar.

Tabelle 5

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für die Messung der kognitiven Reserve in der Gesamtstichprobe

Variable	Sportler (n = 77)			Nichtsportler (n = 41)			t	d
	M	SD	Bereich	M	SD	Bereich		
ZST 1	53.55	9.01	28-75	51.73	10.58	26-69	-.98	.16
ZST 2	59.04	9.64	36-81	56.22	11.21	28-76	-1.43	.23
ZST 3	61.35	9.96	38-85	58.02	12.20	27-83	-1.60	.25
ZST 4	63.91	10.97	39-96	58.83	14.19	30-85	-2.00*	.34
ZST 5	66.66	12.26	41-96	60.68	13.40	33-87	-2.44*	.39
ZST 6	68.86	12.22	42-96	62.90	15.29	33-91	-2.15*	.37
ZST 7	70.10	11.65	43-102	63.22	15.43	33-93	-2.50*	.43
ZST 8	72.25	12.25	41-105	62.98	16.02	33-97	-3.24**	.56
ZST 9	74.36	13.87	44-110	63.83	16.66	35-96	-3.66***	.58
ZST 10	76.68	13.58	43-111	65.34	16.86	37-99	-3.96***	.63
ÜG	23.13	10.45	6 - 54	13.61	11.29	1-46	-4.58***	.72

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. d = Effektstärke (Cohen's d). ZST 1 = 1. Durchgang ZST. ÜG = Übungsgewinn.

Die beiden Gruppen zeigten im ersten Durchgang des ZST eine vergleichbare Testleistung, $t(116) = -.989$, $p = .33$. Ab Übungsdurchgang 4 war der Unterschied in den Ergebnissen der Sportler und Nichtsportler signifikant: erst auf dem 5%-Niveau (Durchgang 4 bis 7), dann auf dem 1%-Niveau (Durchgang 8) und schließlich auf dem 0.1%-Niveau (Durchgang 9 und 10), $t(116) = -3.96$, $p < .01$.

Sportliche Schüler erreichten beim Übungsgewinn signifikant bessere Leistungen als nicht-sportliche Schüler, $t(116) = -4.58$, $p < .01$. Die Streuung der Ergebnisse nahm in beiden Gruppen über die zehn Übungsdurchgänge kontinuierlich und in nahezu identischem Maße zu ($r = .93$, $p < .01$).

Zur exakten Bestimmung des Einflusses von Sport auf den Übungsgewinn wurde eine ANOVA mit den Kovariaten „Geschlecht“, „Schulart“ und „Jahre/Sport“ durchgeführt. Sportlich aktive Schüler zeigten einen signifikant größeren Übungsgewinn und damit eine größere kognitive Reserve als die sportlich inaktiven Mitschüler, $F(1, 113) = 10.12, p < .01, \eta_p^2 = .08$. Die Kovariate „Schulart“ wird signifikant, $F(1, 113) = 6.28, p < .05, \eta_p^2 = .05$, die Kovariaten „Geschlecht“, und „Jahre/Sport“ hingegen nicht.

Zur statistischen Überprüfung möglicher Wechselwirkungen wurde eine ANOVA mit Messwiederholung gerechnet⁷. „Geschlecht“, „Schulart“ und „Jahre/Sport“ wurden hierbei wiederum als Kovariaten berücksichtigt. Die Analyse ergab für den Haupteffekt „Sport“ ein signifikantes, $F(1, 113) = 3.94, p < .05, \eta_p^2 = .03$, für den Haupteffekt „Durchgang“ hingegen kein signifikantes Ergebnis.

Die Interaktionseffekte „Durchgang“ x „Sport“ und „Durchgang“ x „Schulart“ waren signifikant, $F(5, 504) = 4.91, p < .001, \eta_p^2 = .04$ bzw. $F(5, 504) = 3.96, p < .01, \eta_p^2 = .03$, nicht hingegen die Interaktionseffekte „Durchgang“ x „Geschlecht“ sowie „Durchgang“ x „Jahre/Sport“. Die Kovariaten „Geschlecht“ und „Schulart“ waren wie erwartet beide signifikant, $F(1, 113) = 16.79, p < .001, \eta_p^2 = .13$ bzw. $F(5, 504) = 9.98, p < .01, \eta_p^2 = .08$, die Kovariate „Jahre/Sport“ hingegen nicht.

→ Hypothese 1a konnte bestätigt werden: Sportlich aktive Schüler haben einen signifikant größeren Übungsgewinn und profitieren signifikant mehr von den Übungsdurchgängen als gleichaltrige inaktive Schüler.

5.5.3.2 Gymnasiasten

In der folgenden Datenanalyse wird die Schulbildung, als Indikator von Intelligenz, kontrolliert (Stern, 2009). Diese erfolgt mit einem Teil der Probanden aus der Gesamtstichprobe, den Gymnasiasten.

Deskriptive Ergebnisse

Abbildung 6 veranschaulicht die Leistungsentwicklungen von sportlich aktiven und inaktiven Gymnasiasten.

⁷ Sphärizität konnte nicht angenommen werden, deshalb erfolgte Greenhouse-Geisser-Korrektur.

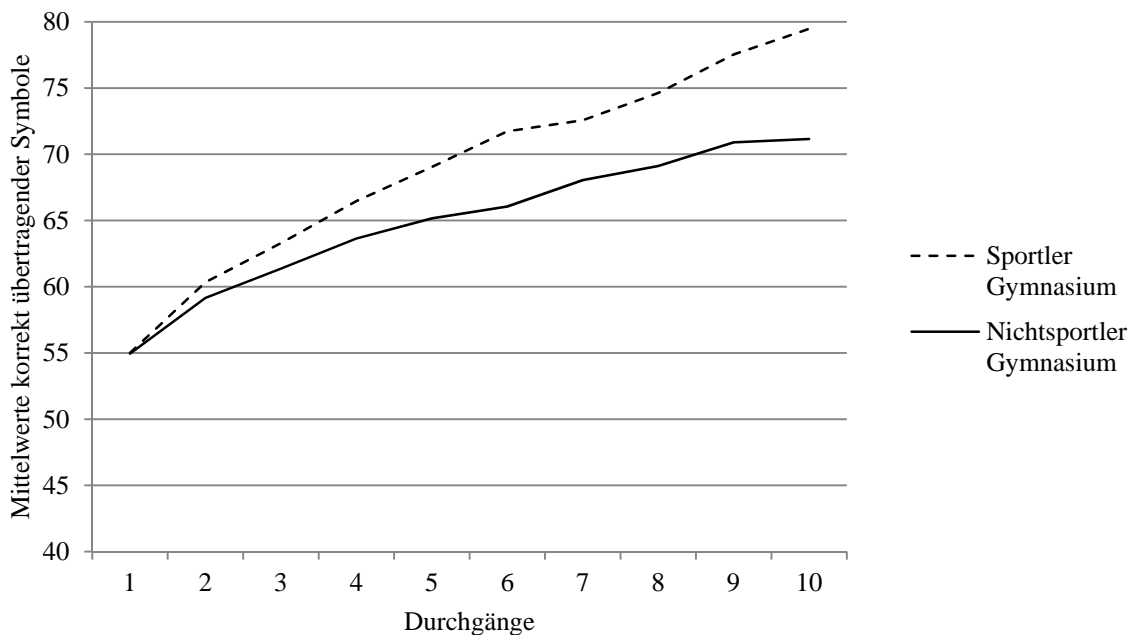


Abbildung 6. Leistungsverläufe sportlich aktiver und inaktiver Gymnasiasten.

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 1b: Sportlich aktive Gymnasiasten realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn und profitieren dabei überzufällig mehr von den Übungsdurchgängen als gleichaltrige inaktive Mitschüler.

Die Übungsgewinne mit den dazugehörigen Mittelwertvergleichen von sportlich aktiven und sportlich inaktiven Gymnasiasten werden in Tabelle 6 auf der nächsten Seite gegenübergestellt.

Beide Gruppen starteten von einem identischen Ausgangsniveau, Sportler: $M = 55.00$, $SD = 8.38$, Nichtsportler: $M = 54.95$, $SD = 8.17$, $t(73) = -.02$, $p = .98$. Der Unterschied im 10. Übungsdurchgang war signifikant, $t(73) = -2.33$, $p < .05$.

Beim Übungsgewinn durch Retest unterschieden sich sportliche und nichtsportliche Gymnasiasten signifikant voneinander, $t(73) = -2.97$, $p < .01$. Die Streuung der Ergebnisse nahm auch hier in beiden Gruppen kontinuierlich über die zehn Übungsdurchgänge zu. Die Zunahme verlief wiederum sehr ähnlich ($r = .78$, $p < .01$).

Tabelle 6

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für die Messung der kognitiven Reserve bei Gymnasiasten

Variable	Sportler (n = 56)			Nichtsportler (n = 19)			t	d
	M	SD	Bereich	M	SD	Bereich		
ZST 1	55.00	8.38	32-75	54.95	8.17	37-68	-.02	.00
ZST 2	60.34	9.60	36-81	59.16	6.69	46-73	-.50	.11
ZST 3	63.29	9.56	38-85	61.37	9.40	40-77	-.76	.16
ZST 4	66.46	10.83	40-96	63.63	10.69	31-77	-.99	.21
ZST 5	69.04	12.25	42-96	65.16	8.58	44-79	-1.28	.28
ZST 6	71.73	11.68	43-96	66.05	10.02	51-87	-1.90	.42
ZST 7	72.57	11.44	43-102	68.05	11.44	49-93	-1.49	.32
ZST 8	74.63	12.60	41-105	69.11	13.19	46-97	-1.63	.35
ZST 9	77.54	13.86	44-110	70.89	12.50	46-95	-1.85	.40
ZST 10	79.46	13.60	43-111	71.16	12.87	43-99	-2.33*	.51
ÜG	24.46	10.70	6 - 54	16.21	11.58	6-46	-2.85**	.61

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. d = Effektstärke (Cohen's d). ZST 1 = 1. Durchgang ZST. ÜG = Übungsgewinn.

Die Hypothesenprüfung erfolgte mittels einer univariaten ANOVA. Dabei wurden das Geschlecht und die Sportjahre kontrolliert. Sportlich aktive Gymnasiasten ($M = 24.46$, $SD = 10.70$) absolvierten den Test zur kognitiven Reserve signifikant besser als ihre sportlich inaktiven Mitschüler ($M = 16.21$, $SD = 11.58$): $F(1, 71) = 6.95$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .09$. Keine der beiden Kovariaten wurde signifikant.

Zur statistischen Überprüfung möglicher Wechselwirkungen wurde eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt⁸. Auch hierbei wurden „Geschlecht“ und „Jahre/Sport“ als Kovariaten berücksichtigt.

Bei der Teilstichprobe der Gymnasiasten ergab die Berechnung des Haupteffektes „Durchgang“ ein signifikantes Ergebnis, $F(4, 255) = 10.20$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .13$. Der Haupteffekt „Sport“ war hier nicht signifikant.

⁸ Sphärizität konnte nicht angenommen werden, deshalb erfolgte Greenhouse-Geisser-Korrektur.

Der Interaktionseffekt „Durchgang“ x „Sport“ war signifikant, $F(4, 255) = 3.40, p < .05$, $\eta_p^2 = .05$, wogegen die Interaktionseffekte „Durchgang“ x „Geschlecht“ sowie „Durchgang“ x „Jahre/Sport“ nicht signifikant waren. Die Kovariate „Geschlecht“ war auch hier wie erwartet signifikant, die Kovariate „Sportjahre“ hingegen nicht.

→ Hypothese 1b konnte bestätigt werden: Sportlich aktive Gymnasiasten erreichen einen signifikant größeren Übungsgewinn und profitieren dabei signifikant mehr von den Übungsdurchgängen als ihre gleichaltrigen inaktiven Mitschüler.

5.5.3.3 Ausgewählte Sportarten

Deskriptive Ergebnisse

In Abbildung 7 sind die mittleren Übungsgewinne der sportlich aktiven Probanden aus den ausgewählten Sportarten grafisch dargestellt.

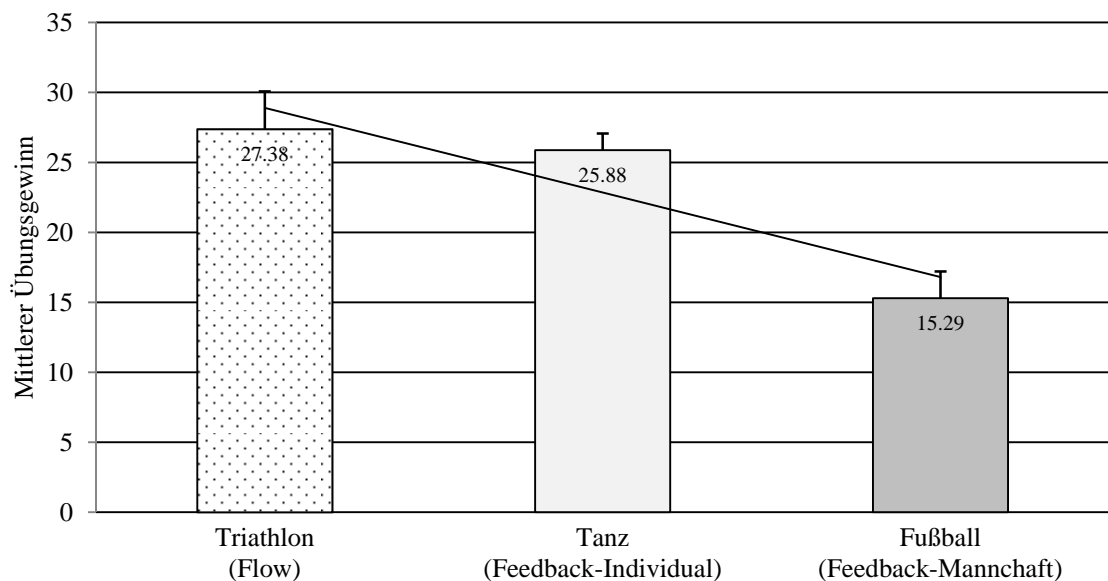


Abbildung 7. Mittlerer Übungsgewinn und Standardfehler ausgewählter Sportarten.

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 1c: Die ausgewählten Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball unterscheiden sich signifikant bezüglich ihres Übungsgewinns im ZST und profitieren dabei unterschiedlich von den Übungsdurchgängen.

Der Vergleich der Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball mittels ANOVA, unter Berücksichtigung der Kovariaten „Geschlecht“, „Schulart“ und „Sport/Woche“ zeigte beim mittleren Übungsgewinn einen signifikanten Unterschied, $F(2, 40) = 6.58, p < .01, \eta_p^2 = .25$. Die paarweisen Vergleiche zwischen Fußball und Tanz sowie Triathlon waren beide signifikant ($p < .05$).

Zur inferenzstatistischer Überprüfung möglicher Wechselwirkungen hat, wurden die drei ausgewählten Sportarten mittels ANOVA mit Messwiederholung verglichen⁹. Dabei wurden „Geschlecht“ und „Schulart“ und „Sport/Woche“ als Kovariaten berücksichtigt. Der Vergleich ergab weder für den Haupteffekt „Durchgang“ noch für den Haupteffekt „Sportart“ ein signifikantes Ergebnis.

Der Interaktionseffekt „Durchgang“ x „Sportart“ war signifikant, $F(9, 176) = 2.18, p < .05, \eta_p^2 = .10$. Triathleten und Tänzer profitierten somit von den Übungsdurchgängen deutlich mehr als Fußballspieler. Alle weiteren Interaktionseffekte wurden nicht signifikant. Die Kovariate „Schulart“ wurde auch hier signifikant, $F(1, 40) = 8.11, p < .01, \eta_p^2 = .17$, „Geschlecht“ und „Sport/Woche“ hingegen nicht.

→ Hypothese 1c konnte bestätigt werden: Die Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball unterscheiden sich signifikant bezüglich ihres Übungsgewinns im ZST. Triathleten und Tänzer profitieren dabei signifikant mehr von den Übungsdurchgängen.

5.5.4 Hypothese 2: Exekutive Funktionen

5.5.4.1 Gesamtstichprobe

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 2a: Sportlich aktive Schüler zeigen signifikant bessere Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz und kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit als gleichaltrige inaktive Schüler.

⁹ Sphärizität konnte nicht angenommen werden, deshalb erfolgte Greenhouse-Geisser-Korrektur.

Zur Überprüfung der Unterschiede bei der Inhibition, Interferenz, kognitiven Flexibilität und den mittleren Reaktionszeiten zwischen sportlich aktiven und sportlich inaktiven Jugendlichen wurde mit der Gesamtstichprobe eine ANOVA berechnet. Die Kovariaten „Geschlecht“, „Schulart“ und „Jahre/Sport“ fanden dabei Berücksichtigung. Tabelle 7 fasst alle deskriptiven Daten und Mittelwertvergleiche zusammen.

Tabelle 7

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit der Gesamtstichprobe

Variable	Sportler (n = 77)			Nichtsportler (n = 41)			F	η_p^2
	M	SD	Bereich	M	SD	Bereich		
SSRT	240	56	132-356	267	70	131-422	.64	.01
FWT	13.3	5.5	4.1-30.3	17.2	6.2	5.0-35.5	2.86	.03
FLEX	1.16	10.11	-38.71-13.97	-2.17	13.37	-55.70-12.67	.01	.00
RZ	682	127	463-1018	759	194	465-1296	2.02	.02
Fehler	4.82	4.19	0-26	4.76	4.15	0-22	1.40	.01
SAI	-1.23	8.06	-33.46-21.54	2.31	8.53	-23.06-21.75	4.31*	.04
MRZ	535	71	390-682	565	71	381-716	1.72	.02

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partiell Eta-Quadrat). SSRT = Stop-Signal-Reaktionszeit (Inhib). FWT = Farb-Wort-Test. FLEX = Indexwert kognitive Flexibilität. RZ = Median der Reaktionszeiten im Flexibilitätstest. SAI = Speed-Accuracy-Index. MRZ = Mittlere Reaktionszeit.

Tendenziell erreichten die Sportler in allen exekutiven Bereichen bessere Leistungen, signifikant war der Unterschied allerdings nur bei dem Speed-Accuracy-Index, $F(1, 113) = 4.31, p < .05, \eta_p^2 = .04$: Sportler wählten bei der Bearbeitung dieses Flexibilitätstests eine Geschwindigkeitsstrategie mit kürzeren Reaktionszeiten und etwas mehr Fehlern, während die Nichtsportler langsamer und genauer reagierten (Genauigkeitsstrategie).

Die beide Kovariaten „Geschlecht“ und „Schulart“ waren bei den Ergebnismaßen SSRT, $F(1, 113) = 11.00, p < .01, \eta_p^2 = .09$ und $F(1, 113) = 8.29, p < .01, \eta_p^2 = .07$, FLEX, $F(1, 113) = 5.61, p < .05, \eta_p^2 = .05$ und $F(1, 113) = 13.71, p < .001, \eta_p^2 = .11$ sowie RZ, $F(1, 113) = 3.99, p < .05, \eta_p^2 = .03$ und $F(1, 113) = 17.01, p < .001, \eta_p^2 = .13$ signifikant.

→ Hypothese 2a konnte nicht bestätigt werden: Sportlich aktive Schüler zeigten in keinem der exekutiven Teilbereiche Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit eine signifikant bessere Leistung als gleichaltrige inaktive Schüler. Einzig bei der Bearbeitungsstrategie im Test der kognitiven Flexibilität konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Ergänzung:

Um die Schüler der unterschiedlichen Schularten bezüglich ihrer exekutiven Leistungen vergleichen zu können, wurde ergänzend eine ANOVA mit der Kovariate „Geschlecht“ gerechnet.

Wie erwartet unterschieden sich die Ergebnisse der 3 Schularten in allen Bereichen der exekutiven Funktionen signifikant (Tabelle 8). Einzige Ausnahme war die Fehlerrate und der gewählten Strategie im Test der kognitiven Flexibilität.

Die Gymnasiasten zeigten dabei durchwegs bessere Leistungen als Real- und Hauptschüler. Die Kovariate „Geschlecht“ war wiederum bei den Ergebnismaßen SSRT und FLEX signifikant, $F(1, 114) = 11.74, p < .01, \eta_p^2 = .09$ sowie $F(1, 114) = 6.16, p < .05, \eta_p^2 = .05$.

Tabelle 8

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit im Schulartenvergleich

Variable	Hauptschule (n = 12)		Realschule (n = 31)		Gymnasium (n = 75)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
SSRT	310	63	264	58	234	58	5.58***	.09
FWT	19.0	6.9	14.1	6.3	14.1	5.6	3.67*	.06
FLEX	-12.56	19.09	-2.36	10.03	2.99	8.58	8.26***	.13
RZ	873	247	763	159	660	108	10.45***	.16
Fehler	7.83	6.41	4.74	3.67	4.33	3.74	3.86	.04
SAI	2.23	11.00	2.55	8.91	-1.41	7.40	2.80	.05
MRZ	570	79	571	57	531	73	3.49*	.06

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). SSRT = Stop-Signal-Reaktionszeit (Inhib). FWT = Farb-Wort-Test. FLEX = Indexwert kognitive Flexibilität. RZ = Median der Reaktionszeiten im Flexibilitätstest. SAI = Speed-Accuracy-Index. MRZ = Mittlere Reaktionszeit.

5.5.4.2 Gymnasiasten

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 2b: Sportlich aktive Gymnasiasten zeigen signifikant bessere Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz und kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit als gleichaltrige inaktive Mitschüler.

Zur Überprüfung der Fragestellung, inwieweit sich sportlich aktive und sportlich inaktive Gymnasiasten in den exekutiven Teilbereichen unterscheiden, wurde eine ANOVA mit den Kovariaten „Geschlecht“ und „Jahre/Sport“ durchgeführt. Tabelle 9 fasst alle deskriptiven Daten und die Mittelwertvergleiche zusammen.

Tabelle 9

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit der Gymnasiasten

Variable	Sportler (n = 56)			Nichtsportler (n = 19)			F	η_p^2
	M	SD	Bereich	M	SD	Bereich		
SSRT	235	57	136-354	230	62	131-370	.03	.00
FWT	13.9	5.7	4.1-30.3	14.9	5.2	5.0-25.9	.04	.00
FLEX	3.25	9.46	-38.71-13.97	2.23	5.36	-9.03-10.87	.09	.00
RZ	646	110	463-1006	699	95	535-864	3.10	.04
Fehler	4.54	4.09	0-26	3.74	2.42	0-9	.89	.01
SAI	-2.36	7.52	-33.46-21.54	1.38	6.46	-11.38-12.81	3.96	.05
MRZ	526	71	390-656	545	79	381-716	.70	.01

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielltes Eta-Quadrat). SSRT = Stop-Signal-Reaktionszeit (Inhib). FWT = Farb-Wort-Test. FLEX = Indexwert kognitive Flexibilität. RZ = Median der Reaktionszeiten im Flexibilitätstest. SAI = Speed-Accuracy-Index. MRZ = Mittlere Reaktionszeit.

Die Sportler unterschieden sich in keinem Bereich der exekutiven Funktionen signifikant von den Nichtsportlern. Der Speed-Accuracy-Index deutete erneut auf unterschiedliche Bearbeitungsstrategien hin: Sportler wählten tendenziell eher eine Geschwindigkeitsstrategie, während Nichtsportler hingegen eine Genauigkeitsstrategie bevorzugten. Die

Kovariate „Geschlecht“ war einzig bei dem Ergebnismaß SSRT signifikant, $F(1, 71) = 4.79, p < .05, \eta_p^2 = .06$.

→ Hypothese 2b konnte nicht bestätigt werden: Sportlich aktive Gymnasiasten zeigten in keinem der exekutiven Teilbereiche Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit eine signifikant bessere Leistung als ihre gleichaltrigen inaktiven Mitschüler.

5.5.4.3 Ausgewählte Sportarten

Inferenzstatistische Ergebnisse

- *Hypothese 2c:* Die ausgewählten Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball unterscheiden sich signifikant bezüglich der Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz und kognitive Flexibilität sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit.

Tabelle 10 fasst alle deskriptiven Daten sowie Mittelwertvergleiche zusammen.

Tabelle 10

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit ausgewählter Sportarten

Variable	Triathlon (n = 13) FLW		Tanz (n = 16) FBI		Fußball (n = 17) FBM		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
SSRT	265	50	220	57	254	51	.63	.02
FWT	10.9	4.7	13.4	4.6	13.0	5.2	.10	.01
FLEX	-2.27	10.44	5.75	6.04	-1.32	10.90	3.42*	.15
RZ	722	115	661	118	742	153	.42	.02
Fehler	5.77	4.11	2.69	2.02	4.71	4.13	4.78*	.19
SAI	-1.04	6.47	1.43	6.61	1.63	8.63	1.72	.08
MRZ	537	73	533	62	569	76	.62	.03

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). FLW = Flow-Sportart. FBI = Feedback-Individualsportart. FBM = Feedback-Mannschaftssportart. SSRT = Stop-Signal-Reaktionszeit (Inhib). FWT = Farb-Wort-Test. FLEX = Indexwert kognitive Flexibilität. RZ = Median der Reaktionszeiten im Flexibilitätstest. SAI = Speed-Accuracy-Index. MRZ = Mittlere Reaktionszeit.

Um die Unterschiede zwischen den Sportarten in den verschiedenen exekutiven Bereichen zu vergleichen, wurden univariate Varianzanalysen mit den Kovariaten „Geschlecht“, „Schulart“ und „Sport/Woche“ durchgeführt.

Die Leistungen der kognitiven Flexibilität unterschieden sich signifikant zwischen den Sportarten, $F(2, 40) = 3.42, p < .05, \eta_p^2 = .15$. Der paarweise Vergleich zwischen Triathlon und Tanz war signifikant, $p < .05$, nicht jedoch die weiteren zwei Vergleiche Triathlon und Fußball sowie Fußball und Tanz. Dies ist auf den deutlichen Unterschied bei der Fehlerrate im Test der kognitiven Flexibilität zurückzuführen, $F(2, 40) = 4.78, p < .05, \eta_p^2 = .19$. Dabei unterschied sich der paarweise Vergleich zwischen Triathlon und Tanz überzufällig, $p < .05$. Die Kovariate „Schulart“ war bei den Ergebnismaßen FLEX, $F(2, 40) = 12.38, p < .01, \eta_p^2 = .24$, und RZ, $F(2, 40) = 7.83, p < .01, \eta_p^2 = .16$, signifikant, wie die wöchentliche Trainingsdauer beim SAI, $F(2, 71) = 5.42, p < .05, \eta_p^2 = .12$.

→ Hypothese 2c konnte nur teilweise bestätigt werden: Die ausgewählten Sportarten Triathlon, Tanz und Fußball unterschieden sich signifikant bezüglich der Leistungen in der kognitiven Flexibilität. In den anderen exekutiven Teilbereichen sowie in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit war kein signifikanter Unterschied festzustellen.

5.5.5 Hypothese 3: Schulkontext

5.5.5.1 Zusammenhang von kognitiver Reserve und Schulnote

- Hypothese 3a: Es gibt einen signifikanten Zusammenhang zwischen der kognitiven Reserve und den Schulnoten in den Fächern Mathematik, Deutsch und Musik.

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen kognitiver Reserve und den Schulnoten der Fächer Mathematik, Deutsch und Musik ergab für keines der Fächer einen signifikanten Zusammenhang (Mathematik: $r = -.16, p = .10$; Deutsch: $r = -.03, p = .74$; Musik: $r = .09, p = .35$). Das Geschlecht und die Schulart wurden bei der Berechnung kontrolliert.

Die zweite Analyse nur mit Schülern des Gymnasiums erbrachte ein identisches Ergebnis: Der Übungsgewinn korrelierte erneut in keinem der drei Fächer mit der Schulnote (Mathematik: $r = -.07, p = .57$; Deutsch: $r = .07, p = .55$; Musik: $r = .21, p = .07$).

→ Hypothese 3a konnte nicht bestätigt werden: Es wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen der kognitiven Reserve und der Schulnote in den Fächern Mathematik, Deutsch und Musik gefunden.

5.5.5.2 Schulnoten und körperlich-sportliche Aktivität

Deskriptive Ergebnisse

Die Abbildungen 8, 9 und 10 veranschaulichen die mittleren Noten in den 3 Fächern und differenzieren dabei zusätzlich nach Schulart.

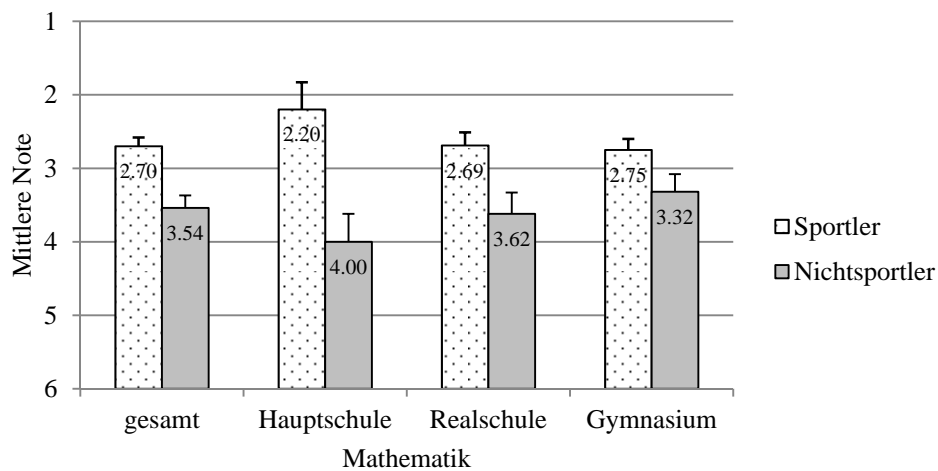


Abbildung 8. Mittlere Schulnote und Standardfehler im Fach Mathematik der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach Schulart.

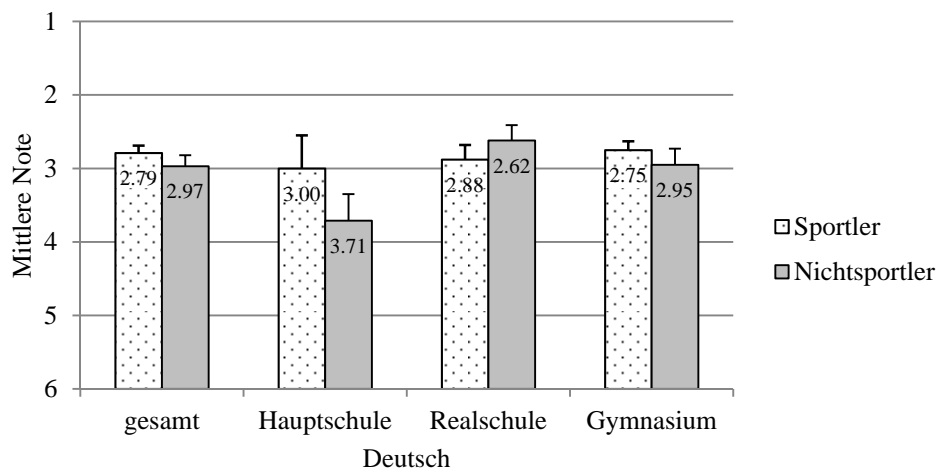


Abbildung 9. Mittlere Schulnote und Standardfehler im Fach Deutsch der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach Schulart.

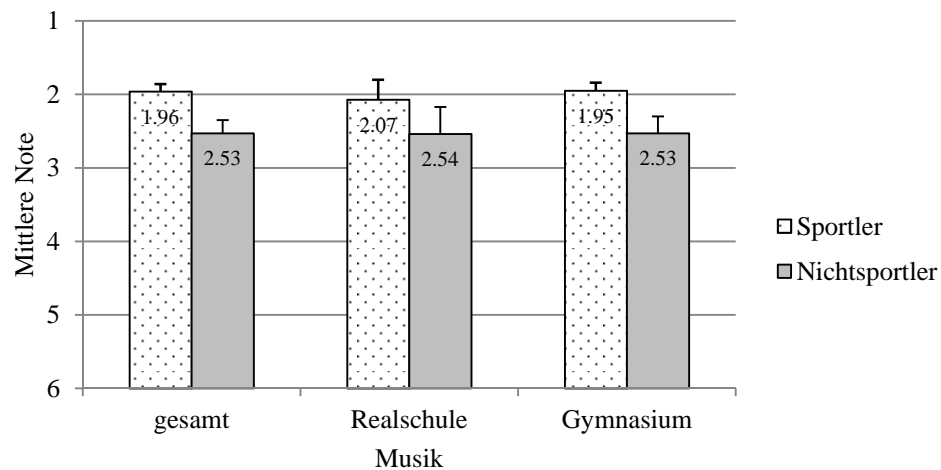


Abbildung 10. Mittlere Schulnote und Standardfehler im Fach Musik der Gesamtstichprobe sowie differenziert nach Schulart.

Inferenzstatistische Ergebnisse

- *Hypothese 3b*: Sportlich aktive Schüler haben signifikant bessere Schulnoten in den Fächern Mathematik, Deutsch und Musik als gleichaltrige sportlich inaktive Schüler.

(a) Notenvergleich insgesamt

Vergleicht man die mittleren Schulnoten in den Fächern Mathematik, Deutsch und Musik von den sportlich aktiven Schülern insgesamt mit denen ihrer sportlich inaktiven Mitschüler, so hatten unabhängig von der Schulart letztere eine signifikant schlechtere Musiknote, $F(1, 104) = 5.63, p < .05, \eta_p^2 = .05$. Weder die Note in Mathematik noch die in Deutsch unterschied sich dagegen überzufällig. Bei diesem Vergleich wurden neben der Schulart auch noch das Geschlecht und die Sportjahre kontrolliert. Die Kovariate „Jahre/Sport“ war bei der Mathematiknote signifikant, $F(1, 111) = 5.08, p < .05, \eta_p^2 = .04$.

(b) Notenvergleich differenziert nach Schulart

Die Mathematiknote (Abbildung 8) sportlicher Hauptschüler, Realschüler und Gymnasiasten unterschied sich jeweils nicht signifikant von der ihrer sportlich weniger aktiven Mitschüler. Von den kontrollierten Variablen „Geschlecht“ und „Jahre/Sport“ war einzig die Kovariate „Jahre/Sport“ bei den Gymnasiasten signifikant, $F(1, 71) = 4.74, p < .05, \eta_p^2 = .06$.

Analog das Ergebnis im Fach Deutsch (Abbildung 9): Auch hier waren die Notenunterschiede zwischen sportlich aktiven Schülern und sportlich inaktiven Schülern bei keiner Schulart signifikant. Keine Kovariate war signifikant.

Die Musiknote (Abbildung 10) der sportlich aktiven Schüler des Gymnasiums unterschied sich von der Note der sportlich inaktiven Gymnasiasten signifikant, $F(1, 71) = 4.57, p < .05, \eta_p^2 = .06$. Dagegen konnte für die Realschule kein überzufälliger Unterschied zwischen Sportlern und Nichtsportlern festgestellt werden. Auch hier war keine der Kovariaten signifikant. Das Schulfach Musik ist nicht für alle Schüler in allen Schularten ein Pflichtfach, weswegen ein Vergleich für die Hauptschule fehlt.

→ Hypothese 3b konnte nur für das Schulfach Musik und die Schulart Gymnasium bestätigt werden. Alle weiteren berechneten Vergleiche zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen sportlich aktiven und inaktiven Schülern.

5.5.6 Weiterführende Korrelationsmaße

Die Analyse der Gesamtstichprobe auf Zusammenhänge zwischen den Ergebnismaßen aus dem Bereich der kognitiven Reserve einerseits und den exekutiven Funktionen andererseits ergab drei signifikante Korrelationen: Die kognitive Reserve (ÜG) und die Bearbeitungsstrategie (SAI) im Test der kognitiven Flexibilität mit $r = -.23 (p < .05)$, erwartungsgemäß die Inhibition (SSRT) und kognitive Flexibilität (FLEX) mit $r = -.22 (p < .05)$ sowie die Interferenz (FWT) und die Bearbeitungsstrategie (SAI) mit $r = .22 (p < .05)$. Bei dieser Analyse wurden das Geschlecht, die Schulart sowie der Einfluss durch sportliche Aktivität (Sport/Woche und Jahre/Sport) kontrolliert. Die entsprechende Analyse mit der Teilstichprobe der Gymnasiasten führte zu folgenden Ergebnissen: Die Korrelationen zwischen ÜG und SAI ($r = -.36, p < .01$) sowie FLEX und SAI ($r = .26, p < .05$) waren signifikant.

Die Ergebnisse der Analyse aller Zusammenhänge zwischen den Ergebnismaßen aus den Bereichen „Sportliche Aktivität“, „Exekutive Funktionen“, „Kognitive Reserve“ sowie den „Schulnoten“ sind, getrennt nach Sportlern und Nichtsportlern, der Korrelationsmatrix im Anhang B zu entnehmen. Hervorzuheben sind bei den Sportlern folgende signifikanten, wenn auch schwachen Zusammenhänge: ÜG mit Sportart ($r = -.29, p < .05$) und Musiknote ($r = .36, p < .01$), „Sport/Woche“ und SSRT ($r = .24, p < .05$) sowie Mathematiknote und

FLEX ($r = -.32, p < .01$). In der Gruppe der Nichtsportler herauszustellen sind die signifikanten Zusammenhänge zwischen ÜG und SAI ($r = -.33, p < .05$), Body-Mass-Index (BMI) und FLEX ($r = -.47, p < .01$) sowie wiederum der Mathematiknote und kognitiver Flexibilität ($r = -.36, p < .05$).

5.6 Diskussion Studie I

Ziel dieser Studie war, den Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität auf die kognitive Reserve bei adoleszenten Kindern zu untersuchen. Die körperlich aktiven Schulkinder, die sich über den Schulsport hinaus sportlich engagierten, wurden dafür mit einer Kontrollgruppe verglichen, die, über den Pflichtunterricht in der Schule hinaus, keiner körperlich-sportlichen Betätigung nachging. Außerdem fand ein Vergleich der exekutiven Funktionen zwischen diesen Gruppen statt. Um eine Aussage über den Einfluss der ausgeübten Sportart machen zu können wurde ein Teil der sportlich aktiven Schüler aus drei Sportarten mit koordinativ-kognitiv unterschiedlichem Anforderungsprofil verglichen. Zusätzlich wurde der Zusammenhang von körperlicher Aktivität, kognitiver Reserve und den Schulnoten analysiert.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie I zusammengefasst und diskutiert. Die Diskussion studienübergreifender Aspekte findet im Anschluss an Studie II statt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Kognitive Reserve

Hinsichtlich der kognitiven Reserve zeigte sich bei den aktiven adoleszenten Schulkindern ein signifikanter Unterschied im Vergleich zur Kontrollgruppe. Das Lernpotential dieser im Sport engagierten Schüler war überzufällig größer. Die beiden untersuchten Gruppen starteten auf einem vergleichbaren Ausgangsniveau, entwickelten sich aber im Testverlauf klar unterschiedlich. Erwartungsgemäß wurde sowohl bei den sportlichen Schülern als auch in der Kontrollgruppe ein Übungsgewinn über den Testverlauf hinweg gefunden, das Ausmaß der kognitiven Reserve unterschied sich allerdings signifikant. Grund hierfür war, dass körperlich aktive Schulkinder signifikant besser von den Übungsdurchgängen profitieren konnten als ihre inaktiven Mitschüler (*Hypothese 1a*).

Eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit kognitiver Reserve spielt die Intelligenz. Kognitive Reserve und Intelligenz stehen in einem solch engen Zusammenhang (Stern, 2009), dass verschiedene Studien sie als Prädiktor oder Stellvertretervariable der kognitiven Reserve verwenden (vgl. Corral, et al., 2006; Stern, 2002). Schulbildung kann nach Stern (2009) als Indikator für Intelligenz verwendet werden. Deshalb erfolgte im zweiten Schritt mittels einer Reduzierung der Stichprobe auf Gymnasiasten die Kontrolle der Schulbildung. Die Ergebnisse der Gesamtstichprobe konnten anhand dieser Teilstichprobe noch einmal klar bestätigt werden (*Hypothese 1b*). Insgesamt zeigte sich somit hypothesenkonform, dass sportlich aktive Schüler eine deutlich größere kognitive Reserve haben im Vergleich zur inaktiven Kontrollgruppe. Beim Vergleich der Sportarten ergab sich erwartungsgemäß ein signifikanter Unterschied zwischen Triathlon, Tanz und Fußball. Triathleten profitierten noch mehr als Tänzer, von den Testwiederholungen und erreichten infolge einen signifikant größeren Übungsgewinn als Fußballer (*Hypothese 1c*).

Exekutive Funktionen

Sportlich aktive Schüler unterschieden sich bis auf eine Ausnahme in keinem untersuchten exekutiven Teilaspekt von der sportlich inaktiven Kontrollgruppe. Weder Inhibition, Interferenz oder kognitive Flexibilität, noch Verarbeitungsgeschwindigkeit unterschieden sich signifikant. Die einzige Ausnahme zeigte sich bei der Bearbeitungsstrategie im Testverfahren zur kognitiven Flexibilität: Sportlich aktive Schüler wählten bei der Testbearbeitung eine Geschwindigkeitsstrategie mit kürzeren Reaktionszeiten und akzeptierten dabei etwas mehr Fehler, während sportlich inaktive Schüler die Aufgabe langsamer und genauer bearbeiteten (*Hypothese 2a*). Diese Ergebnisse bestätigten sich bei der Teilstichprobe der Gymnasiasten, wo ausnahmslos kein Unterschied zwischen den Untersuchungsgruppen gefunden wurde (*Hypothese 2b*). Im ergänzend durchgeführten Schulartenvergleich zeigte sich die erwartete Reihenfolge bezüglich der exekutiven Fähigkeiten deutlich: Gymnasiasten sind in ausnahmslos allen Teilbereichen leistungsfähiger als Real- und Hauptschüler. Die ausgeübte Sportart spielte bei den Exekutivleistungen bis auf eine Ausnahme keine Rolle. Die Leistungen der Sportler unterschieden sich weder bei der Inhibition und der Interferenz, noch bei der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit. Allerdings waren Tänzer kognitiv signifikant flexibler, als Triathleten und Fußballer, was auf eine deutlich genauere Testbearbeitung zurückzuführen war (*Hypothese 2c*).

Schulnoten

Entgegen der eingangs formulierten Hypothese konnte in keinem der drei Schulfächer Mathematik, Deutsch und Musik ein signifikanter Zusammenhang zwischen der jeweiligen Schulnote und der kognitiven Reserve gefunden werden (*Hypothese 3a*). Weiterhin unterschieden sich schulartunabhängig sportliche aktive Schulkinder nicht signifikant von ihren inaktiven Mitschülern, weder bezüglich der Mathematik- noch der Deutschnote. Einzig die Musiknote war bei sportlich aktiven Schülern signifikant besser (*Hypothese 3b*).

Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassend wurde also gefunden, dass sportlich aktive adoleszente Kinder schulartunabhängig ein größeres kognitives Reservepotential haben, als ihre sportlich inaktiven Mitschüler. Vor dem Hintergrund des aktuellen Forschungsstandes zu körperlicher Aktivität und Kognition überraschen diese Ergebnisse nicht. Ganz im Gegenteil ergänzen sie konsistent aktuelle Befunde aus den Bereichen Lernen und Gedächtnis um den Aspekt der kognitiven Reserve (u.a. Chaddock, et al., 2010a; Chaddock, et al., 2011a; Cotman, et al., 2007; Lojovich, 2010; Pereira, et al., 2007; van Praag, 2009). Die im Mittel 13.64 Jahre alten sportlichen Schüler begannen etwa im 7. Lebensjahr mit ihrer sportlichen Aktivität und waren zum Untersuchungszeitpunkt 6.79 Stunden in der Woche körperlich aktiv. Sowohl bezüglich des Sportbeginns als auch des wöchentlichen Umfangs an selbstberichteter körperlicher Aktivität unterschieden sie sich wie erwartet von der inaktiven Kontrollgruppe. Interessant dabei ist, dass der von der Sportlergruppe angegebene Umfang körperlicher Aktivität gerade so die Kriterien für ein physisch aktives Leben erfüllte (Hallal, et al., 2012) und somit nicht eine Extremgruppe repräsentiert, sondern eher für den wünschenswerten Normalfall steht. Vor dem Hintergrund der schulischen Anforderungen, die heutzutage von Kindern bewältigt werden müssen, mag ein solcher Zeitaufwand für körperliche Aktivität hoch erscheinen. Andererseits stellt sich aber die Frage, ob dies nicht sinnvoll investierte Zeit ist. Die aufgrund von körperlicher Bewegung initiierten Entwicklungsimpulse sind sowohl im körperlichen als auch kognitiven Bereich sehr wertvoll. Das von der Sportlergruppe realisierte Ausmaß an körperlicher Aktivität scheint bereits auszureichen, um die oben dargestellten Veränderungen im vaskulären Bereich sowie bei den Neurotransmittern und Neurotrophinen auszulösen und positive Effekte für den Aufbau der kognitiven Reserve zu bewirken.

Die Annahme, dass sich Sportarten mit koordinativ-kognitiv unterschiedlichem Anforderungsprofil bei der kognitiven Reserve unterscheiden könnten, scheint sich zu bestätigen. Die gefundenen Ergebnisse werfen die Frage auf, inwieweit Sportler aus Sportarten, deren Erfolg möglicherweise weniger von der Verarbeitung externalen Feedbacks und mehr vom Umgang mit internalen Signalen der Ermüdung abhängt, in herausfordernden Situationen wie beim *Testing-the-Limits*-Ansatz in dieser Studie oder im Verlauf des Lebens größere kognitive Reservekapazitäten realisieren können. Ein möglicher Grund könnten ihre, aufgrund der Herausforderungen ihrer Sportart spezifisch trainierten, volitiven Fähigkeiten sein (Adams, 1987; Beckmann & Kazén, 1994; Hagger, Wood, Stiff, & Chatzisarantis, 2010). Im Sinne einer Hypothesengenerierung könnte dies eine Ausgangsbasis für zukünftige Studien sein, die spezifische Wirkungen von bestimmten Sportarten auf die kognitive Reserve untersuchen wollen. Ein möglicher Einfluss von volitiven Aspekten auf die kognitive Reserve einerseits, aber auch auf die Testsituation andererseits, wird weiter unten sowie in der übergreifenden Diskussion am Ende der Arbeit vertiefend thematisiert.

Die Ergebnisse aus dem Bereich der exekutiven Funktionen stehen im Widerspruch zu bisherigen Forschungsbefunden und entsprachen nicht den Hypothesen (u.a. Buck, et al., 2008; Chaddock, et al., 2011b; Sibley & Etnier, 2003; Stroth, et al., 2009; Voss, Nagamatsu, Liu-Ambrose, & Kramer, 2011b). Die tendenziell besseren Leistungen der Sportler in allen exekutiven Bereichen waren nicht signifikant. Ein möglicher Grund, dass die gefundenen Tendenzen nicht signifikant waren, können unterschiedliche Rahmenbedingungen bei der Datenerhebung gewesen sein (vgl. Ablauf der Teilstudien in Studie I ab S. 53ff): Während die Nichtsportler ohne Ausnahme ausgeruht und in ruhiger Umgebung ihre Tests durchführen konnten, wurden die Sportler aufgrund organisatorischer Restriktionen oft im oder unmittelbar nach dem Training getestet. Man könnte nun argumentieren, dass Sportler sogar einen Vorteil durch eine Aktivierung im Vorfeld der Tests gezogen haben (z.B. Hillman, et al., 2009b; Yanagisawa, et al., 2010). Dabei gilt es aber zu Bedenken, dass solch akuten Trainingseffekte eine sehr spezifische Wirkung auf kognitive Leistungen zu haben scheinen (Drollette, et al., 2012; Pesce, et al., 2009). Kritisch ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass die Arbeitsgedächtnisleistung, als wichtiger Teilaspekt der exekutiven Funktionen, in dieser Studie nicht erhoben wurde (vgl. z.B. Diamond, Barnett, Thomas, & Munro, 2007).

Erstaunen die Befunde bei den exekutiven Teilleistungen vor dem Hintergrund aktueller Forschung möglicherweise etwas, können die gefundenen Strategieunterschiede im Test der kognitiven Flexibilität als konsistent mit neueren Forschungsergebnissen zur exekutiven Kontrolle interpretiert werden: Aerob fittere Kinder verfügen über größere Ressourcen, um Umweltreize effizienter zu verarbeiten, ohne gleichzeitig übermäßig Ressourcen zur Handlungsüberwachung einzusetzen, was insbesondere bei steigender Aufgabenschwierigkeit im Test der kognitiven Reserve sehr deutlich wird (Hillman, et al., 2009a; Pontifex, et al., 2011).

Es zeigten sich die erwarteten Leistungsunterschiede hinsichtlich der exekutiven Leistungen bei den Schülern der verschiedenen Schularten: Gymnasiasten waren bezüglich ihrer exekutiven Fähigkeiten durchwegs leistungsstärker als Real- und Hauptschüler. Dies stützt Befunde zum Zusammenhang von exekutiven und schulischen Leistungen (z.B. Clair-Thompson & Gathercole, 2006; Diamond, et al., 2007) und kann als logische Verfestigung individueller Unterschiede aus der Kindheit betrachtet werden (Mazzocco & Kover, 2007).

Die ausgeübte Sportart hat in dieser Studie keinen Einfluss auf zwei der drei untersuchten exekutiven Teilleistungen. Vergleichbar mit dem obigen Befund bei der kognitiven Reserve, könnte das Ergebnis bei der dritten Teilleistung, der kognitiven Flexibilität, ein weiterer Hinweis auf mögliche spezifische Wirkungen von sportlichem Training auf kognitive Teilleistungen sein (Kida, Oda, & Matsumura, 2005). In einer Sportart wie dem Tanzen, die sehr hohe Anforderungen an eine genaue Bewegungskontrolle insbesondere mit Partner oder in einer Gruppe stellt, dürfte die Verarbeitung von Feedbackinformationen im Rahmen der Fehlererkennung und -korrektur eine wichtige Rolle spielen und so spezifisch trainiert werden (Adams, 1987; Beckmann & Kazén, 1994).

Nach den positiven Befunden für sportlich aktive Schüler bei der kognitiven Reserve, durfte man erwarten, dass sich diese Vorteile auch im schulischen Kontext manifestieren. Dies war so nicht der Fall. In keinem der drei untersuchten Schulfächer fand sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der kognitiven Reserve und der Note in dem entsprechenden Fach. Dies dürfte den einen oder anderen Kritiker des bestehenden Bildungssystems kaum verwundern und Spielraum für spannende Interpretationen öffnen. Möglicherweise zeigen sich an dieser Stelle die oben bereits erwähnten Nachteile eines, mittels einmaliger Messung festgestellten Leistungsmaßes, besonders deutlich. Eine Schulnote, auch wenn sie sich in der Regel aus unterschiedlichen Teilleistungen zusammensetzt,

hat den Nachteil, dass sie die Veränderungsdynamik durch Lernen in einer herausfordernden Situation nicht abbilden kann. In der Schule vermitteltes deklaratives Faktenwissen kann mit gewissen Einschränkungen durch eine einmalige Messung (z.B. Schulaufgabe) recht valide erfasst werden. Bei der, für herausfordernde Situationen im Leben so wichtigen Lern- und Anpassungsfähigkeit, gelingt dies nicht. Dies könnte erklären, warum kein Zusammenhang zwischen den zwei völlig unterschiedlich angelegten Ergebnismaßen gefunden wurde.

Die Forschungsbefunde zum Zusammenhang von sportlicher Aktivität und Schulleistung sind nicht immer eindeutig, insbesondere wenn Schulleistung durch die oft subjektiven Schulnoten ermittelt wird (vgl. Tabelle 1, Tomporowski, et al., 2008). Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die formulierte Hypothese nicht: Sportliche, adoleszente Schulkinder unterscheiden sich schulartunabhängig weder bezüglich der Mathematik- noch der Deutschnote überzufällig von ihren inaktiven Mitschülern. Tendenziell haben sportliche Schüler im Fach Mathematik in allen Schularten eine bessere Note, dieser Unterschied war aber nicht signifikant. Einzig bei der Musiknote zeigte sich ein überzufälliger Vorteil für die sportlich aktiven Schüler. Insgesamt konnte somit nicht klar gezeigt werden, dass Bewegung positiv mit der Schulnote assoziiert ist. Dabei ist in diesem Zusammenhang allerdings eines wichtig: Stabile Prädiktoren der Schulleistung, vom Vorschulalter bis zum Ende der schulischen Laufbahn, wie die inhibitorische Verhaltenskontrolle und Arbeitsgedächtnisleistung (Diamond, et al., 2007), können durch sportliche Aktivität positiv beeinflusst werden (u.a. Chaddock, et al., 2011b; Sibley & Etnier, 2003). Zukünftig könnte neben neuroelektrischen Biomarkern wie sie Hillman vorschlägt (2012), möglicherweise auch die kognitive Reserve als ein weiterer valider Prädiktor für das Lernpotential im schulischen Kontext eingesetzt werden.

Drei weitere interessante Aspekte ergeben sich abschließend aus den gefundenen Zusammenhängen der Ergebnismaße (vgl. Korrelationsmatrix im Anhang B):

(a) Der Vergleich des Zusammenhangs zwischen Strategiewahl beim Test der kognitiven Flexibilität und kognitiver Reserve in der Gesamtstichprobe sowie bei sportlich inaktiven Schülern zeigt, dass insbesondere bei letztgenannten eine Schnelligkeitsstrategie mit einer höheren kognitiven Reserve in Verbindung steht. Vor dem Hintergrund, dass Sportler tendenziell eine höhere kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit zeigen (Tabelle 7, S. 71, MRZ sowie RZ), darf angenommen werden, dass Nichtsportler, die schneller verarbeiten

können auch eine höhere kognitive Reserve haben. Sportliche Aktivität könnte hierfür eine hilfreiche Trainingsmethode darstellen.

(b) Wenn die sportlich inaktiven Schüler in dieser Studie einen hohen BMI haben, geht damit eine deutlich eingeschränkte kognitive Flexibilität einher. Resultiert dieser hohe BMI aus mangelnder Bewegung sowie ungesundem Ernährungsverhalten, kann ein sportlich aktiverer Lebensstil präventiv das Risiko von vaskulären Erkrankungen, Diabetes und Adipositas senken (Biddle, Gorely, & Stensel, 2004; Rowland, 2012), und darüber hinaus die kognitive Flexibilität verbessern (Davis, et al., 2007; Davis, et al., 2011). Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Studie I, neben den Befunden zur kognitiven Reserve, die Bedeutung der kognitiven Flexibilität im Schulkontext (Kubesch & Walk, 2009): Sowohl bei Sportlern als auch bei Nichtsportlern zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zur mathematischen Schulleistung.

(c) Des Weiteren bestätigt sich, was aufgrund der Ergebnisse aus Tierstudien bereits angenommen werden konnte: Der Umfang der sportlichen Aktivität hat Einfluss auf die Kognition und hier die exekutiven Teilleistungen. Es zeigte sich, dass Sportler mit einem größeren Trainingsumfang pro Woche signifikant bessere Inhibitionsleistungen realisierten (vgl. Neeper, et al., 1995). Dieses Ergebnis verdeutlicht erneut, wie berechtigt die von Hillman und Schott (2013) formulierte Forderung nach „vergleichende[n] Studien während verschiedener Phasen der Entwicklung [...]ist], um das Potential für die differentiellen Effekte von Fitness auf die kognitive Entwicklung zu bestimmen“ (S.39).

Ergänzende Analyse:

Die Charakteristik des Erhebungsverfahrens der kognitiven Reserve (ZST) erfordert die Aufrechterhaltung sowohl der Leistungsfähigkeit aber auch einer hohen Leistungsbereitschaft über einen längeren Zeitraum. Dabei dürften motivationale und selbstregulatorische Aspekte insbesondere bei adoleszenten Schulkindern Einfluss auf die Testleistung haben. Dies verdeutlichten die Kommentare von einigen Probanden aus beiden Untersuchungsgruppen während und nach der Durchführung des ZST nachhaltig.

Ergänzend wird deshalb mit einem von Zihl et al. (2014) vorgeschlagenen Berechnungsverfahren die Konsistenz der Übungsgewinne zwischen den untersuchten Gruppen über den Testverlauf hinweg verglichen. Ziel dabei ist es, herauszufinden ob intraindividuelle Differenzen bezüglich der Kontinuität des Leistungszuwachses weitere Hinweise auf das

Zustandekommen der Unterschiede bei der kognitiven Reserve aufzeigen. Dafür wird die Häufigkeit der Durchgänge mit einer, im Vergleich zum vorherigen Durchgang, verminderten Leistung erhoben und verglichen. Es zeigte sich ein signifikanter Gruppenunterschied, $F(1, 113) = 8.65, p < .01, \eta^2 = .07$: Die sportlich aktiven Schüler ($M = 2.25, SD = 1.22$) zeigten unabhängig von Geschlecht, Schulart und Sportjahren eine klar höhere Kontinuität beim Leistungszuwachs als die inaktiven Schüler ($M = 3.12, SD = 1.42$), was bedeutet, dass jeder sportlich aktive Schüler im Durchschnitt etwa einen Durchgang mit reduzierter Leistung weniger zeigt. Eine mögliche Interpretation dieser Ergebnisse ist, dass körperlich-sportliche Aktivität auch zu Unterschieden im Bereich der volitiven Fähigkeiten führt, die wiederum relevant für das Ausmaß der kognitiven Reservekapazität sind. Sportliche Schüler hätten demzufolge größere Ressourcen bezüglich ihrer Selbstregulation, zeigen infolge geringere Selbsterschöpfung (engl.: ego depletion) und bewältigen so herausfordernde Situationen volitiv besser als ihre sportlich inaktiven Mitschüler (vgl. Baumeister, Bratslavsky, Muraven, & Tice, 1998; Hagger, et al., 2010; Muraven & Baumeister, 2000).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Abschließend ist festzustellen, dass sich anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie I ein deutlicher und schulartunabhängiger Unterschied bei der kognitiven Reserve zugunsten der sportlich aktiven adoleszenten Schulkinder zeigt. Vor dem Hintergrund der dargestellten neurobiologischen Wirkmechanismen liegt es nahe, diesen Unterschied kausal durch den großen Gruppenunterschied bezüglich der Bewegungsaktivität zu erklären. Dies gilt es in weiteren Untersuchungen zu überprüfen. Weiter ist zu klären inwieweit selbstregulatorische Aspekte im Zusammenhang mit dem Konzept der kognitiven Reserve eine Rolle spielen und berücksichtigt werden müssen. Der Leistungsunterschied bei der kognitiven Reserve findet keine Entsprechung bei den exekutiven Funktionen. Dort unterscheiden sich die beiden Gruppen mit unterschiedlicher körperlicher Aktivität nicht. Allerdings sollte bei zukünftigen Studien die neuropsychologische Diagnostik der exekutiven Funktionen mit einem Verfahren zur Erfassung der Arbeitsgedächtnisleistung erweitert werden. Insgesamt legen die Ergebnisse dieser ersten Studie den Schluss nahe, dass körperliche Bewegung ein wichtiger Faktor für die kognitive Reserve zu sein scheint und dies alltagsrelevant für herausfordernde Anpassungsleistungen in der Adoleszenz ist.

6 Studie II: Höheres Erwachsenenalter

Empirisch betrachtet geht Altern unausweichlich mit kognitivem Abbau einher. Aus inter- und auch intraindividuelle Perspektive ist das Ausmaß und Tempo dieses Abbaus jedoch höchst unterschiedlich. Für den Einzelnen bedeutet erfolgreiches Altern, dass erforderliche Adaptationsprozesse an notwendige Veränderungen hinreichend gut gelingen, um Lebensqualität lange aufrechtzuerhalten. Für diese Prozesse ist es entscheidend, eine günstige Relation zwischen Anforderungen und Ressourcen zu erhalten. Körperlich-sportliche Aktivität leistet nachgewiesenermaßen einen positiven Beitrag zum Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter. Inwieweit dies auch für die kognitive Reserve gilt – einer solchen Ressource für den Erhalt der Anpassungsfähigkeit im Alter – untersucht diese Studie.

6.1 Untersuchungsdesign

Die Klärung der Fragestellung erfolgte schrittweise. Zunächst wurde bei gesunden, körperlich aktiven Erwachsenen im Alter von 60 Jahren und älter eine Datenerhebung zu einem Messzeitpunkt durchgeführt. Als Vergleichsgruppe diente die ältere Probandenstichprobe der Studie von Emmert (2010). Die im Anschluß detailliert beschriebenen Messinstrumente (6.2) und der Ablauf (6.3) waren eng an die Studie von Emmert angelehnt, um die Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen. In einem zweiten Schritt erfolgte die Aufteilung der körperlich-aktiven Erwachsenen in drei Altersgruppen, um Aussagen zu altersabhängigen Veränderungen machen zu können.

6.2 Messinstrumente

6.2.1 Kognitive Reserve

Die Messung der kognitiven Reserve erfolgte entsprechend der Studie I mit Hilfe des gleichen Testverfahrens, dem modifizierten Zahlen-Symbol-Test (ZST), um einen „*Testing-the-limits*“-Ansatz (Kliegl, et al., 1989) im Rahmen eines Retest-Paradigmas (Yang, et al., 2006; Yang, et al., 2009) zu realisieren. Die individuelle Reservekapazität entspricht, analog zu Studie I, dem Übungsgewinn über die jeweils zehn Testwiederholungen (vgl. 5.2.1).

6.2.2 Exekutive Funktionen: zusätzliche Verfahren

Neben der kognitiven Reserve besitzen auch in der vorliegenden Seniorenstudie die exekutiven Funktionen eine wichtige Bedeutung. Aus Gründen der Belastungskontrolle wurde für die älteren Teilnehmer im Bereich der Inhibition der zeitlich anspruchsvolle Inhibitionstest des WTS (Inhib) durch den Go/NoGo-Test aus der TAP ersetzt. Die zwei bereits aus den Jugendstudien bekannten Verfahren aus dem Bereich der Interferenz („Farb-Wort-Test“, vgl. 5.2.2.2) und der kognitiven Flexibilität („Flexibilität“, vgl. 5.2.2.3) wurden um ein Verfahren für den Bereich des Arbeitsgedächtnisses ergänzt (Auditive Zahlenspannen, WMS-R, Härting et al., 2000). Instruktion, Durchführung sowie Auswertung der Tests erfolgte gemäß den Vorgaben des jeweiligen Testmanuals.

6.2.2.1 Inhibition: Go/Nogo (TAP)

Der Go/Nogo-Untertest der TAP prüft die Fähigkeit, unter Zeitdruck einen inadäquaten Verhaltensimpuls zu unterdrücken, um eine adäquate Reaktion ausführen zu können. Zur Prüfung der Verhaltenskontrolle wurde die Durchführungsvariante mit einem kritischen von zwei Reizen gewählt. Diese zwei Reize lösen unmittelbar den notwendigen Reaktionsimpuls aus (Zimmermann & Fimm, 2009). Den Versuchsteilnehmern wurden 40 Reize jeweils 200ms lang gezeigt: 20 kritische Reize „X“ und 20 nicht-kritische Reize. Ihre Aufgabe war es möglichst schnell und nur bei kritischen Reizen zu reagieren. Ergebnismaße zur Beurteilung der Reaktionskontrolle waren die Anzahl der Fehlerreaktionen sowie der Median der Reaktionszeiten: Je geringer die Fehleranzahl und je schneller die Reaktionszeiten, desto besser ist die Fähigkeit, inadäquate Verhaltensimpulse zu unterdrücken.

6.2.2.2 Arbeitsgedächtnis: Auditive Zahlenspannen (WMS-R)

Im Rahmen des Untertests „Auditive Zahlenspannen“ des Wechsler Gedächtnistests (WMS-R) von Härting et al. (2000) werden den Probanden Ziffernfolgen mit ansteigender Länge vorgelesen, die im unmittelbaren Anschluss wiederzugeben sind. Pro Länge bekommt der Teilnehmer jeweils zwei unterschiedliche Zahlenreihen dargeboten, von denen er mindestens eine Länge korrekt wiedergeben muss. Das Verfahren unterteilt sich in zwei Subtests, bei denen im ersten Teil Zahlenreihen von 3 bis maximal 8 Ziffern unverändert (Zahlenspanne vorwärts), im zweiten Teil Zahlenreihen von 2 bis maximal 7

Ziffern in umgekehrter Reihenfolge (Zahlenspanne rückwärts) reproduziert werden müssen. Die zwei Verfahren erfassen unterschiedliche Gedächtnisaspekte: Während die Leistungen in der Zahlenspanne vorwärts (ZSPv) als Maß für das Kurzzeitgedächtnis gilt, erhebt die Zahlenspanne rückwärts (ZSPr) die Fähigkeiten im Bereich Arbeitsgedächtnis (Lezak, 2004). Je höher der jeweils erreichte Punktwert, desto besser die Leistung im entsprechenden Gedächtnisaspekt.

6.2.3 Weitere kognitive Ergebnismaße

6.2.3.1 Fluide Intelligenz: Matrizen (WIE)

Dieser Untertest des Wechsler Intelligenztests für Erwachsene (Aster, et al., 2006) misst fluide Intelligenz und die visuelle Problemlösefähigkeit. Die 26 Testaufgaben in ansteigender Schwierigkeit lassen sich den vier verschiedenen Aufgabentypen „Analogiebildung“, „serielles Schlussfolgern“, „Klassifikationsaufgaben“ und „diskrete Mustervervollständigung“ zuordnen. Der Versuchsteilnehmer ist gefordert, das Konstruktionsprinzip einer Serie von geometrischen Mustern zu erkennen und mit einem der fünf angebotenen Lösungsmuster korrekt zu vervollständigen. Die Teilnehmer unterliegen keiner Zeitbeschränkung, der Test ist beendet, wenn 4 Aufgaben in Folge oder vier von fünf Aufgaben nicht korrekt beantwortet werden. Die Summe der korrekt gelösten Aufgaben wurde als Leistungsmaß für die fluide Intelligenz herangezogen.

6.2.3.2 Tonische Alertness (TAP)

Der hier verwendete „Alertness“-Test aus der TAP ist ein Verfahren zur Diagnostik der Aufmerksamkeitsaktivierung. Es werden sowohl die tonische als auch die phasische Komponente der Aufmerksamkeitsaktivierung bestimmt. Bei diesem Test erscheint im Zentrum des Bildschirms ein weißes Kreuz (visueller Reiz), auf dessen Erscheinen die Versuchsteilnehmer möglichst schnell mit einem Tastendruck reagieren sollen. Dieses Kreuz wird mit oder ohne vorhergehenden Warnton dargeboten (phasische Alertness versus tonische Alertness). Nach einem Übungsdurchgang durchlaufen die Probanden dann 4 Durchgänge mit jeweils 20 Reizdarbietungen, wobei der erste und vierte Durchgang ohne und der zweite und dritte Durchgang mit akustischem Warneiz vorab erfolgen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde nur die Leistung der tonischen Alertness als Ergebnismaß für die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit verwendet. Diese entspricht dem Median der einfachen Reaktionszeiten der Durchgänge 1 und 4 (die phasische Alertness entspricht der Reaktionszeitdifferenz zwischen den Durchgängen mit versus ohne akustischem Warnreiz). Je kürzer die Reaktionszeiten in den Durchgängen 1 und 4, desto besser die tonische Alertness und damit die kognitive Leistungsgeschwindigkeit.

6.2.3.3 Konzentrationsleistung: Selektive visuelle Aufmerksamkeit (d2)

Bei dem Aufmerksamkeits-Belastungs-Test (d2) von Brickenkamp (2002) geht es darum, konzentriert möglichst schnell Zielreize zwischen Distraktoren zu finden und durchzustreichen. Der Test besteht aus 14 Testzeilen mit jeweils 47 Stimuli. Diese setzen sich aus den Buchstaben „d“ und „p“ mit jeweils ein bis vier Strichen zusammen, die einzeln oder paarweise über und unter den Buchstaben angeordnet sein können. Durchzustreichende Zielreize sind alle Buchstaben „d“ mit zwei Strichen. Die Teilnehmer werden gebeten, in 20 Sekunden Bearbeitungszeit pro Zeile so schnell und genau wie möglich die Zielreize durchzustreichen. Der Konzentrationsleistungswert (KL-Wert) berechnet sich aus der Summe aller korrekt durchgestrichenen d's mit zwei Strichen abzüglich der Verwechslungsfehler. Der KL-Wert gilt als sehr verfälschungsresistent gegenüber instruktionswidrigem Verhalten und dient als Leistungsmaß für die selektive visuelle Aufmerksamkeit: Je höher der Wert, desto ausgeprägter die Konzentrationsleistung.

6.2.4 Physiologische Kennwerte

6.2.4.1 Kardiorespiratorische Fitness

Zur Abschätzung der kardiorespiratorischen Fitness wird, entsprechend des gängigen Maßes in der Forschung, die relative maximale Sauerstoffaufnahme ($r\text{VO}_2\text{max}$) verwendet. Dieser Wert gibt an, wie viele Milliliter Sauerstoff ein Mensch, bezogen auf das Körpergewicht, im Zustand der Ausbelastung maximal pro Minute verwerten kann (Wilmore, et al., 2008). Grundsätzlich kann die $r\text{VO}_2\text{max}$ auf folgende Arten ermittelt werden: (1) direkt: durch die ventilatorische Gasanalyse bei einer maximalen Ausbelastung in einem Stufentest oder (2) indirekt: (a) über die erzielte Belastungsdauer, Höchstbelastung und Herzfrequenz (HF) bei einer Belastungsergometrie oder (b) über die zum Zurücklegen einer bestimmten Strecke

(Gehen oder Laufen) benötigte Zeit (Maud & Foster, 2006; Whaley, Brubaker, Otto, & Armstrong, 2006). Sowohl die direkte als auch die indirekte Methode sind riskante Verfahren für Studienteilnehmer über 60 Jahren oder bieten keine bessere Vorhersagegüte der kardiorespiratorischen Fitness. Daher verwendet diese Studie das von Jurca et al. (2005) weiterentwickelte und von Mailey et al. (2010) an älteren Erwachsene validierte Nonexercise-Regressionsmodell, bei dem die kardiorespiratorische Fitness in metabolischen Äquivalenten ausgedrückt wird. Das metabolische Äquivalent (engl.: metabolic equivalent of task; MET) beschreibt den Stoffwechselumsatz eines Menschen im Verhältnis zu seinem Ruheumsatz und dem Körpergewicht. Es wird verwendet, um den Energieverbrauch verschiedener Aktivitäten vergleichen zu können. Ein MET entspricht den Sauerstoffkosten eines durchschnittlichen Menschen bei ruhigem Sitzen und wird für diese Studie mit $3.5 \text{ ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ festgelegt (Ainsworth et al., 1993). Die überwiegende Anzahl der Studien im Bereich der Sportwissenschaften akzeptieren diesen Wert als gemeinsamen Nenner (Ainsworth et al., 2011), obwohl die Passung insbesondere für Untergruppen der Population mit niedrigstem Aktivitätsniveau diskutiert wird (vgl. Byrne, 2005; Kozey, Lyden, Staudenmayer, & Freedson, 2010).

Die Abschätzung der MET-Werte nach Jurca et al. (2005, S.190) erfolgte mit folgender Formel: $\text{MET-Wert} = (\text{Geschlecht} \cdot 2.77) - (\text{Alter} \cdot 0.10) - (\text{Body-Mass-Index} \cdot 0.17) - (\text{Ruhepuls} \cdot 0.03) + \text{Aktivitätsscore} + 18.07$. In den ersten Term der Formel (Geschlecht) gehen Frauen mit dem Faktor 0, Männer mit dem Faktor 1 ein. Den Ruhepuls ermittelten die Studienteilnehmer selbstständig mit Hilfe einer genauen Anleitung an drei Tagen in Folge morgens nach dem Aufwachen. Der Mittelwert dieser drei Messungen wurde für obige Formel verwendet. Der Aktivitätsscore ergibt sich aus der selbstberichteten körperlichen Aktivität abgestuft in 5 Kategorien (übersetzter Fragebogen im Anhang C): 1) inaktiv/wenig Aktivität außer den normalen täglichen Aktivitäten (Aktivitätsscore: 0). 2) Leichte körperliche Aktivität mit niedrigem Anstrengungsgrad an mindestens fünf Tagen der Woche für mindestens 10 Minuten (Aktivitätsscore: 0.32). 3) Körperliche Aktivität mit mittlerem Anstrengungsgrad für 20 bis 60 Minuten pro Woche (Aktivitätsscore: 1.06). 4) Körperliche Aktivität mit mittlerem Anstrengungsgrad für 1 bis 3 Stunden pro Woche (Aktivitätsscore: 1.76). 5) Körperliche Aktivität mit mittlerem Anstrengungsgrad für mehr als 3 Stunden pro Woche (Aktivitätsscore: 3.03). Die so ermittelten MET-Werte können mit Hilfe des Faktors 3.5

direkt in $rVO_2\text{max}$ -Werte transformiert werden. Es gilt: Je höher die relative maximale Sauerstoffaufnahme ($rVO_2\text{max}$), desto besser die kardiorespiratorische Fitness des Probanden.

6.2.4.2 Lungenfunktion (PEF und FEV₁)

Beide Parameter der Lungenfunktion wurden mit dem digitalen Peak-Flow-Meter Asma-1 der Firma Vitalograph erhoben: Parameter 1, der Peak-Flow-Wert PEF (engl.: *Peak Expiratory Flow*), steht für den maximalen Atemstrom bei der Ausatmung, angegeben in Litern pro Minute. Parameter 2, die Einsekundenkapazität FEV₁ (engl.: *Forced Expiratory Volume in 1 second*), entspricht dem forcierten expirierten Luftvolumen in Litern der ersten Sekunde. Der beste von jeweils 3 Versuchen eines jeden Versuchsteilnehmers wurde ausgewertet. Für beide Parameter gilt: Je höher der Wert, desto leistungsfähiger die Lunge des Teilnehmers.

6.2.4.3 Greifkraft

Die Analyse der Greifkraft erfolgte mit einem Handdynamometer der Firma Gabotex. Unter Greifkraft versteht man die Kraft der Unterarmmuskulatur, die durch die Kraftmessung beim Faustschluss erhoben wird. Sie gilt als wichtiger Parameter der allgemeinen Kraftfähigkeiten (Kallman, Plato, & Tobin, 1990). Die Versuchsteilnehmer hatten die Aufgabe, den Dynamometer so stark wie möglich zusammenzudrücken. Jeder Proband absolvierte 3 Versuche mit seiner dominanten Hand, von denen der Maximalwert verwendet wurde. Je größer der gemessene Greifkraftwert, desto ausgeprägter die Kraftfähigkeiten der untersuchten Person.

6.2.5 Fragebogenmaße

6.2.5.1 Depressive Symptomatik (ADS-K)

Zur Erfassung einer möglichen depressiven Symptomatik bei den Studienteilnehmern wurde als Screening-Instrument die Kurzform der *Allgemeinen Depressionsskala* (ADS, Hautzinger, Bailer, Hofmeister, & Keller, 2012) mit 15 Items verwendet (ADS-K). Die ADS-K ist ein verbreitetes Selbstbeurteilungsinstrument, um Vorliegen und Schwere von depressiven Symptomen innerhalb der letzten Woche einschätzen zu können. Der Proband beurteilt 15 Aussagen auf einer vierstufigen Antwortskala (0 = selten bis 3 = meistens). Für

die Auswertung wird der Summenwert aller Antworten inklusive der umgepolten Items 9 und 12 als Kennwert der aktuellen depressiven Symptomatik interpretiert. Ein ADS-K-Summenwert von 18 oder mehr weist auf eine klinisch relevante depressive Störung hin (Hautzinger, et al., 2012). Zur Absicherung der Validität des ADS-K existiert ein sogenanntes Lügenkriterium: Wird der kritische Wert von -24 unterschritten (Summe der positiv gepolten Items abzüglich der 6,5fachen Summe der negativen Items) sollte von unglaublichen Fragebogenantworten ausgegangen werden.

6.2.5.2 Typisches intellektuelles Engagement (TIE)

Neben der Erfassung der fluiden Intelligenz über einen Leistungstest (vgl. 6.2.3.1) interessierte in der vorliegenden Arbeit die Motivation und Häufigkeit, mit der die Studienteilnehmer intellektuell herausfordernde Situationen aktiv aufsuchen. Hierfür wurde das Selbstberichtsverfahren „*Typisches intellektuelles Engagement*“ (TIE) mit insgesamt 18 Fragen für die drei Faktoren „Intellektuelle Neugier“, „Kontemplation“ und „Lesen“ von Wilhelm, Schulze, Schmiedek und Suss (2003) eingesetzt. Die Teilnehmer wurden gebeten, ihr typisches Verhalten auf einer 6-stufigen Likert-Skala einzuschätzen, deren Bereich von (1) „stimme überhaupt nicht zu“ bis (6) „stimme sehr zu“ reicht. Die drei Faktoren wurden jeweils getrennt und zusammengefasst ausgewertet. Je höher die erreichten Werte ausfielen, desto größeres Interesse zeigte der Teilnehmer an intellektuell herausfordernden Situationen.

6.2.5.3 Selbstbestimmtheit

In Anlehnung an das Verfahren von Sheldon und Kasser (1998) zur Beurteilung des Ausmaßes der Selbstbestimmtheit bei persönlichen Zielen, wurden die Studienteilnehmer gebeten, vier unterschiedliche Gründe für die Ausübung von Sport auf einer Skala von 1 „Keinesfalls aus diesem Grund“ bis 9 „Genau aus diesem Grund“ zu bewerten. Die vier vorgegebenen Gründe sind: (1 = external): „Ich betreibe Sport, weil jemand anderes (Partner, Arzt etc.) möchte, dass ich Sport treibe oder weil ich von jemand anderem Anerkennung oder Lob dafür bekomme.“ (2 = introjiziert): „Ich betreibe Sport, weil ich besorgt wäre, mich schlecht fühlen würde, wenn ich keinen Sport treiben würde. Ich sollte mich bemühen Sport zu treiben.“ (3 = überzeugt): „Ich betreibe Sport, weil ich Sport aus ganzem Herzen befürworte und es ein wichtiges Ziel für mich ist.“ (4 = intrinsisch): „Ich betreibe Sport, weil ich den Spaß und das Vergnügen dabei genieße.“ Diese vier Gründe

decken auf einem Kontinuum den Bereich von external (nicht-selbstbestimmt, kontrolliert) bis hin zu intrinsisch (selbstbestimmt, selbstständig) ab. Nach Sheldon und Kasser (1998, S. 1322) errechnet sich das Selbstbestimmtheitsmaß wie folgt: Nach Verdoppelung der zwei Skalenextremwerte „external“ und „intrinsisch“ werden die angegebenen externalen und introjizierten Werte von der Summe der überzeugten und intrinsischen Werte abgezogen. Der Wertebereich des Selbstbestimmtheitsmaßes liegt folglich zwischen - 24 und + 24. Je größer dieser Wert, desto höher ist das Ausmaß an Selbstbestimmtheit, Selbstständigkeit und intrinsischer Motivation bei der Sportausübung des Versuchsteilnehmers.

6.2.5.4 Lebenszufriedenheit (FTL)

Die globale Lebenszufriedenheit der Studienteilnehmer setzt sich aus deren kognitiver Bewertung der retrospektiven, aktuellen und prospektiven persönlichen Lebenssituation zusammen. Sie wurde mit dem Fragebogen zur temporalen Lebenszufriedenheit (FTL) von Trautwein (2004) erfasst, einer deutschen Adaptation der *Temporal Satisfaction with Life Scale* (Pavot, Diener, & Suh, 1998). Mit Hilfe von jeweils vier Fragen für die drei unterschiedlichen Zeitbereiche schätzten die Teilnehmer auf einer 4-stufigen Likert-Skala von (1) „trifft überhaupt nicht zu“ bis (4) „trifft völlig zu“ ihre Lebenszufriedenheit ein. Je höher der Wert, desto zufriedener beurteilen die Teilnehmer ihr Leben.

6.2.5.5 Persönlichkeit (BFI-K)

Um im Rahmen der vorliegenden Untersuchung Aussagen über mögliche Zusammenhänge zwischen der Persönlichkeitsstruktur und kognitiven Ergebnismaßen der Probanden machen zu können, füllten die Teilnehmer die Kurzversion des *Big Five Inventory* (BFI-K) von Rammstedt und John (2005) aus. Dieser theoretisch auf dem Fünf-Faktoren-Modell der Persönlichkeit begründete Kurzfragebogen setzt sich aus 21 Fragen zu den Bereichen Neurotizismus, Extraversion, Offenheit für neue Erfahrungen, Verträglichkeit und Gewissenhaftigkeit zusammen. Alle Faktoren werden aus jeweils vier Fragen berechnet, nur der Bereich „Offenheit“ wird mit fünf Fragen erfasst. Auf einer 5-stufigen Likert-Skala von (1) „sehr unzutreffend“ bis (5) „sehr treffend“ repräsentieren hohe Werte eine hohe Ausprägung in der jeweiligen Dimension.

6.3 Teilnehmer und Ablauf

6.3.1 Teilnehmer Sportlergruppe

Die ursprüngliche Stichprobe der körperlich aktiven älteren Erwachsenen (Sportler) bestand aus 62 Personen, von denen 2 Interessenten aufgrund des Verdachtes einer depressiven Symptomatik sowie dem Fehlen jeglicher sportlicher Aktivität von der statistischen Datenauswertung ausgeschlossen werden mussten. Somit umfasste die endgültige Stichprobe 60 Probanden des Altersbereiches von 60 bis 82 Jahren ($M = 67.13$, $SD = 5.67$). Soziodemografische Charakteristika sowie weitere deskriptive Daten der Sportler sind den Tabellen 11 und 12 zu entnehmen.

Tabelle 11

Soziodemografische Charakteristika der Sportlergruppe. Darstellung als Mittelwerte (Standardabweichung) oder prozentuale (absolute) Häufigkeiten

Variablen		Frauen (n = 33)	Männer (n = 27)	gesamt (n = 60)
Alter (Jahre)		65.91 (4.81)	68.63 (6.34)	67.13 (5.67)
Bildungsjahre		11.36 (3.31)	14.96 (4.10)	12.98 (4.07)
Schulabschluss	<i>Volks-/Hauptschule</i>	27.3 (9)	18.5 (5)	23.3 (14)
	<i>Realschule</i>	48.5 (16)	25.9 (7)	38.3 (23)
	<i>Fachabitur</i>	6.1 (2)	3.7 (1)	5.0 (3)
	<i>Abitur</i>	18.2 (6)	51.9 (14)	33.3 (20)
Berufsausbildung	<i>Keine Ausbildung</i>	12.1 (4)	- (0)	6.7 (4)
	<i>Ausbildung</i>	72.7 (24)	44.4 (12)	60.0 (36)
	<i>Fachhochschulstudium</i>	3.0 (1)	18.5 (5)	10.0 (6)
	<i>Hochschulstudium</i>	12.1 (4)	37.0 (10)	23.3 (14)
Ruhestand		72.7 (24)	81.5 (22)	76.7 (46)
seit (Jahren)		6.83 (4.02)	6.23 (5.06)	6.54 (4.51)
Einkommen / Monat (€)	< 500	9.1 (3)	3.7 (1)	6.7 (4)
	500-999	27.3 (9)	7.4 (2)	18.3 (11)
	1000-1499	18.2 (6)	3.7 (1)	11.7 (7)
	1500-1999	18.2 (6)	7.4 (2)	13.3 (8)
	2000-2999	18.2 (6)	25.9 (7)	21.7 (13)
	3000-3999	6.1 (2)	22.2 (6)	13.3 (8)
	> 4000	3.0 (1)	29.6 (8)	15.0 (9)
Depression ^a		6.48 (5.08)	4.56 (3.83)	5.62 (4.62)
PR		<40	<27	<34
Medikation (regelmäßig)		48.5 (16)	55.6 (15)	51.7 (31)
Raucher		12.12 (4)	14.81 (4)	13.33 (8)

Anmerkung. PR = Prozentrang. ^aAllgemeinen Depressionsskala Kurzform (ADS, Hautzinger, et al., 2012).

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte durch Aushang, Informationsbroschüren und Informationsvortrag in der Sportschule Fürstenfeldbruck, zwei Zeitungsinseraten im Lokalteil des Münchner Merkurs für den Landkreis Fürstenfeldbruck (Fürstenfeldbrucker Tagblatt) sowie durch eine Kampagne auf der Internetseite der Industrie- und Handelskammer für München und Oberbayern (<http://www.muenchen.ihk.de>).

Tabelle 12

Weitere deskriptive Daten der Sportlergruppe. Darstellung als Mittelwerte (Standardabweichung) oder prozentuale (absolute) Häufigkeiten

Variablen		Frauen (n = 33)	Männer (n = 27)	Gesamt (n = 60)
Körperliche Aktivität (Aktivitätskategorie)	wenig/keine Aktivität (1)	- (0)	3.7 (1)	1.7 (1)
	Leichte Aktivität (2)	9.1 (3)	7.4 (2)	8.3 (5)
	20-60 min/Wo (3)	9.1 (3)	22.2 (6)	15.0 (9)
	60-180 min/Wo (4)	30.3 (10)	33.3 (9)	31.7 (19)
	> 180 min/Wo (5)	51.5 (17)	33.3 (9)	43.3 (26)
Sport im Lebenslauf	Lebenslanger Sportler	63.6 (21)	63.0 (17)	63.3 (38)
	davon Geleitetssport	12.1 (4)	25.9 (7)	18.3 (11)
	Wiedereinsteiger nach (Jahren)	24.2 (8)	11.1 (3)	18.3 (11)
BMI (Kg/m ²)		20.75 (13.71)	29.00 (13.53)	23.00 (13.53)
rVO ₂ max (ml/kg/min)		24.27 (2.38)	25.28 (2.95)	24.72 (2.68)
		26.78 (4.13)	33.91 (5.18)	29.99 (5.82)

Anmerkung. BMI = Body-Mass-Index. rVO₂max = relative maximale Sauerstoffaufnahme.

Um Aussagen zu altersbedingten Veränderungen treffen zu können, wurde die Sportlergruppe in drei numerisch vergleichbare Altersgruppen aufgeteilt: Sportler 1 mit 20 Personen (12 Frauen, 8 Männer) im Alter von 60 bis 63 Jahren ($M = 61.00$, $SD = 1.21$), Sportler 2 mit 19 Personen (12 Frauen, 7 Männer) im Alter von 64 bis 69 Jahren ($M = 66.37$, $SD = 1.42$) sowie Sportler 3 mit 21 Personen (9 Frauen, 12 Männer) im Alter von 70 bis 82 Jahren ($M = 73.67$, $SD = 2.92$). Tabelle 13 auf der nächsten Seite zeigt soziodemografische Charakteristika und deskriptive Daten der drei Teilstichproben.

6.3.2 Teilnehmer Vergleichsgruppe

Als Vergleichsgruppe fungierten 140 gesunde Personen im Altersbereich von 57 bis 75 Jahren (66 Frauen und 74 Männer) der Studie von Zihl et al. (2014). Diese Vergleichsgruppe mit einem durchschnittlichen Alter von 67.27 Jahren ($SD = 4.16$) wurde von Zihl et al. aus dem Seniorenstudiumprogramm der Ludwig-Maximilians-Universität München

akquiriert, wodurch das Interesse an regelmäßiger kognitiver Aktivität sichergestellt wurde. 121 Mitglieder der Vergleichsgruppe besaßen einen Universitätsabschluss, alle restlichen Teilnehmer die Hochschulreife (Abitur). Bei dieser Vergleichsgruppe wurden keine Daten zu sportlicher Aktivität erhoben.

Tabelle 13

Soziodemografische Charakteristika und deskriptive Daten der Sportlerteilstichproben.

Darstellung als Mittelwerte (Standardabweichung) oder prozentuale (absolute) Häufigkeiten

Variablen		Sportler 1 (n = 20)	Sportler 2 (n = 19)	Sportler 3 (n = 21)
Alter (Jahre)		61.00 (1.21)	66.37 (1.42)	73.67 (2.92)
Frauen (12 / 12 / 9)		60.67 (0.98)	66.58 (1.62)	72.00 (2.00)
Männer (8 / 7 / 12)		61.50 (1.41)	66.00 (1.00)	74.92 (2.94)
Bildungsjahre		12.35 (3.88)	13.74 (4.24)	12.90 (4.18)
Schulabschluss	<i>Volks-/Hauptschule</i>	20.0 (4)	21.0 (4)	28.6 (6)
	<i>Realschule</i>	45.0 (9)	31.6 (6)	38.1 (8)
	<i>Fachabitur</i>	10.0 (2)	5.3 (1)	- (0)
	<i>Abitur</i>	25.0 (5)	42.1 (8)	33.3 (7)
Berufsausbildung	<i>Keine Ausbildung</i>	5.0 (1)	10.5 (2)	4.8 (1)
	<i>Ausbildung</i>	75.0 (15)	42.1 (8)	61.9 (13)
	<i>Fachhochschulstudium</i>	5.0 (1)	10.5 (2)	14.3 (3)
	<i>Hochschulstudium</i>	15.0 (3)	36.9 (7)	19.0 (4)
Ruhestand		35.0 (7)	100.0 (19)	95.2 (20)
seit (Jahren)		2.57 (1.40)	4.05 (2.91)	10.30 (3.54)
Einkommen / Monat (€)	< 500	10.0 (2)	10.5 (2)	- (0)
	500-999	15.0 (3)	21.0 (4)	19.0 (4)
	1000-1499	15.0 (3)	5.3 (1)	14.3 (3)
	1500-1999	20.0 (4)	5.3 (1)	14.3 (3)
	2000-2999	15.0 (3)	26.3 (5)	23.8 (5)
	3000-3999	- (0)	15.8 (3)	23.8 (5)
	> 4000	25.0 (5)	15.8 (3)	4.8 (1)
Depression ^a		5.20 (4.89)	5.05 (3.91)	6.52 (5.02)
Medikation (regelmäßig)		60.0 (12)	31.6 (6)	61.9 (13)
Raucher		20.0 (4)	5.3 (1)	14.3 (3)

Anmerkung. ^aAllgemeinen Depressionsskala Kurzform (ADS, Hautzinger, et al., 2012).

6.3.3 Untersuchungsablauf

Alle interessierten Teilnehmer beider Stichproben wurden in einem telefonischen Interview vorab, sowie nochmals unmittelbar vor der Testdurchführung hinsichtlich ihrer möglichen Gesundheitsprobleme überprüft um die Einhaltung der definierten Ein- und

Ausschlusskriterien sicherzustellen: Die Teilnehmer hatten ausnahmslos gute bis sehr gute oder entsprechend korrigierte Seh- und Hörfähigkeiten. Eine mögliche depressive Symptomatik wurde ausgeschlossen (Ergebnisse in Tabelle 11). Akute Erkrankungen am Testtag, weiter bestehende oder vergangene neurologische Vorerkrankungen sowie die Einnahme von Medikamenten und chronische Erkrankungen mit möglichem negativem Einfluss auf die Kognition führten zum Ausschluss des Teilnehmers. Interessenten mit Diabetes mellitus, hohem Blutdruck oder Schilddrüsenproblemen wurden als Probanden dann akzeptiert, wenn sie adäquat medikamentös eingestellt waren. Die Teilnahme an der Studie war freiwillig. Alle Teilnehmer der Sportlerstichprobe erhielten nach der Datenerhebung als Entschädigung für ihren Zeitaufwand eine schriftliche Kurzauswertung ihrer kognitiven und körperlichen Leistungsfähigkeit, die Teilnehmer der Vergleichsgruppe wurden mit 30 Euro und einem mündlichen Feedback zu ihren Testergebnissen entlohnt (vgl. Emmert, 2010; Zihl, et al., 2014).

Der Ablauf der Datenerhebung der Sportgruppe wurde sowohl inhaltlich als auch zeitlich eng an die Untersuchung von Zihl et al. (2014, S.2) angelehnt, um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten. Potentielle Studienteilnehmer der Sportlerstichprobe wurden zwischen Mai 2012 und Februar 2013 telefonisch kontaktiert, um die definierten Ausschlusskriterien (vgl. oben) zu überprüfen, einen persönlichen Code zur Anonymisierung der Daten zu erzeugen, den Termin für die Testung zu vereinbaren und Hinweise zum Ausfüllen der Datenblätter zu geben. Alle Unterlagen wurden bereits vor dem Versenden an die Teilnehmer mit dem jeweiligen persönlichen Code verschlüsselt. Die eigentlichen Untersuchungen fanden 1 bis 2 Wochen später als Einzelsitzungen in den Räumen der privaten Sportschule Fürstenfeldbruck bzw. des Lehrstuhls für Sportpsychologie der Technischen Universität München statt und dauerten pro Teilnehmer etwa zweieinhalb Stunden. Die Testungen wurden von einem Psychologen und zwei mit den Testverfahren vertrauten studentischen Hilfskräften durchgeführt, die vorab nochmals sorgfältig in die Messinstrumente eingearbeitet wurden. Alle Probanden bestätigten schriftlich ihre freiwillige Studienteilnahme und unterschrieben eine Erlaubnis zur wissenschaftlichen Nutzung ihrer anonymisierten Daten. Zu Beginn des standardisierten Untersuchungstermins überprüfte der Untersuchungsleiter zusammen mit dem Teilnehmer die Vollständigkeit und Richtigkeit der ausgefüllten Unterlagen, bestehend aus dem ADS-K (zusätzliches Ausschlusskriterium), den „Allgemeinen Daten“ incl. der Selbstbestimmtheit bei sportlicher Aktivität (vgl. Anhang D), dem TIE, dem BFI-K, dem FTL und den Ruhepulsdaten.

Die eigentliche Testung gliederte sich in 4 Blöcke von jeweils etwa 30 Minuten Dauer mit unterschiedlich langen Pausen.

Untersuchungsablauf:

- Block 1: TAP „Alertness“ (6.2.3.2), „Go/NoGo“ (6.2.2.1), „Arbeitsgedächtnis“ (keine Datenauswertung für diese Studie) sowie „Flexibilität“ (5.2.2.3).
– 5 Minuten Pause –
- Block 2: Greifkraft (6.2.4.3), Lungenfunktionsmaße (6.2.4.2) sowie ein zweiter Test zur Ermittlung der kognitiven Reserve, dessen Daten in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden, der aber durchgeführt werden musste um einen vergleichbaren Untersuchungsablauf mit Emmert (2010) sicherzustellen.
– 15 Minuten Pause –
- Block 3: Selektive visuelle Aufmerksamkeit (6.1.3.3), Arbeitsgedächtnis (6.2.2.2), sowie fluide Intelligenz (6.2.3.1).
– 5 Minuten Pause
- Block 4: ZST (6.2.1 bzw. 5.2.1), das zentrale Verfahren zur Ermittlung der kognitiven Reserve in dieser Studie.

6.4 Hypothesen

Entsprechend den Forschungsbefunden bei Kindern und Jugendlichen zeigen zunehmend aktuelle Studien den positiven Einfluss von Bewegung auf die kognitive Leistungsfähigkeit im Alter (u.a. Erickson, et al., 2009; Voss, et al., 2013; Weinstein, et al., 2012). Deshalb wird erwartet, dass sportlich aktive ältere Erwachsene auch Vorteile bezüglich der kognitiven Reserve haben. Nachfolgend die Hypothesen dieser Studie.

6.4.1 Hypothese 4: Sportler- und Vergleichsgruppe

- Hypothese 4a: Sportlich aktive ältere Erwachsene realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn im ZST, verglichen mit nicht explizit sporttreibenden Gleichaltrigen.

Weitere kognitive Parameter wurden erhoben, um bei diesen auch Unterschiede zwischen den körperlich aktiven älteren Erwachsenen und der Vergleichsgruppe untersuchen zu können.

- Hypothese 4b: Sportlich aktive ältere Erwachsene zeigen eine signifikant bessere Arbeitsgedächtnis- und Konzentrationsleistung sowie höhere kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit als die gleichaltrige Vergleichsgruppe.

6.4.2 Hypothese 5: Sportlergruppen im Altersvergleich

Im zweiten Teil der Studie wurde die Gesamtstichprobe der Sportler in drei Altersgruppen aufgeteilt und auf Unterschiede bezüglich dreier kognitiver Bereiche analysiert.

- Hypothese 5a: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich signifikant hinsichtlich ihrer kognitiven Reserve.

Auch im Bereich der exekutiven Funktionen (Hypothese 5b) und weiterer kognitiver Parameter (Hypothese 5c), die explorativ für die Untersuchung des Zusammenhangs mit der kognitiven Reserve erhoben wurden, wird ein altersbedingter Abbau erwartet.

- Hypothese 5b: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der Inhibition, Interferenz, kognitiven Flexibilität und des Arbeitsgedächtnisses.
- Hypothese 5c: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit, Aufmerksamkeitsaktivierung sowie Konzentrationsleistung.

6.5 Ergebnisse

6.5.1 Hinweise zur Datenauswertung

Für die Aufbereitung, Auswertung und statistische Analyse der Daten wurden analog zu Studie I Microsoft[®] Excel 2010 sowie IBM[®] SPSS[®] Statistics 21 für Windows[®] verwendet.

Für die Analyse von Sportler- und Vergleichsgruppe erfolgten neben der Bestimmung der deskriptiven Maße Mittelwertvergleiche mittels t-Tests für eine Stichprobe. Dabei wurde Cohen's d als Maß für die Effektstärke angegeben. Um Gruppenvergleiche und Hypothesenprüfungen bei den Sportlergruppen inferenzstatistisch überprüfen zu können, kamen abhängig von der zu beantwortenden Fragestellung univariate Varianzanalysen ohne und mit Messwiederholung zum Einsatz. Als Effektstärkemaß bei diesen Analysen wurde das partielle Eta-Quadrat angegeben. Korrelationsberechnungen wurden mit dem Koeffizienten nach Pearson ermittelt. Die Voraussetzungen für alle eingesetzten Verfahren waren erfüllt. Einzelne Ausnahmen sind wiederum explizit angegeben.

6.5.2 Sportler- und Vergleichsgruppe

In den beiden folgenden Abschnitten (6.5.2 und 6.5.3) werden vor den eigentlichen Ergebnissen relevante Kontrollvariablen dargestellt.

6.5.2.1 Kontrollvariable: Körperlich-sportliche Aktivität

Um die körperlich-sportliche Aktivität der Sportlergruppe validieren zu können, wurden die kardiorespiratorische Fitness, als entscheidender Parameter (6.2.4.1), sowie zusätzlich zwei Lungenfunktionsparameter (6.2.4.2) und die Greifkraft (6.2.4.3) erhoben.

Tabelle 14 fasst, getrennt nach Geschlecht und Altersgruppen, die deskriptive Statistik und die Mittelwertvergleiche der physiologischen Kennwerte zusammen. Bezogen auf die Normwerte von Shvartz und Reibold (1990) wurden bei allen drei Altersgruppen beiderlei Geschlechts wie erwartet durchgehend sehr gute Werte für die relative maximale Sauerstoffaufnahme und damit aerober Fitness festgestellt. Diese reduzierte sich auch von den jüngeren Sportlern der Gruppe 1 bis hin zu den ältesten Sportlern der Gruppe 3 weder bei den Frauen noch bei den Männern signifikant. Sportliches Engagement kann bei diesen Werten als gegeben angenommen werden.

Bei den Lungenfunktionsparametern wurden im Vergleich zu den Normwerten bei allen Sportlergruppen über alle Altersbereiche hinweg überdurchschnittliche Werte gemessen (vgl. European Respiratory Society, 1993). Die einzige Ausnahme bildete nur die Einsekundenkapazität der ältesten männlichen Sportler. Der Gruppenunterschied beim Peak-

Flow-Wert (PEF) war sowohl bei den Frauen als auch bei den Männern nicht signifikant. Im Gegensatz dazu zeigten die Männer bei der Einsekundenkapazität (FEV₁) einen signifikanten Leistungsabfall, $F(2, 23) = 4.32, p < .05, \eta_p^2 = .27$, aufgrund des Abfalls bei der männlichen Sportlergruppe 3 ($p < .05$). Bei beiden Analysen wurde die Körpergröße kontrolliert.

Tabelle 14

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche physiologischer Kennwerte der Sportlergruppe getrennt nach Altersklassen und Geschlecht

Variable	Sportler 1 60 – 63 Jahre (n = 20)		Sportler 2 64 – 69 Jahre (n = 19)		Sportler 3 70 und älter (n = 21)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
Frauen	n=12		n=12		n=9			
rVO2max	28.60	4.42	25.89	3.78	25.55	3.72	1.96	.12
PEF	372.17	66.88	360.50	94.30	371.78	63.04	.02	.00
FEV ₁	2.35	.42	2.28	.32	2.21	.37	.55	.04
GK	24.88	4.11	26.88	2.09	26.94	4.30	1.05	.07
Männer	n=8		n=7		n=12			
rVO2max	35.81	5.95	35.87	4.68	31.50	4.18	2.64	.18
PEF	542.13	191.24	616.00	22.89	515.92	154.19	1.06	.09
FEV ₁	3.20	.96	3.58	.36	2.77	.65	4.32*	.27
GK	40.38	4.67	38.21	1.93	32.29	4.90	9.78**	.37

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). rVO2max = relative maximale Sauerstoffaufnahme. PEF= Peak-Flow-Wert (Liter/Minute). FEV₁ = Einsekundenkapazität (Liter). GK = Greifkraft (kg).

Beim Vergleich der Greifkraft fiel auf, dass die Frauen keinen signifikanten Abfall über die Altersgruppen zeigten. Im Gegensatz dazu verringerte sich die Greifkraft der Männer beim paarweisen Vergleich signifikant von der jüngsten zur ältesten Gruppe, $F(2, 23) = 9.78, p < .01, \eta_p^2 = .37$. Auch hier wurde das Körpergewicht kontrolliert, welches als Kovariate weder bei den Frauen noch bei den Männern signifikant war. Setzt man die gefundenen Werte in Relation zu Normwerten der Greifkraft, erreichten die Sportlerinnen der Gruppen 2 und 3 klar überdurchschnittliche Greifkraftwerte, während alle anderen Ergebnisse durchschnittlich blieben (Mathiowetz et al., 1985).

Insgesamt deuten die Daten darauf hin, dass die Studienteilnehmer beiderlei Geschlechts ihre körperliche Fitness aufgrund physischer Aktivität verhältnismäßig gut im Altersverlauf aufrechterhalten konnten.

6.5.2.2 Weitere relevante Kontrollvariablen

Alle deskriptiven Daten sowie Mittelwertvergleiche des Alters, der fluiden Intelligenz und der Bildung von Sportler- und Vergleichsgruppe sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportler- und Vergleichsgruppe für Alter, fluide Intelligenz, Bildung und Depression

Variable	Sportler (n = 60)			Vergleichsgruppe (n = 140)			<i>t</i>	<i>d</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	Bereich	<i>M</i>	<i>SD</i>	Bereich		
Alter	67.13	5.67	60-82	67.27	4.16	57-75	-.19	.02
Fluide Intelligenz	17.30	4.49	6-24	16.88	4.45	6-24	.72	.08
PR	82			81				
Bildungsjahre	12.98	4.07	9-18	17.58	2.00	13-21	-8.74***	1.31
ADS-K	5.62	4.62	0-19					
BDI-II				4.61	4.36	0-18		

Anmerkungen. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. *d* = Effektstärke (Cohen). PR = Prozentrang. Fluide Intelligenz: Matrizen. ADS-K = Kurzform der Allgemeinen Depressionsskala (Hautzinger, et al., 2012). BDI-II = Beck Depressions-Inventar (Hautzinger, Kühner, & Keller, 2006).

Die Sportlergruppe unterschied sich weder in ihrem Alter, noch bezüglich des Geschlechterverhältnisses oder ihrer fluiden Intelligenz signifikant von der Vergleichsgruppe. Das Intelligenzniveau kann insgesamt als sehr hoch eingeschätzt werden (Prozentrang 82 und 81). Das Bildungsniveau der Vergleichsgruppe war signifikant höher als das der Sportlergruppe, $t(59) = -8.74$, $p < .001$.

Ein Mittelwertvergleich für die Depressionssymptomatik konnte nicht gerechnet werden, da zwei unterschiedliche Erhebungsverfahren in den Untersuchungsgruppen verwendet wurden. Die dargestellten Werte beider Gruppen ergeben jedoch keinen Hinweis auf eine relevante depressive Symptomatik.

6.5.2.3 Hypothese 4: Sportler- und Vergleichsgruppe

In den nachfolgenden Abschnitten werden deskriptive und inferenzstatistische Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsgruppen dargestellt. Dies gilt für die kognitive Reserve sowie alle weiteren Ergebnismaße.

6.5.2.3.1 Kognitive Reserve

Deskriptive Ergebnisse

Das Hauptinteresse der vorliegenden Studie galt möglichen Unterschieden bezüglich der kognitiven Reserve aufgrund körperlicher Aktivität bei älteren Erwachsenen. Die Abbildungen 11 (unten) sowie 12 (auf Seite 106) veranschaulichen grafisch die unterschiedliche Leistungsentwicklung.

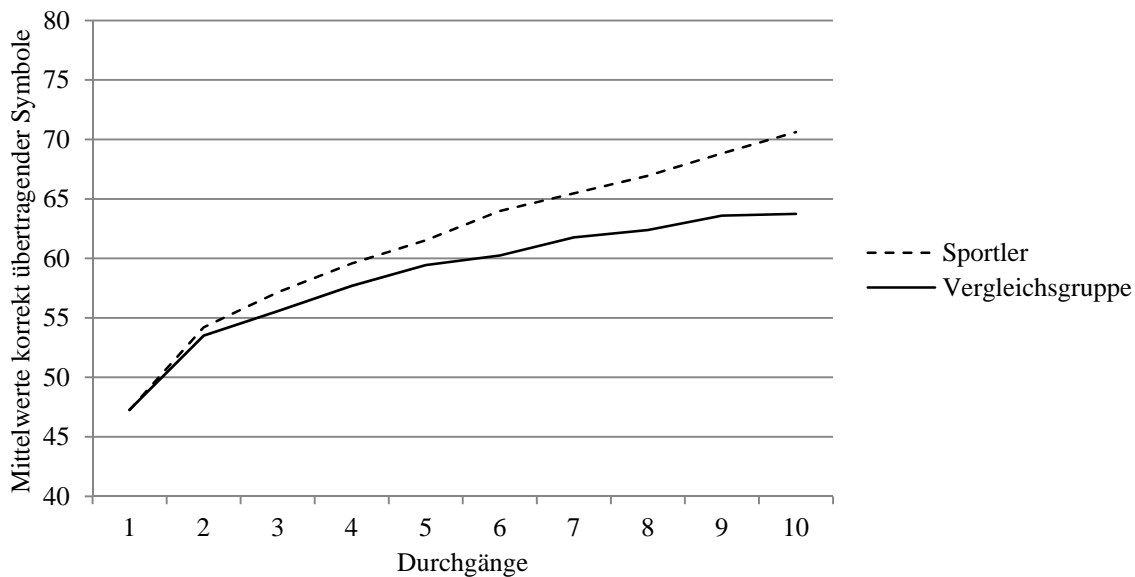


Abbildung 11. Leistungsverläufe der Sportler- und Vergleichsgruppe im ZST.

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 4a: Sportlich aktive ältere Erwachsene realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn im ZST, verglichen mit nicht explizit sporttreibenden Gleichaltrigen.

Tabelle 16 veranschaulicht die deskriptiven Daten sowie die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche von der Sportler- und Vergleichsgruppe.

Tabelle 16

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportler- und Vergleichsgruppe für die Messung der kognitiven Reserve

Variable	Sportler (n = 60)			Vergleichsgruppe (n = 140)			t	d
	M	SD	Bereich	M	SD	Bereich		
ZST 1	47.25	9.01	28-68	47.28	9.36	26-72	-.03	.00
ZST 2	54.20	10.52	29-77	53.50	10.88	32-90	.52	.05
ZST 3	57.15	12.14	22-77	55.56	11.53	30-103	1.02	.11
ZST 4	59.57	11.62	34-81	57.69	11.59	34-112	1.25	.13
ZST 5	61.52	12.57	31-86	59.44	11.83	32-106	1.28	.14
ZST 6	63.98	12.87	33-88	60.25	11.97	37-102	2.25*	.24
ZST 7	65.47	13.07	34-91	61.77	11.95	33-100	2.19*	.24
ZST 8	66.95	13.94	38-97	62.38	11.90	35-100	2.54*	.28
ZST 9	68.83	13.92	38-102	63.60	12.66	33-108	2.91**	.32
ZST 10	70.62	14.48	38-106	63.74	12.22	37-102	3.68***	.41
ÜG	23.37	10.07	5 - 55	16.46 ^a	- ^b	- ^b	5.31***	- ^b

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. d = Effektstärke (Cohen's d). ZST 1 = 1. Durchgang ZST. ÜG = Übungsgewinn. ^a M (ZST 10) – M (ZST 1) = M_{I-n} (ZST 10 – ZST 1). ^baufgrund fehlender Rohdaten der Studie von Zihl et al. (2014) nicht berechenbar.

Beide Gruppen starteten von einem identischem Ausgangsniveau, $t(59) = -.03$, $p = .98$, und verbesserten sich im Verlauf der zehn Übungsdurchgänge¹⁰. Diese Verbesserung kann als deutlicher Hinweis auf eine kognitive Reserve sowohl in der Sportler- als auch in der Vergleichsgruppe interpretiert werden. Allerdings zeigte die Sportlergruppe über alle zehn Übungsdurchgänge hinweg nicht nur absolut bessere Leistungen, sondern auch einen deutlich größeren Übungsgewinn als die Vergleichsgruppe (siehe Abbildung 12).

Der jeweilige Leistungsunterschied wurde ab dem sechsten Durchgang signifikant. Im zehnten Durchgang, $t(59) = 3.68$, $p < .001$, und beim Übungsgewinn durch Retest, dem Kennwert der kognitiven Reserve, $t(59) = 5.31$, $p < .001$, unterschieden sich Sportler- und Vergleichsgruppe auf dem 0.1%-Niveau signifikant voneinander.

¹⁰ Aufgrund der fehlenden Vergleichsgruppendaten aus der Studie von Zihl et al. (2014) konnte keine ANOVA mit Messwiederholung berechnet werden. Anstelle einer Varianzanalyse kamen ersatzweise t-Tests zum Einsatz.

Die Streuung der Ergebnisse nahm in beiden Gruppen über die zehn Übungsdurchgänge jeweils zu, diese Zunahme verlief jedoch nahezu identisch. Die statistische Überprüfung ergab eine signifikante Korrelation der Streuungen (*SD*) zwischen beiden Gruppen über alle 10 Durchgänge ($r = .929, p < .01$).

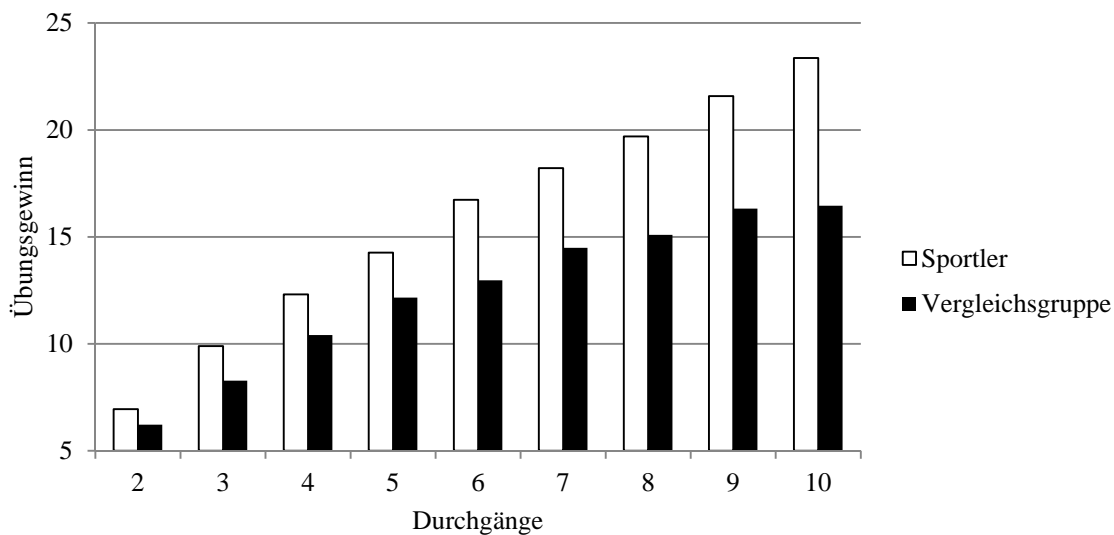


Abbildung 12. Übungsgewinne der Sportler- und Vergleichsgruppe im ZST.

→ Hypothese 4a konnte bestätigt werden: Sportlich aktive ältere Erwachsene realisieren einen signifikant größeren Übungsgewinn im ZST, verglichen mit nicht explizit sporttreibenden Gleichaltrigen.

6.5.2.3.2 Kognitive Kennwerte

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 4b: Sportlich aktive ältere Erwachsene zeigen eine signifikant bessere Arbeitsgedächtnis- und Konzentrationsleistung sowie höhere kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit als die gleichaltrige Vergleichsgruppe.

Die deskriptiven Daten sowie Mittelwertvergleiche der untersuchten kognitiven Kennwerte sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Die Sportlergruppe unterschied sich im Bereich des Arbeitsgedächtnisses signifikant von der Vergleichsgruppe: Sportler zeigten bessere Arbeitsgedächtnisleistungen als die Versuchsteilnehmer der Vergleichsgruppe, $t(59) = 2.07$, $p < .05$. In den beiden anderen kognitiven Bereichen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Tabelle 17

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportler- und Vergleichsgruppe für Arbeitsgedächtnis, Konzentration und Verarbeitungsgeschwindigkeit

Variable	Sportler (n = 60)			Vergleichsgruppe (n = 140)			t	d
	M	SD	Bereich	M	SD	Bereich		
Zahlenspannen ^a	15.02	3.62	8-23	14.05	2.83	9-22	2.07*	.23
PR vorwärts	61 ^a			57				
PR rückwärts	62 ^a			54				
d2 Test ^b	145.17	31.01	78-237	146.07	32.04	77-248	-.23	.02
ZST	47.25	9.01	28-68	47.28	9.36	26-72	-.03	.00
PR	41.43 ^c			42.88 ^c				

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. d = Effektstärke (Cohen's d). d2 Test = Konzentrationsleistung (KL-Wert). ZST = Zahlen-Symbol-Test (1. Durchgang, 90 Sekunden). ^aEs existieren Normwerte bis 74 Jahre, die 8 älteren Probanden flossen mit dieser verschärften Norm in die Berechnung ein. ^bProzentrangangaben können nicht angegeben werden. Normen des d2 Tests liegen nur bis zum Höchstalter von 60 Jahren vor. ^cProzentrangangaben basieren auf Normen für die Bearbeitungszeit von 120 Sekunden, die in dieser Untersuchung auf 90 Sekunden verkürzt wurde.

→ Hypothese 4b konnte nur teilweise bestätigt werden: Sportlich aktive ältere Erwachsene zeigen eine signifikant bessere Arbeitsgedächtnisleistung als die gleichaltrige Vergleichsgruppe. Dies gilt allerdings weder für die Konzentrationsleistung noch für die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit.

6.5.3 Sportlergruppen

6.5.3.1 Kontrollvariablen: Intelligenz, Bildung, Depression

Vergleicht man die Sportlerteilstichproben miteinander, so unterschieden sich diese weder bezüglich des Geschlechterverhältnisses (vgl. Tabelle 12), der fluiden Intelligenz, $F(2, 57) = 2.98$, $p = .06$, $\eta_p^2 = .10$, der Bildungsjahre, $F(2, 57) = .56$, $p = .57$, $\eta_p^2 = .02$, noch

hinsichtlich der Depressionskennwerte, $F(2, 57) = .62, p = .54, \eta_p^2 = .02$. Tabelle 18 fasst diese Daten zusammen.

Tabelle 18

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportlerteilstichproben für fluide Intelligenz, Bildung und Depression

Variable	Sportler 1 60 – 63 Jahre (n = 20)		Sportler 2 64 – 69 Jahre (n = 19)		Sportler 3 70 und älter (n = 21)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
Fluide Intelligenz	19.10	3.57	17.10	3.75	15.81	5.40	2.98	.10
PR	86		81		79			
Bildungsjahre	12.35	3.88	13.74	4.24	12.90	4.18	.56	.02
ADS-K	5.20	4.90	5.05	3.91	6.52	5.02	.62	.02

Anmerkung. Signifikanzniveaus: $*p \leq .05$. $**p \leq .01$. $***p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). PR = Prozentrang. Fluide Intelligenz: Matrizen. ADS-K = Kurzform der Allgemeinen Depressionsskala (Hautzinger, et al., 2012).

Prüft man in einem weiteren Schritt die 3 Teilstichproben einzeln gegen die Vergleichsgruppe, so konnten beim Geschlechterverhältnis keine, bei der fluiden Intelligenz und den Bildungsjahren jedoch schon Unterschiede festgestellt werden (vgl. Tabellen 15 und 18): Die jüngste Sportlerteilstichprobe zeigte signifikant bessere Leistungen bei der fluiden Intelligenz als die Vergleichsgruppe, $t(19) = 2.78, p < .05$, bei gleichzeitig signifikant weniger Bildungsjahren (Sportler 1: $t(19) = -6.02, p < .001$). Die anderen beiden Sportlergruppen unterschieden sich nicht hinsichtlich der fluiden Intelligenz, jedoch signifikant bezüglich der Anzahl ihrer Bildungsjahre zu Ungunsten der Sportler (Sportler 2: $t(18) = -3.95, p < .01$; Sportler 3: $t(20) = -5.12, p < .001$).

6.5.3.2 Kontrollvariable: Aktivitätsniveau

Eine weitere wichtige Kontrollvariable beim Vergleich der Ergebnismaße, ist das Aktivitätsniveau. Abbildung 13 zeigt deskriptiv die Anzahl der Probanden in der jeweiligen Aktivitätskategorie differenziert nach den drei Altersgruppen. Die drei Altersgruppen (Sportler 1: $M = 4.00, SD = 1.03$; Sportler 2: $M = 4.21, SD = .98$; Sportler 3: $M = 4.00, SD = 1.14$) unterschieden sich nicht signifikant bezüglich ihres Aktivitätsniveaus. 90 Prozent der

Sportler aus Gruppe 1 betrieben ihr Leben lang Sport. Die Hälfte davon bezeichnete sich als Gelegenheitssportler. 2 Pb wurden nach 5 bzw. 15 Jahren Pause wieder sportlich aktiv. In Altersgruppe 2 betrieben über 63 Prozent der Studienteilnehmer ihr ganzes Leben Sport, 20 Prozent davon als Gelegenheitssportler. Die 7 Wiedereinsteiger begannen im Durchschnitt nach 27.57 Jahren wieder mit Sport ($SD = 13.40$). Mit über 90 Prozent lag der Anteil der lebenslangen Sportler in Gruppe 3 am höchsten. Knapp 19 % gaben an gelegentlich Sport zu treiben. Die 2 Wiedereinsteiger der Gruppe begannen nach 10 bzw. 30 Jahren wieder mit regelmäßiger körperlicher Aktivität.

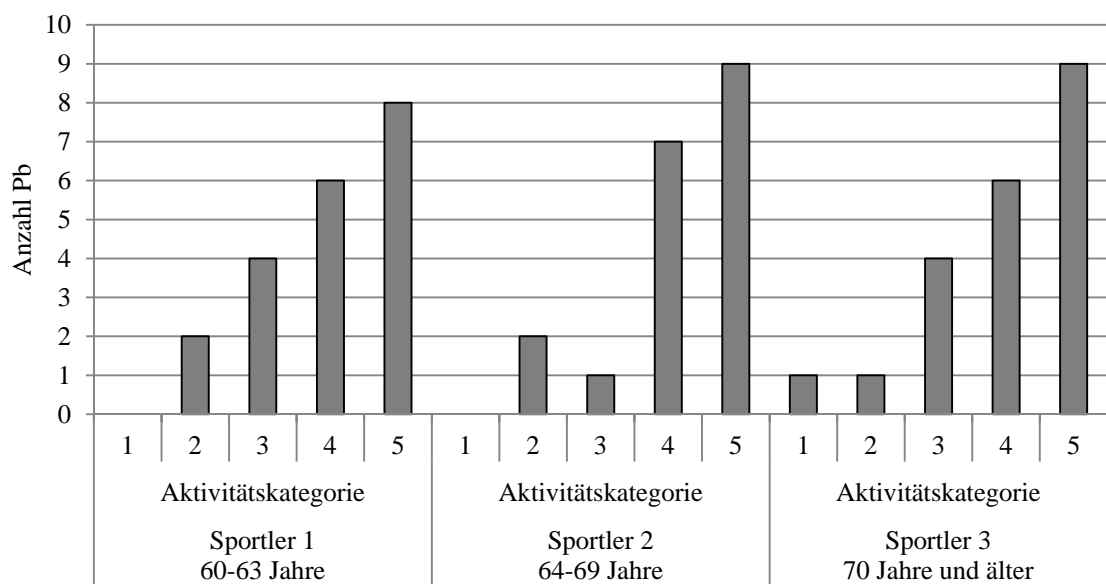


Abbildung 13. Anzahl der Probanden in der jeweiligen Aktivitätskategorie differenziert nach Sportlergruppe. Hinweis: Beschreibung der Kategorien erfolgte auf S. 91.

6.5.3.3 Kontrollvariablen: Fragebogenmaße

Tabelle 19 fasst die gesamten Ergebnisse der Fragebögen aus den Bereichen „Intellektuelles Engagement (TIE)“, „Selbstbestimmtheit“, „Lebenszufriedenheit“ (FTL) und „Persönlichkeit“ (BFI-K) zusammen.

Diese vier untersuchten Bereiche haben neben der körperlich-sportlichen Aktivität, die zentral im Fokus dieser Studie steht, möglicherweise positiven Einfluss auf den Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter. Die Erfassung dieser Maße dient deshalb einerseits dazu, die Vergleichbarkeit der Sportlerteilstichproben sicherzustellen. Andererseits sind

dies wichtige Parameter, damit eine erste Einordnung des Reservekonstruktes in den Kontext körperlich-sportlicher Aktivität gelingt.

Tabelle 19

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportlerteilstichproben für typisches intellektuelles Engagement, Selbstbestimmtheit, Lebenszufriedenheit und Persönlichkeit

Variable	Sportler 1 60 – 63 Jahre (n = 20)		Sportler 2 64 – 69 Jahre (n = 19)		Sportler 3 70 und älter (n = 21)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
<i>Intellektuelles Engagement</i>								
Lesen	3.60	.90	3.91	.95	4.14	1.07	1.58	.05
Kontemplation	4.51	.84	4.39	.73	4.40	.79	.13	.01
Neugier	3.83	.58	3.88	.50	4.11	.58	1.49	.05
gesamt	3.98	.47	4.06	.55	4.22	.62	1.00	.03
<i>Selbstbestimmtheit</i>	17.05	6.18	15.11	8.70	17.62	6.03	.69	.02
<i>Lebenszufriedenheit</i>								
Vergangenheit	2.59	.90	2.58	.66	2.55	.81	.01	.00
Gegenwart	3.28	.41	3.42	.56	3.18	.52	1.19	.04
Zukunft	3.18	.41	3.14	.54	3.08	.44	.21	.01
gesamt	3.01	.45	3.05	.46	2.94	.41	.34	.01
<i>Persönlichkeit</i>								
NE	2.68	.65	2.37	.66	2.67	.56	1.51	.05
EX	3.30	.91	3.59	.71	3.66	.82	1.08	.04
OE	3.72	.57	3.79	.70	3.95	.56	.79	.03
VT	3.29	.67	3.37	.58	3.39	.74	.14	.01
GW	4.09	.61	3.99	.58	4.07	.48	.18	.01

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partiell Eta-Quadrat). IE = Typisches intellektuelles Engagement: 1 = „Stimme überhaupt nicht zu“ (= geringes intellektuelles Engagement) bis 6 = „Stimme sehr zu“ (= hohes intellektuelles Engagement). Selbstbestimmtheit: 1 = „Keinesfalls aus diesem Grund“ bis 9 = „Genau aus diesem Grund“ (Bereich: -24 bis +24). Lebenszufriedenheit: 1 = „Trifft überhaupt nicht zu“ (= unzufrieden) bis 4 = „Trifft völlig zu“ (= zufrieden). Persönlichkeit: NE = Neurotizismus, EX = Extraversion, OE = Offenheit, VT = Verträglichkeit, GW = Gewissenhaftigkeit; 1 = „sehr unzutreffend“ bis 5 = „sehr zutreffend“.

In keinem der vier Bereiche gab es signifikante Gruppenunterschiede zwischen den Sportlergruppen. Die vorliegenden Daten zeigen damit, dass eine Vergleichbarkeit der drei Sportlerteilstichproben auch bezüglich dieser Parameter gegeben war.

Die Ergebnisse liefern erste Hinweise, dass überdurchschnittliches intellektuelles Engagement, eine hohe Selbstbestimmtheit bei sportlicher Aktivität sowie eine hohe Lebenszufriedenheit in Gegenwart und Zukunft mit körperlich-sportlicher Aktivität und damit möglicherweise indirekt mit positiven Effekten für die kognitive Leistungsfähigkeit assoziiert sein könnten. Die Ergebnisse ergänzen die Forschungsbefunde mit Daten von

Sportlern im höheren Erwachsenenalter (vgl. Deci & Ryan, 2012; Marioni, 2012; St. John & Montgomery, 2010).

6.5.3.4 Kontrollvariable: Medikation

Ergänzend zu den Ein- und Ausschlusskriterien der Studie (siehe 6.3.3) wurde die Häufigkeit regelmäßiger Medikamenteneinnahme erhoben. Sie unterschied sich zwischen den Gruppen nicht signifikant. 32 Prozent der Sportler aus Gruppe 2 nahmen regelmäßig Medikamente, der Anteil in den Gruppen 1 und 3 lag bei 60 bzw. 62 Prozent.

6.5.3.5 Hypothese 5: Sportlergruppen

6.5.3.5.1 Kognitive Reserve

Deskriptive Ergebnisse

Die Abbildungen 14 und 15 veranschaulichen die mittleren Übungsgewinne und Standardfehler sowie die Leistungsverläufe der Sportlerteilstichproben und der Vergleichsgruppe.

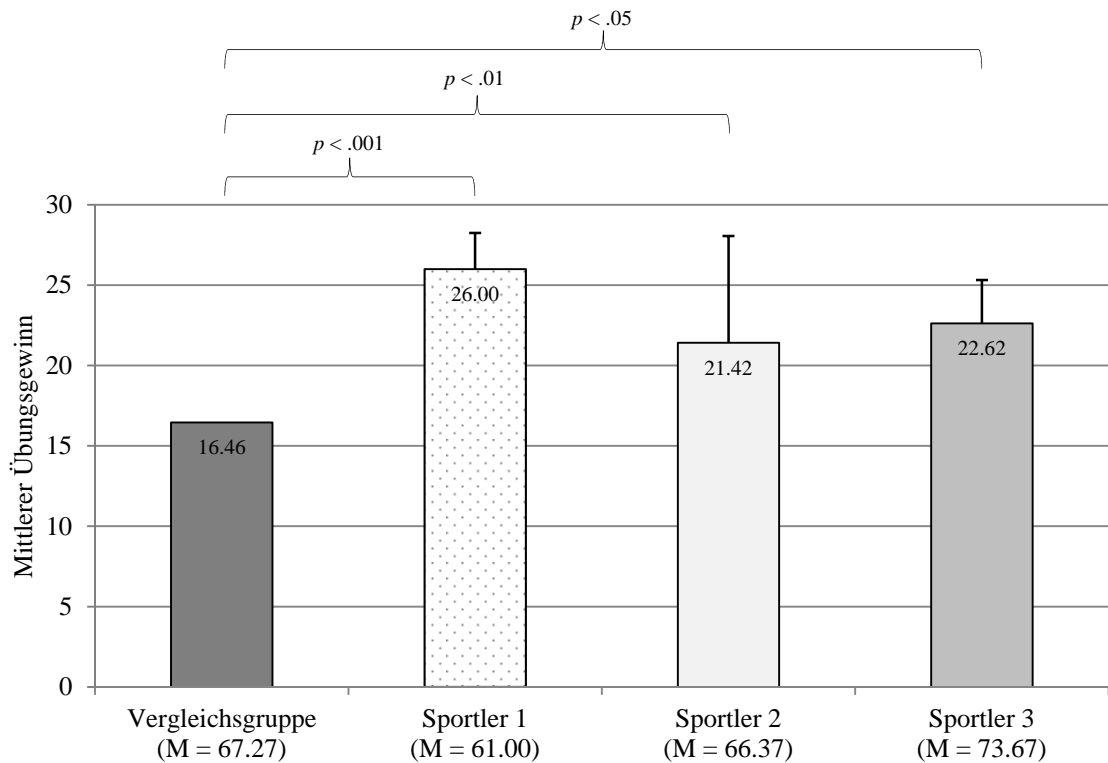


Abbildung 14. Mittlerer Übungsgewinn und berechenbare Standardfehler der Sportler(alters-)gruppen und der Vergleichsgruppe.

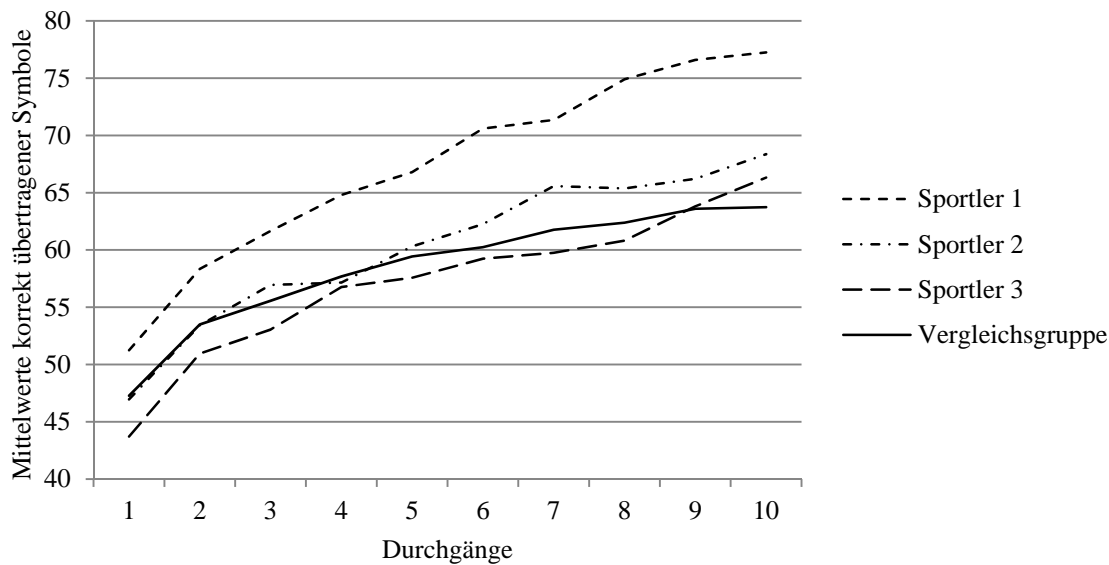


Abbildung 15. Leistungsverläufe der drei Sportlergruppen mit Vergleichsgruppe im ZST.

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 5a: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich signifikant hinsichtlich ihrer kognitiven Reserve.

Alle drei Sportler(alters)gruppen erzielten einen signifikant größeren Übungsgewinn als die Vergleichsgruppe. Sowohl die jüngste (Sportler 1: $M = 26.00$, $SD = 10.05$, $t(19) = 4.24$, $p < .001$) als auch die mittelalte Gruppe (Sportler 2: $M = 21.42$, $SD = 6.64$, $t(18) = 3.26$, $p < .01$) war signifikant besser als die Vergleichsgruppe ($M = 16.46$, SD fehlt¹¹). Selbst die ältesten sportlich aktiven Studienteilnehmer (Sportler 3) zeigten noch eine signifikant größere kognitive Reserve als die Vergleichsgruppe ($M = 22.62$, $SD = 12.36$, $t(20) = 2.28$, $p < .05$).

Darüber hinaus bemerkenswert ist, dass beim Vergleich der Sportler(alters)gruppen keine signifikanten Unterschiede bei der kognitiven Reserve festgestellt wurden, $F(2, 57) = 1.10$, $p = .34$, $\eta_p^2 = .04$.

Tabelle 20 fasst für die einzelnen Übungsdurchgänge des ZST jeweils den Übungsgewinn und die Mittelwertvergleiche der drei Sportlerteilstichproben zusammen.

¹¹ aufgrund fehlender Rohdaten der Studie von Zihl et al. (2014) nicht berechenbar.

Tabelle 20

Deskriptive Statistik und Mittelwertvergleiche der Sportlerteilstichproben für die Messung der kognitiven Reserve

Variable	Sportler 1 60 – 63 Jahre (n = 20)		Sportler 2 64 – 69 Jahre (n = 19)		Sportler 3 70 und älter (n = 21)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
ZST 1	51.25	7.32	46.95	9.77	43.71	8.56	3.96*	.12
ZST 2	58.35	8.92	53.42	10.75	50.95	10.86	2.77	.09
ZST 3	61.65	8.80	56.95	10.59	53.05	14.89	2.73	.09
ZST 4	64.80	9.08	57.16	10.74	56.76	13.22	3.29*	.10
ZST 5	66.80	9.89	60.32	10.97	57.57	14.82	3.09	.10
ZST 6	70.60	9.98	62.26	9.39	59.24	15.65	4.78*	.14
ZST 7	71.35	9.93	65.58	9.66	59.76	16.04	4.51*	.14
ZST 8	74.90	11.37	65.37	9.61	60.81	16.19	6.40**	.18
ZST 9	76.60	9.37	66.21	10.38	63.81	17.27	5.56**	.16
ZST 10	77.25	11.92	68.37	10.17	66.33	17.95	3.53*	.11
ÜG	26.00	10.05	21.42	6.64	22.62	12.36	1.10	.04

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). ZST 1 = 1. Durchgang ZST. ÜG = Übungsgewinn.

Zum Vergleich des Lernzuwachses der einzelnen Sportlergruppen, den Unterschieden zwischen den Altersgruppen und einer möglichen Wechselwirkung zwischen Testdurchgängen und Altersgruppen wurde eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt¹². Die Leistungen zwischen dem ersten und zehnten Testdurchlauf unterschieden sich in allen drei Gruppen signifikant, $F(4, 214) = 140.59$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .71$. Diese überzufällige Übungsverbesserung im Testverlauf belegt evident das Bestehen einer kognitiven Reserve in allen Altersgruppen. Der Ausgangswert, $F(2, 57) = 3.96$, $p < .05$ sowie das Niveau der Lernkurven, $F(2, 57) = 4.54$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .14$, reduzierten sich altersabhängig, der Abfall des Lernpotentials über die 3 Sportler(alters-)gruppen war jedoch nicht signifikant. Es zeigte sich nur eine marginale Interaktion zwischen den Altersgruppen und den Übungsdurchgängen, $F(8, 214) = 1.85$, $p = .07$, $\eta_p^2 = .06$, was bedeutet, dass alle drei Altersgruppen ähnlich von den Testwiederholungen profitieren konnten.

¹² Sphärizität konnte nicht angenommen werden, deshalb erfolgte Greenhouse-Geisser-Korrektur

Diese Ergebnisse bestätigen ein, aufgrund von altersbedingten Einbußen bei der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit, vermindertes Ausgangsniveau im ZST über die Sportlergruppen hinweg. Das eigentliche Lernpotential als Maß der kognitiven Reserve ist durch diese Veränderungen jedoch kaum beeinträchtigt.

→ Hypothese 5a konnte nicht bestätigt werden: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich entgegen der formulierten Erwartung nicht signifikant hinsichtlich ihrer kognitiven Reserve.

Somit haben körperlich-sportlich aktive ältere Erwachsene nicht nur insgesamt einen überzufällig größeren Übungsgewinn und somit eine größere kognitive Reserve als die Mitglieder der Vergleichsgruppe (Hypothese 4a). Dies gilt, wie in dieser Studie gezeigt werden konnte, auch noch für die ältesten Studienteilnehmer der Sportlerteilstichprobe 3. Dieses Ergebnis ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die kognitive Reserve als eine Ressource für Anpassungsleistungen durch Bewegung zumindest erhalten werden kann.

6.5.3.5.2 Exekutive Funktionen

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 5b: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der Inhibition, Interferenz, kognitiven Flexibilität und des Arbeitsgedächtnisses.

Alle Daten aus dem Bereich der exekutiven Funktionen sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Es konnten in keinem der Teilbereiche Inhibition, Interferenz, kognitiver Flexibilität und Arbeitsgedächtnis überzufällige Leistungsabfälle festgestellt werden. Einzige Ausnahme war der signifikante Abfall der RZ im Test der kognitiven Flexibilität, $F(2, 57) = 4.62, p < .05, \eta_p^2 = .14$. Der paarweise Vergleich zwischen Sportlergruppe 1 und 3 war signifikant ($p < .05$).

Während bei den meisten Ergebnismaßen zumindest leichte Tendenzen eines Leistungsabfalls über die drei Altersgruppen hinweg zu erkennen waren (vgl. Fehlerrate bei der Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität [sowohl bedingt durch das signifikant langsamer werdende Bearbeitungstempo als auch durch die ansteigende Fehlerrate] sowie

Arbeitsgedächtnisleistung), wurde dies bei der Inhibitionsleistung, bedingt durch die in dieser Aufgabe stabil gehaltene Bearbeitungsgeschwindigkeit, nicht sichtbar.

Tabelle 21

Deskriptive Statistik, Mittelwertvergleiche und Prozentrangangaben der Sportlerteilstichproben für Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität und Arbeitsgedächtnis

Variable	Sportler 1 60 – 63 Jahre (n = 20)		Sportler 2 64 – 69 Jahre (n = 19)		Sportler 3 70 und älter (n = 21)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
GO/NOGO ^a	2.40	5.83	3.13	6.24	2.09	6.05	.15	.01
PR	49		54		49			
RZ	415	67	397	39	408	38	.69	.02
PR	58		72		72			
Fehler	.95	1.28	1.68	1.73	2.00	2.07	1.97	.07
PR	53		44		38			
FWT	18.67	5.32	24.10	9.04	21.80	7.27	2.70	.09
PR	45		33		67			
FLEX ^a	4.31	6.92	-1.38	11.89	-2.49	15.41	1.87	.06
PR	63		46		45			
RZ	823	158	919	215	1155	551	4.62*	.14
PR	53		47		41			
Fehler	1.40	1.50	3.74	3.89	3.81	6.32	1.93	.06
PR	67		48		52			
SAI	2.76	7.72	-.48	8.48	2.09	5.84	1.04	.04
PR								
Zahlenspannen	15.95	3.05	14.58	3.59	14.52	4.12	1.00	.03
Vorwärts	8.40	1.60	7.63	1.83	7.71	2.19	.98	.03
PR	66		58		58 ^b			
Rückwärts	7.55	2.11	6.95	2.07	6.81	2.23	.68	.02
PR	63		65		59 ^b			

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). PR = Prozentrang. GO/NOGO = Inhibitionstest (TAP). RZ = Median der Reaktionszeiten im Go/NoGo bzw. Flexibilitätstest. FWT = Farb-Wort-Test. FLEX = Indexwert kognitive Flexibilität (TAP). SAI = Speed-Accuracy-Index. ^aBerechnung des Gesamtleistungsindex siehe Zimmermann & Fimm (2009, S. 86). ^bEs existieren Normwerte bis 74 Jahre, die 8 älteren Probanden flossen mit dieser verschärften Norm in die Berechnung ein.

Analysiert man darüber hinaus die relative Leistungsentwicklung der verschiedenen exekutiven Bereiche, so stellt man tendenziell auch hier einen Leistungsrückgang über die Zeit fest. Dieser bewegt sich aber bei allen Ergebnismaßen, im Vergleich zur Normstichprobe des jeweiligen Testverfahrens, im mittleren bis guten Prozentrangbereich (vgl. Prozentrangangaben in Tabelle 21).

→ Hypothese 5b konnte nicht bestätigt werden: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich in keinem der exekutiven Teilbereiche Inhibition, Interferenz, kognitiven Flexibilität und des Arbeitsgedächtnisses signifikant.

6.5.3.5.3 Verarbeitungsgeschwindigkeit und Konzentration

Inferenzstatistische Ergebnisse

- Hypothese 5c: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit, Aufmerksamkeitsaktivierung sowie Konzentrationsleistung.

Tabelle 22 stellt die deskriptive Statistik, Mittelwertvergleiche und Prozentrangangaben der Sportlerteilstichproben für zwei Verarbeitungsgeschwindigkeitsmaße und die Konzentrationsleistung gegenüber.

Tabelle 22

Deskriptive Statistik, Mittelwertvergleiche und Prozentrangangaben der Sportlerteilstichproben für Verarbeitungsgeschwindigkeit, Aufmerksamkeitsaktivierung und Konzentration

Variable	Sportler 1 60 – 63 Jahre (n = 20)		Sportler 2 64 – 69 Jahre (n = 19)		Sportler 3 70 und älter (n = 21)		F	η_p^2
	M	SD	M	SD	M	SD		
ZST	51.25	7.32	46.95	9.77	43.71	8.56	3.96*	.12
PR	35 ^a		39 ^a		49 ^a			
Alertness	268.25	39.69	271.42	50.69	273.48	36.21	.08	.00
PR	33		36		41			
d2 Test ^b	152.95	26.14	142.74	27.99	139.95	37.25	.99	.03

Anmerkung. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$. η_p^2 = Effektstärke (partielles Eta-Quadrat). ZST = Zahlen-Symbol-Test (1. Durchgang, 90 Sekunden). Alertness = tonische Aufmerksamkeitsaktivierung (TAP). d2 = Konzentrationsleistung (KL-Wert). ^aProzentrangangaben basieren auf Normen für die Bearbeitungszeit von 120 Sekunden, die in dieser Untersuchung auf 90 Sekunden verkürzt wurde. ^bProzentrangangaben können nicht angegeben werden. Normen des d2 Tests liegen nur bis zum Höchstalter von 60 Jahren vor.

Der Vergleich beider Ergebnismaße der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit (ZST 1. Durchgang und tonische Alertness, Tabelle 22) ergab über die drei untersuchten Gruppen

hinweg ein unterschiedliches Ergebnis: Während beim ZST ein altersbedingter signifikanter Abfall der Leistungsgeschwindigkeit festzustellen war, $F(2, 57) = 3.96, p < .05, \eta_p^2 = .12$ (dabei nur der paarweise Vergleich zwischen Sportler 1 und Sportler 3; $p < .05$), unterschieden sich die Sportlergruppen hingegen bei der tonischen Alertness nicht. Dies dürfte aufgrund der sehr unterschiedlich komplexen Anforderungen sowohl im kognitiven aber auch motorischen Bereich zustande gekommen sein. Dabei scheint allerdings bedeutsam, dass sich die Leistungen bezüglich der Verarbeitungsgeschwindigkeit, in beiden Ergebnismaßen und mit steigendem Alter, im Vergleich zur jeweiligen Normstichprobe, stetig verbesserten (vgl. Prozentrangangaben in Tabelle 22). Dies weist möglicherweise darauf hin, dass Sportler relativ zur Normstichprobe geringere altersbedingte Einbußen bei der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit haben.

Die absolute Konzentrationsleistung nahm über die Altersgruppen hinweg leicht ab, wobei dieser Unterschied nicht signifikant war. Ein Vergleich der relativen Leistung bezogen auf eine Normstichprobe war nicht möglich, weil bei diesem Verfahren Normwerte lediglich bis zum Alter von 60 Jahren vorliegen.

→ Hypothese 5c konnte nur bedingt bestätigt werden: Die drei Altersgruppen sportlich aktiver älterer Erwachsener unterscheiden sich in einem Verfahren zur Erfassung der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit signifikant. Im zweiten Verfahren sowie bei der Konzentrationsleistung konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

6.5.3.6 Weiterführende Korrelationsmaße

6.5.3.6.1 Einordnung des Reservekonstruktes

Die kognitive Reserve, erhoben mittels Übungsgewinn im ZST, steht im Zentrum dieser Studie. Um das Reservekonstrukt im Kontext von Bewegung einordnen zu können, wurden Korrelationen zwischen der kognitiven Reserve und den einzelnen etablierten Maßen neuropsychologischer Leistungsmessungen sowie den Fragebogenmaßen berechnet. Dabei wurden insgesamt fünf Zusammenhänge signifikant, die im Folgenden dargestellt sind. Die kognitive Reserve korreliert signifikant mit der kognitiven Flexibilität (FLEX: $r = .36, p < .01$), der Interferenzleistung (FWT: $r = -.28, p < .05$), dem Kurzzeitgedächtnis (ZSPv: $r = .29, p < .05$) und wie erwartet mit der fluiden Intelligenz ($r = .26, p < .05$). Der Zusam-

menhang mit der Arbeitsgedächtnisleistung war auf dem 5%-Niveau nicht signifikant (ZSPR: $r = .25$, $p = .06$). Aus dem Bereich der Fragebögen korreliert der Teilaspekt „Kontemplation“ des typischen intellektuellen Engagements signifikant mit der kognitiven Reserve (ÜG: $r = .29$, $p < .05$). Alle berechneten Korrelationen der Ergebnismaße sind in einer Korrelationsmatrix im Anhang E zusammengefasst.

6.5.3.6.2 Ausgewählte Korrelationen

Körperliche Aktivität und Fragebogenmaße: Das Ausmaß der körperlichen Aktivität korreliert signifikant mit der gegenwärtigen ($r = .39$, $p < .01$) und zukünftigen ($r = .32$, $p < .05$) Lebenszufriedenheit und der Selbstbestimmtheit bei sportlicher Aktivität ($r = .45$, $p < .00$). Ferner besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Selbstbestimmtheit bei sportlicher Aktivität und dem BMI ($r = -.41$, $p < .01$).

Intellektuelles Engagement und kognitive Leistungen

Der Teilaspekt „Kontemplation“ des typischen intellektuellen Engagements korreliert nicht nur mit der kognitiven Reserve (s.o.), sondern auch mit der kognitiven Flexibilität (FLEX: $r = .30$, $p < .05$), der Interferenz- (FWT: $r = -.33$, $p < .05$) und Konzentrationsleistung (KL: $r = .42$, $p < .01$) sowie der Verarbeitungsgeschwindigkeit (ZST: $r = .28$, $p < .05$).

6.6 Diskussion Studie II

Ziel dieser zweiten Studie war es, den Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität auf die kognitive Reserve bei älteren Erwachsenen zu untersuchen. Dafür wurden in einem ersten Schritt gesunde und körperlich aktive Erwachsene des Altersbereichs von 60 bis 82 Jahren mit einer Vergleichsgruppe mit nicht explizit sporttreibenden Gleichaltrigen verglichen. Außerdem fand ein Vergleich weiterer kognitiver Kennwerte statt. Um weitergehende Aussagen bezüglich altersabhängiger Veränderungen machen zu können, ist die Sportlergruppe in drei Altersbereiche aufgeteilt worden. Diese Sportler unterschiedlichen Alters wurden hinsichtlich ihrer kognitiven Reservekapazität und weiteren kognitiven Fähigkeiten verglichen. Zusätzlich fand eine Berechnung von Zusammenhängen zwischen der kognitiven Reserve und weiteren Ergebnismaßen statt.

Nachfolgend werden zuerst die Ergebnisse der Studie II zusammengefasst und diskutiert. Danach erfolgt eine studienübergreifende Abschlussdiskussion.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Kognitive Reserve

Die kognitive Reserve der körperlich aktiven älteren Erwachsenen war signifikant größer als die der Vergleichsgruppe. Ausgehend von einem identischen Leistungsniveau zu Testbeginn, zeigte sich in beiden Untersuchungsgruppen eine Verbesserung der Leistung im Testverlauf. Das Ausmaß dieser Verbesserung und damit der kognitiven Reserve war jedoch bei den sportlich aktiven Teilnehmern signifikant größer (*Hypothese 4a*). Der Gruppenvergleich im zweiten Teil der Studie ergab jeweils signifikante Unterschiede hinsichtlich der kognitiven Reserve zwischen den drei Altersgruppen und der Vergleichsgruppe. Dabei zeigten die Teilnehmer aller drei Altersbereiche eine größere Reservekapazität. Im Altersverlauf hingegen, konnte kein signifikanter Abfall festgestellt werden. Zwar nahmen das Ausgangsniveau sowie das Niveau der Lernkurven insgesamt über die Altersgruppen hinweg erwartungsgemäß ab, nicht aber das Lernpotential als Indikator der kognitiven Reserve (*Hypothese 5a*).

Exekutive und weitere kognitive Leistungen

Hinsichtlich der Arbeitsgedächtnisleistung zeigte sich bei den sportlichen älteren Erwachsenen ein signifikanter Unterschied im Vergleich zu den nicht explizit sporttreibenden Gleichaltrigen. Das Arbeitsgedächtnis dieser sportlich engagierten älteren Menschen war überzufällig besser. Der Vergleich von Konzentrationsleistung und kognitiver Verarbeitungsgeschwindigkeit zwischen diesen beiden unterschiedlich aktiven Gruppen ergab für keines der beiden Ergebnismaße einen signifikanten Unterschied (*Hypothese 4b*). Die Leistungen in den exekutiven Teilbereichen Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität, Kurz- und Arbeitsgedächtnis unterschieden sich bei den drei Sportleraltersgruppen nicht überzufällig. Ein signifikanter altersbedingter Abbau konnte somit nicht bestätigt werden (*Hypothese 5b*). Dies galt darüber hinaus entsprechend für die Konzentrationsleistung und das weniger komplexe Verfahren zur Erfassung der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit. Einzig im zweiten Verfahren (ZST 1. Durchgang) war der altersbedingte Leistungsabfall bei der Verarbeitungsgeschwindigkeit signifikant. Allerdings verbesserten sich die Teilnehmer in

beiden Verfahren, im Vergleich zur jeweiligen Normstichprobe, mit steigendem Alter stetig (*Hypothese 5c*).

Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassend wurde also gefunden, dass sportlich aktive ältere Erwachsene eine größere kognitive Reserve haben als sportlich nicht explizit aktive Gleichaltrige und sie diese im Alter auch gut aufrechterhalten. Berücksichtigt man den Forschungsstand zum Einfluss von körperlicher Bewegung auf die kognitive Leistungsfähigkeit, überraschen diese Ergebnisse nicht. Aufgrund struktureller (u.a. Colcombe, et al., 2006; Erickson, et al., 2009; Erickson, et al., 2011; Voss, et al., 2013; Weinstein, et al., 2012) und funktioneller (u.a. Burdette, et al., 2010; Colcombe, et al., 2004; Kramer, et al., 1999; Prakash, et al., 2011) Befunde aus den letzten Jahren zum positiven Einfluss von körperlicher Bewegung in Zusammenhang mit Lernen, Gedächtnis sowie den exekutiven Funktionen, schien dieser Effekt auch auf die kognitive Reserve möglich. Die vorliegenden Befunde dieser Studie belegen diesen Einfluss eindrucksvoll.

Das verwendete Testverfahren (ZST) zur Erfassung der kognitiven Reserve erfordert ein effektives Ineinandergreifen von unterschiedlichen und sehr komplexen Prozessen, um eine gute Testleistung realisieren zu können (vgl. Laux & Lane, 1985; Lezak, 2004). Diese komplexen Testanforderungen sind erforderlich, um das komplexe Konstrukt der „Kognitiven Reserve“ valide zu erfassen (Satz, Cole, Hardy, & Rassovsky, 2011; Zihl, et al., 2014). Vor dem Hintergrund dieser Komplexität erscheint es aus struktureller Sicht plausibel, dass neben den positiven Effekten von Bewegung auf kritische Gehirnareale im präfrontalen Kortex und Hippocampus (Colcombe, et al., 2006; Weinstein, et al., 2012), auch die Konnektivität zwischen relevanten Arealen gefördert wird (Voss, et al., 2013). Darüber hinaus mehren sich Hinweise, dass körperliche Aktivität neuronale Aktivierungsmuster positiv verändern oder zumindest gut aufrechterhalten könnte und diese in herausfordernden Situationen, wie in dieser Studie simuliert, auf der Verhaltensebene einen signifikanten Leistungsunterschied bedingen (Colcombe, et al., 2004; Erickson, et al., 2007b; Heinzl et al., 2014; Nyberg, et al., 2012; Smith, et al., 2011).

Die entscheidende Voraussetzung, um überhaupt die Fragestellung dieser Studie zuverlässig überprüfen zu können, war der Nachweis über die tatsächliche körperliche Aktivität der

Sportlergruppe. Dies konnte klar gezeigt werden (vgl. 6.5.2.1). Keine Informationen lagen dagegen über das Ausmaß der sportlichen Aktivität in der Vergleichsgruppe vor. Dies dürfte mehr eine Stärkung als eine Schwächung der Aussagekraft dieser Studie sein: Die Gegenüberstellung von Sportler- und Vergleichsgruppe ist als konservativ einzuschätzen, da körperliche Aktivität als postulierter Wirkfaktor in der Vergleichsgruppe nicht ausgeschlossen werden konnte. Aus diesem Grund erscheint es möglich, dass zukünftige Untersuchungen, die körperlich-sportliche Inaktivität in der Vergleichsgruppe kontrollieren, noch deutlichere Unterschiede bei der kognitiven Reserve finden werden.

Das Intelligenzniveau der Studienteilnehmer konnte insgesamt als sehr hoch eingeschätzt werden. Interessanterweise unterschieden sich Sportler- und Vergleichsgruppe mit identischem Intelligenzniveau (PR 82 sowie PR 81 bei der Testung zur fluiden Intelligenz) bei den Bildungsjahren deutlich: Die Sportler mit einer signifikant größeren kognitiven Reserve waren überzufällig weniger Jahre in Ausbildung als die Teilnehmer der Vergleichsgruppe. Möglicherweise verstärkt körperliche Aktivität die günstigen Effekte von (Aus-)Bildung auf die kognitive Reserve noch weiter (Nyberg, et al., 2012; Steffener et al., 2014; Stern, 2009).

Körperlich-sportliche ältere Erwachsene haben wie dargestellt eine größere kognitive Reserve als sportlich nicht explizit aktive Gleichaltrige. Dieses an sich schon spannende Ergebnis gewinnt noch an Bedeutung, wenn man die unterschiedlich alten Sportlergruppen differenziert betrachtet: Jede der drei Altersgruppen, einschließlich der ältesten, zeigte eine signifikant größere Reservekapazität als die Vergleichsgruppe. Die Ausgangsleistung im ZST und damit die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit, sowie das Niveau der Lernkurven, nahmen zwar über die Altersgruppen hinweg erwartungsgemäß (Park & Reuter-Lorenz, 2009) ab, das Lernpotential jedoch nicht. Die kognitive Reserve verringerte sich somit altersbedingt nicht signifikant. Dieses Ergebnis bestätigt aktuelle Forschungsbefunde, dass auch im höheren Alter und auf unterschiedlichen Beschreibungsebenen das Gehirn seine Plastizität behält und körperlich-sportliche Aktivität dafür einen wichtigen Beitrag leisten kann (Colcombe, et al., 2004; Erickson, et al., 2011; Voss, et al., 2010b).

Während sich die Sportler- und die Vergleichsgruppe weder bezüglich ihrer Leistung im ersten Durchgang des ZST, einem Maß für kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit (Lezak, 2004), noch bezüglich ihrer Konzentrationsleistung überzufällig unterschieden, zeigten die sportlichen älteren Erwachsenen signifikant bessere Leistungen im Arbeits-

gedächtnis. Dieses Ergebnis fügt sich konsistent in Befunde zum Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität auf Gedächtnisaspekte ein (Colcombe, et al., 2004; Ruscheweyh, et al., 2011) und lenkt die Aufmerksamkeit auf den Zusammenhang von monaminergem System und kognitiver Reserve. Dopamin spielt sowohl im Zusammenhang mit der Arbeitsgedächtnisleistung (Bäckman & Nyberg, 2013; Cools, Gibbs, Miyakawa, Jagust, & D'Esposito, 2008) als auch bei Lernvorgängen und kognitiven Kontrollprozessen eine zentrale Rolle (Fiorillo, 2004; Knecht, et al., 2004). Vor dem Hintergrund, dass physische Aktivität die dopaminerge Neurotransmission zu steigern scheint (Ruscheweyh, et al., 2011), überraschen die gefundenen Ergebnisse nicht. Sie stützen die Annahme, dass körperlich-sportliche Aktivität über einen optimal beeinflussten Dopaminstoffwechsel (Cools & D'Esposito, 2011) zu einer verbesserten Arbeitsgedächtnisleistung führt (vgl. Bäckman & Nyberg, 2013) und infolge die damit assoziierte kognitive Reserve günstig beeinflusst.

Entgegen den eingangs formulierten Erwartungen unterschieden sich die drei unterschiedlich alten Sportlerteilstichproben weder im Bereich des Arbeitsgedächtnisses oder den anderen exekutiven Teilaspekten (Inhibition, Interferenz, kognitive Flexibilität) noch hinsichtlich Insgesamt der Konzentrationsleistung signifikant. Einzig im Vergleich der beiden unterschiedlich komplexen Verfahren zur Erfassung der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit zeigte sich bei dem kognitiv und motorisch komplexeren Verfahren ein altersbedingter Leistungsrückgang. Im Vergleich zur Normstichprobe des jeweiligen Verfahrens verbesserten sich die sportlich aktiven älteren Erwachsenen allerdings im Altersverlauf. Insgesamt stützen die gefundenen Ergebnisse zwei Annahmen: Aufgrund von körperlicher Aktivität bleibt einerseits ein hohes Niveau an funktioneller Plastizität erhalten und es verlangsamen sich andererseits die kognitiven Abbauprozesse (Colcombe, et al., 2006; Prakash, et al., 2011; Weinstein, et al., 2012). Diese Befunde der kognitiven Leistungsfähigkeit, erfasst durch eher statische Einmalmessungen, ergänzen konsistent die gefundenen Ergebnisse bei der kognitiven Reserve, bei der ein dynamisches Verfahren zur Erfassung verwendet wurde.

Die Analyse von Korrelationsmaßen in Zusammenhang mit der kognitiven Reserve und ausgewählten Fragebogenmaßen ergab drei interessante Aspekte, die nachfolgend dargestellt werden sollen (vgl. Korrelationsmatrix im Anhang E):

(a) Die kognitive Reserve steht auch in der zweiten Studie im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. Um eine erste Einordnung des Reservekonstruktes im Kontext von Bewegung

zu ermöglichen, wurden Korrelationen sowohl mit neuropsychologischen Leistungs- als auch Fragebogenmaßen berechnet. Dabei erwiesen sich die kognitive Flexibilität, die Interferenzleistung und das Kurzzeitgedächtnis, sowie erwartungsgemäß die fluide Intelligenz als signifikante Korrelate dieses Konstruktes. Einen wichtigen Beitrag in Richtung einer bislang noch ausstehenden Konstruktvalidierung leistete Satz (2011) mit der Vorstellung seines 4-Faktoren-Modells der kognitiven Reserve. Dieses theoretische Modell definiert das Reservekonzept nicht durch einen einzelnen Indikator, wie es traditionell zumeist geschah, sondern durch die vier Faktorengruppen „Allgemeine Intelligenz“, „Komplexe mentale Aktivität“, „Verarbeitungsressourcen“ und „Exekutive Funktionen“ (Satz, et al., 2011). Die gefundenen Ergebnisse stehen insgesamt in Einklang mit dem 4-Faktoren-Modell und stützen diesen Ansatz: Fluide Intelligenz aus der ersten Faktorengruppe, Kontemplation aus der zweiten Faktorengruppe, Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis sowie kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit aus der dritten Faktorengruppe sowie Interferenz und kognitive Flexibilität aus der vierten Faktorengruppen stehen im signifikanten Zusammenhang mit der kognitiven Reserve.

(b) Der Einfluss von körperlicher Aktivität auf die Lebenszufriedenheit ist bereits seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung. Die Lebenszufriedenheit kann dabei stark von dem sozialen Umfeld Sport profitieren (vgl. Rejeski & Mihalko, 2001). In der vorliegenden Studie korreliert, auf insgesamt hohem Niveau, das Ausmaß an körperlicher Aktivität signifikant sowohl mit der gegenwärtigen als auch mit der zukünftigen Lebenszufriedenheit. Somit scheint innerhalb der Sportlergruppe ein Mehr an körperlicher Bewegung mit einer noch größeren aktuellen und erwarteten Lebenszufriedenheit in Verbindung zu stehen. Ein plausibler Erklärungsansatz für diesen korrelativen Zusammenhang könnte sein, dass Menschen, die in höherem Alter noch in der Lage sind, vermehrt Sport zu treiben, noch zufriedener mit der aktuellen Lebenssituation sind und ihre Zukunft positiver beurteilen. Andersherum wäre es allerdings auch denkbar, dass Menschen die zufrieden mit ihrem Leben sind, sowohl motivational als auch physisch, länger in der Lage sind vermehrt körperlich aktiv zu bleiben. In diesem Zusammenhang könnte es von Bedeutung sein, ob jemand glaubt sich sportlich betätigen zu müssen oder ob er Spaß an körperlicher Aktivität hat: Nicht ganz unerwartet zeigte sich, dass Selbstbestimmtheit bei körperlicher Aktivität sowohl mit dem Ausmaß an sportlicher Aktivität als auch mit dem Body-Mass-

Index korrelierten: Je höher die intrinsische Motivation bei der Sportausübung, desto mehr Sport wird gemacht und desto niedriger der BMI (vgl. Deci & Ryan, 2012).

(c) Intellektuelles Engagement, neuerdings oft mit griffigen Ausdrücken wie „use it or lose it“ auch im höheren Lebensalter eingefordert (vgl. Hultsch, et al., 1999), gilt als wichtiger, wenn nicht sogar entscheidender Faktor für den Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter (Kramer, et al., 2004; Marioni, 2012). Von den in dieser Studie mit sportlichen älteren Erwachsenen untersuchten Teilaspekten des intellektuellen Engagements „Neugier“, „Lesen“ und „Kontemplation“ (vgl. Wilhelm, et al., 2003) war nur Letzterer signifikant mit der kognitiven Reserve assoziiert. Unter Kontemplation wird bei diesem Testverfahren intellektuelles Verhalten verstanden, das weniger instrumentell auf ein Ziel ausgerichtet ist, sondern mehr aus intellektueller Neugier sowie Spaß an herausforderndem Denken und komplizierten Problemen gespeist wird (Wilhelm, et al., 2003). Neben der kognitiven Reserve korrelierten die kognitive Flexibilität, die Interferenzleistung, die Konzentration sowie die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit signifikant mit Kontemplation. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass es vermutlich nicht nur einen Unterschied macht, ob Menschen überhaupt intellektuell aktiv leben, sondern auch welcherart dieses intellektuelle Engagement ist. Lesen und Neugier scheinen zumindest bei den untersuchten Sportlern weniger Einfluss auf kognitive Leistungen zu haben als Kontemplation.

Ergänzende Analyse:

Nachdem in beiden Studien dieser Arbeit das gleiche Verfahren zur Erfassung der kognitiven Reserve verwendet wurde, gelten die im Abschnitt 5.6 (S. 85) gemachten Aussagen zur Charakteristik und den Anforderungen des Verfahrens hier entsprechend.

Auch in Studie II wurden die sportlich aktiven Studienteilnehmer mit den sportlich nicht explizit aktiven Gleichaltrigen hinsichtlich ihrer Konsistenz bei den Leistungsverläufen verglichen. Die Berechnung erfolgte analog zu Studie I (vgl. S. 85 f.). Es zeigte sich erneut ein signifikanter Gruppenunterschied, $t(59) = -5.08, p < .001$: Die Kontinuität der sportlich aktiven älteren Erwachsenen ($M = 1.72, SD = 1.18$) war signifikant höher als die der gleichaltrigen Vergleichsgruppe ($M = 2.49, SD = 1.12$). Letztere zeigten im Durchschnitt etwa 0.8 Durchgänge mit reduzierter Leistung mehr als die Sportlergruppe. Wenn man das berechnete Konsistenzmaß nun als Hinweis auf die volitiven Fähigkeiten der Probanden akzeptiert, bestätigte sich, dass körperlich-sportliche Aktivität zu Unterschieden im Bereich

der volitiven Fähigkeiten führte, die wiederum mit dem Ausmaß der kognitiven Reservekapazität assoziiert waren. Ebenso wie die sportlich aktiven Schüler in Studie I hätten demzufolge auch sportliche ältere Erwachsene größere Ressourcen hinsichtlich ihrer Selbstregulation und infolgedessen eine geringere Selbsterschöpfung (engl.: ego depletion), die sie herausfordernde Situationen volitiv besser bewältigen lassen als ihre Vergleichsprobanden (vgl. Baumeister, et al., 1998; Hagger, et al., 2010; Muraven & Baumeister, 2000).

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung des Zusammenhangs von kognitiver Reserve und körperlicher Bewegung, der insbesondere bei älteren Menschen von großer Bedeutung ist, soll hier abschließend aufgegriffen werden. Neben bekannten Einflussgrößen wie der kognitiven Struktur, dem intellektuellen Engagement, dem sozioökonomischen Status und der Bildung auf die kognitive Reserve, könnte darüber hinaus das Ernährungsverhalten eine wichtige Rolle spielen. Forschungsbefunde in den letzten Jahren lassen vermuten, dass kognitive Fähigkeiten und damit möglicherweise auch die kognitive Reserve von Ernährungsgewohnheiten beeinflusst werden (van Praag, 2009). Dies scheint gerade auch für ältere Menschen zu gelten (Kaplan, Greenwood, Winocur, & Wolever, 2001). Mit dem Älterwerden reduziert sich die Nahrungsaufnahme. Ältere Menschen verlieren ab dem 70. Lebensjahr aufgrund physiologischer Prozesse oft Gewicht, die Gefahr einer Mangelversorgung steigt (Hickson, 2006; Wilson & Morley, 2003). Verschiedene Untersuchungen konnten zeigen, dass körperlich-sportliche Aktivität die Nahrungsaufnahme bei älteren Menschen steigert und so eine bessere Versorgung mit essentiellen Nahrungsbestandteilen gewährleistet ist (siehe Morley, 2001). Dies könnte insbesondere für ältere Erwachsene über 70 Jahre und älter bedeuten, dass bei ihnen der Zusammenhang zwischen Bewegung und kognitiver Reserve durch die Ernährung vermittelt wird. Zukünftige Studien müssen zeigen, ob sich diese Hypothese bestätigen lässt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Hinsichtlich der kognitiven Reserve zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie II einen deutlichen Unterschied zugunsten der sportlich aktiven älteren Erwachsenen. Im Altersverlauf zeigte sich die Reservekapazität als sehr stabil. Körperlich-sportliche Aktivität, vermittelt über die oben dargestellten neurobiologischen Mechanismen, ist ein wichtiger Wirkfaktor kognitiver Plastizität. Deshalb liegt es nahe, den signifikanten Unterschied zur Vergleichsgruppe und den Erhalt der kognitiven Reserve über die Zeit mit dem guten

Fitnessniveau der Sportlergruppe zu erklären. Diesen angenommenen Kausalzusammenhang gilt es zukünftig zu prüfen. Weiterhin sollte sowohl der Einfluss selbstregulatorischer Aspekte als auch die Auswirkung von Ernährung in Zusammenhang mit dem Reservekonzept untersucht und gegebenenfalls berücksichtigt werden. Die Stabilität der kognitiven Reserve über die Sportlerteilstichproben hinweg findet ihre Entsprechung bei den exekutiven Leistungen und der Konzentrationsleistung. Die untersuchten Altersgruppen unterschieden sich diesbezüglich nicht signifikant. Nachteilig für die vorliegende Studie war, dass die Rohdaten der Vergleichsgruppe nicht zur Verwendung freigegeben wurden und so verschiedene Analysen alternativ berechnet werden mussten. Außerdem fehlten deshalb relevante Informationen aus dem Bereich der exekutiven Funktionen. Das insgesamt sehr hohe Intelligenzniveau der Studienteilnehmer schränkt die ökologische Validität der Studie möglicherweise etwas ein. Zukünftige Studien sollten dies berücksichtigen. Insgesamt stützen auch die Ergebnisse dieser zweiten Studie die Hypothese, dass körperliche Bewegung ein wichtiger Wirkfaktor für die kognitive Reserve ist und insbesondere für die alltäglichen Anforderungen im Alter hilfreich sein dürfte.

7 Abschlussdiskussion

Die zwei Studien der vorliegenden Arbeit demonstrieren deutlich den Zusammenhang von körperlicher Bewegung und kognitiver Reserve. Offensichtlich kann dieses Reservepotential sowohl im Schulkind- als auch im höheren Erwachsenenalter durch sportliche Aktivität bedeutsam gesteigert werden. Bei den sportlich aktiven adoleszenten Schulkindern der Studie I ebenso wie bei den älteren Erwachsenen der Studie II konnte im Unterschied zu den jeweiligen Vergleichsgruppen ein signifikant größeres Lernpotential als Ausdruck einer größeren kognitiven Reserve festgestellt werden. Der Anstieg der Leistungen im ZST über 10 Übungsdurchgänge hinweg, bestätigte in allen untersuchten Gruppen beider Studien grundsätzlich das Vorliegen bzw. den Erhalt von kognitiver Plastizität. Allerdings unterschied sich das Ausmaß dieser kognitiven Reserve sowohl bei adoleszenten Jugendlichen als auch älteren Erwachsenen signifikant zwischen sportlich aktiven und sportlich nicht explizit aktiven Studienteilnehmern. Studie I zeigte, dass sportliche Jugendliche signifikant mehr von den Lerndurchgängen profitieren, als ihre weniger aktiven Mitschüler. Diese Interaktion zwischen sportlicher Aktivität und Lerndurchgängen konnte für Studie II aufgrund der fehlenden Daten rechnerisch nicht verifiziert werden. Die unterschiedliche Veränderung des Übungsgewinns in beiden Teilnehmergruppen über die 10 Durchgänge hinweg, zeigte jedoch deutlich, dass auch die körperlich-aktiven älteren Erwachsenen, ebenso wie die sportlichen Jugendlichen in Studie I, einen deutlichen Vorteil bei dieser Interaktion hatten.

Studienübergreifende Vergleiche

Beim studienübergreifenden, deskriptiv durchgeführten Vergleich der kognitiven Reserve, stellte man bei den körperlich inaktiven (bzw. nicht explizit aktiven) Studienteilnehmern einen tendenziellen Unterschied zugunsten der älteren Erwachsenen fest: Der Übungsgewinn war deskriptiv größer ($M = 16.46$, SD fehlt) als bei adoleszenten Schülern ($M = 13.61$, $SD = 11.29$). Dieser Befund entsprach den Erwartungen und ist zum einen mit den kognitiven Herausforderungen erklärbar, die ältere Erwachsene im Verlaufe ihres Lebens zu bewältigen hatten und die dazu beitrugen eine Reservekapazität aufzubauen (vgl. Foubert-Samier, et al., 2012; Steffener, et al., 2014). Zum anderen war das Bildungsniveau der älteren Erwachsenen in dieser Studie sehr hoch (vgl. Abschnitt 6.3.2). Insgesamt hatten die im geringeren Umfang körperlich aktiven jedoch ein deutlich niedrigeres Niveau bei der

kognitiven Reserve als die sportlich Engagierten. Interessant dabei ist, dass es, zumindest in dieser Studie, keinen großen Unterschied zwischen jungen und älteren Sportlern gab: Die älteren Erwachsenen ($M = 23.37$, $SD = 10.07$) erreichten den gleichen Übungsgewinn wie die adoleszenten Schulkinder ($M = 23.13$, $SD = 10.45$) und bewegten sich so hinsichtlich der kognitiven Reserve auf vergleichbarem Niveau. Zukünftige Untersuchungen müssen bestätigen, ob körperliche Bewegung tatsächlich in allen Altersbereichen vergleichbare Effekte bezüglich der kognitiven Reserve bewirkt. Der zweite studienübergreifende Vergleich betrifft mit dem Konsistenzmaß die volitiven Fähigkeiten der Teilnehmer und ergänzt widerspruchsfrei die zuvor dargestellten Befunde. Bei den körperlich weniger aktiven Probanden wurde wiederum ein tendenzieller Unterschied zugunsten der älteren Erwachsenen festgestellt: Diese zeigten weniger leistungsreduzierte Durchgänge ($M = 2.49$, $SD = 1.12$) als die adoleszenten Schülern ($M = 3.12$, $SD = 1.42$), was auf die, im Altersbereich der Adoleszenz noch in Entwicklung befindlichen, exekutiven Funktionen zurückgeführt werden kann. Aber auch bei dieser Analyse hatten die körperlich-sportlichen Probanden deutliche Vorteile: Die älteren Erwachsenen zeigten insgesamt die niedrigste Rate an leistungsreduzierten Durchgängen ($M = 1.72$, $SD = 1.18$) und waren damit auch besser als die sportlich aktiven Schulkinder ($M = 2.25$, $SD = 1.22$), bei denen sich wiederum die noch unvollständig entwickelten exekutiven Funktionen bemerkbar machen dürften. Insgesamt hat körperlich-sportliche Aktivität offensichtlich Einfluss auf die volitiven Fähigkeiten. Ob dies direkt über die oben dargestellten neurobiologischen Wirkmechanismen oder indirekt über die Erfahrungen im Umfeld Sport erklärt werden kann, muss hier offen bleiben. Jedenfalls deutet Einiges darauf hin, dass volitive Fähigkeiten im Zusammenhang mit der KR eine wichtige Rolle spielen könnten und deshalb zukünftig berücksichtigt werden sollten.

Dosis-Wirkungs-Beziehung

Nur auf Basis der hier vorliegenden Daten beider Studien können noch keine konkreten Aussagen zum Mindestumfang an körperlicher Bewegung gemacht werden, der zu positiven Effekten auf die kognitive Reserve führt. Allerdings erscheint das Ausmaß an physischer Aktivität in keiner der beiden Sportlergruppen außergewöhnlich hoch. Die sportlichen Schulkinder der Studie I erfüllen mit 6.79 Stunden körperlich-sportlicher Aktivität in der Woche gerade den empfohlenen Umfang (Hallal, et al., 2012) und repräsentieren damit keine Extremgruppe (vgl. Tabelle 2). Für ältere Erwachsene empfiehlt das American College

of Sports Medicine (ACSM) in Zusammenarbeit mit der American Heart Association (AHA) 150 Minuten körperlich-sportliche Aktivität pro Woche (Chodzko-Zajko et al., 2009). Dabei werden alle körperlichen Aktivitäten rund um den Haushalt, im beruflichen Zusammenhang sowie Freizeit- oder Sportaktivitäten mit eingerechnet. Von den älteren Erwachsenen der Studie II waren 25 Prozent weniger als 60 Minuten, etwa 32 Prozent zwischen 60 und 180 Minuten sowie 43 Prozent über 180 Minuten pro Woche körperlich aktiv (vgl. Tabelle 12). Dies bedeutet, dass etwa die Hälfte der Stichprobe mehr und die andere weniger körperliche Aktivität realisierten als empfohlen. Auch hier ist demzufolge davon auszugehen, dass es sich um eine sportliche, aber keinesfalls um eine extrem selektierte Stichprobe älterer Erwachsener handelte. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass ein moderates Ausmaß an körperlich-sportlicher Aktivität auszureichen scheint, um sowohl bei adoleszenten Kindern als auch bei älteren Erwachsenen positive Veränderungen im Gehirn auszulösen. Diese Veränderungen im vaskulären Bereich sowie bei den Neurotransmittern und Neurotrophinen scheinen sich als Leistungsvorteil beim Aufbau und Erhalt der kognitiven Reserve zu manifestieren.

Kognitive Reserve und „metabolic reserve“

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die Aussage von Jones et al. (2011), der körperliche Aktivität grundsätzlich für geeignet hält, die kognitive Reserve zu verändern. Neben den bekannten Einflüssen von Intelligenz, intellektuellem Engagement, Bildung und beruflichem Erfolg, vermehrt sich die empirische Evidenz, dass körperliche Bewegung ein weiterer wichtiger Wirkfaktor sowohl für den Aufbau als auch den Erhalt der kognitiven Reserve ist. Eine größere Reservekapazität bedeutet, unter herausfordernden Bedingungen ein größeres Potential an Lern- und Anpassungsfähigkeit zur Verfügung zu haben. Neben diesem kompensatorischen Konzept der kognitiven Reserve spielt körperlich-sportliche Aktivität auch in dem neuroprotektiv orientierten Ansatz der „*metabolic reserve*“ von Stranahan und Mattson (2012) eine wichtige Rolle. Die Autoren bewerten körperliche Bewegung und sportliches Training als wichtige Schutzfaktoren für den Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter. Die gefundenen Ergebnisse, insbesondere die der Studie II dieser Arbeit, sind nicht nur kompatibel mit diesem Ansatz, sie bestätigen dessen zentrale Argumentation: Die Qualität der bidirektionalen Beziehung von Energiestoffwechsel und Kognition kann entweder altersbedingte neuropathologische Prozesse auslösen – oder vor ihnen schützen! Körperliche Bewegung hat dabei einen günstigen Einfluss auf verschiedene Mediatoren dieser Beziehung,

wie den Insulin-, Zucker- und Fettstoffwechsel. Positive Auswirkung zeigen sich zudem infolge der allgemeinen Energiebilanz, dem neuronalen Überleben, der synaptischen Plastizität, der Neurogenese und den Neurotrophinen (Stranahan, 2012).

Enriched environment

Wenn Lernen ausnahmslos durch die Interaktion zwischen sich verändernden Umwelten und dem eigenen Verhalten ausgelöst wird (Lindenberger, et al., 2006), so ist es zwingend für den Erhalt der Lern- und damit Anpassungsfähigkeit notwendig, Gelegenheiten zur Interaktion aufrechtzuerhalten, um diese Fähigkeiten zu trainieren. Je reizärmer die Lebensumwelt eines Menschen, desto weniger Anlass gibt es, sich durch Lernen neu anpassen zu müssen. Dies führt dazu, dass sich die kognitive Leistungsfähigkeit junger Menschen nicht vollständig entwickelt (Posner & Rothbart, 2007) und sich diese bei älteren Menschen unverhältnismäßig früh abbaut (Hertzog, Kramer, Wilson, & Lindenberger, 2008). Der englische Ausdruck „*enriched environment*“ bezieht sich ganz allgemein auf anregende Bedingungen für das Gehirn, aufgrund der physischen und sozialen Umgebung (vgl. van Praag, et al., 2000). Dass Lebenserfahrung und die eigene Umwelt großen Einfluss sowohl auf die neuronale als auch kognitive Entwicklung nehmen, formulierte Hebb bereits vor über 50 Jahren (Hebb, 1949). Die positiven Effekte einer stimulierenden Umwelt in Zusammenhang mit neuronaler Plastizität sind bei Tieren schon lange gut belegt (für eine Zusammenfassung siehe Nithianantharajah & Hannan, 2006). Die empirische Evidenz für diesen Einfluss beim Menschen wächst aktuell stetig (u.a. Halperin & Healey, 2011; Kramer, et al., 2004). Im Modell der kognitiven Reserve, ursprünglich in Zusammenhang mit der Entstehung von Demenz entwickelt und konzeptioneller Rahmen dieser Arbeit, spielen diese Umfeldfaktoren eine wichtige Rolle (Scarmeas & Stern, 2003; Scarmeas & Stern, 2004). Auch für die Förderung der kognitiven Entwicklung bei Kindern, sind stimulierende Umfeldbedingungen von großer Bedeutung (Diamond, et al., 2007; Kubesch & Walk, 2009; Maynard & Waters, 2007). In unserer bewegungsarmen Welt kann dabei körperliche Aktivität eine zunehmend zentrale Rolle spielen. Physische und soziale Herausforderungen im Rahmen eines aktiven Lebensstils stellen anregende Bedingungen für das Gehirn dar, die Voraussetzung für den Aufbau und Erhalt der kognitiven Leistungsfähigkeit sind. Physische Trainingsreize, aber auch soziale Beziehungen, ermöglichen im Kontext „Sport“ eine vielfältige kognitive wie sensorische Stimulation, die zu neuronalen und kognitiven Modifikationen führt. Dies gilt gleichermaßen für sich noch in der

Entwicklung befindliche Kinder wie für älter werdende Erwachsene (vgl. Gow, Mortensen, & Avlund, 2012; Rowland, 2012). Fehlen oder reduzieren sich bei ihnen neue, anregende und herausfordernde Umfeldreize, so kommt es zu einer Beeinträchtigung der kognitiven Entwicklung bei Kindern und zu verfrühtem kognitiven Abbau bei älteren Menschen (Hertzog, et al., 2008; Illingworth, Nair, & Russell, 2013). Es kann nun letztendlich nicht ausgeschlossen werden, dass junge wie ältere sportlich aktive Studienteilnehmer von den stimulierenden Umfeldbedingungen im Rahmen ihrer Sportausübung profitieren konnten. Andererseits sind vergleichbar stimulierende Bedingungen auf die Kognition auch durch einen musikalischen oder anderweitig kulturellen Kontext denkbar, insbesondere vor dem Hintergrund des außergewöhnlich hohen Bildungsniveaus der Vergleichsgruppe.

Stress

So wie sensorische Deprivation negative Folgen für die kognitive Leistungsfähigkeit haben kann, ist auch der umgekehrte Fall einer Reizüberflutung in der heutigen Welt denkbar und für die Kognition ungünstig. Beide Situationen können als Umweltfaktoren beim Menschen Stress auslösen (McEwen, 2007). Grundsätzlich entsteht Stress, wenn das physische und emotionale Wohlbefinden eines Menschen in einem solchen Ausmaß gefährdet ist, dass er seine eigenen Fähigkeiten zur Situationsbewältigung als unzureichend bewertet (Gunnar & Quevedo, 2007). In den Frühphasen des Lebens kann Stress durch physischen oder emotionalen Missbrauch, soziale Deprivation oder andere häusliche Missstände ausgelöst werden und zu affektiven Defiziten und kognitiven Problemen führen. Neben den emotionalen Beeinträchtigungen sind davon im kognitiven Bereich insbesondere die exekutiven Funktionen betroffen, was sich in einer reduzierten intellektuellen Leistungsfähigkeit und verminderter Schulleistung manifestiert (Pechtel & Pizzagalli, 2011). Bei älteren Erwachsenen korreliert das Ausmaß an wahrgenommenem Stress sowohl mit der kognitiven Leistungsfähigkeit als auch dem Ausmaß kognitiven Abbaus: Je höher das Stressniveau, desto schlechter die kognitiven Leistungen und desto ausgeprägter der kognitive Abbau (Aggarwal et al., 2014). Insgesamt scheint ein über längere Zeit erhöhtes Glucocorticoidniveau infolge von Stress, negativen Einfluss auf die Kognition zu haben (Marin et al., 2011). Dabei kommt es zu strukturellen Veränderungen insbesondere der präfrontalen Regionen (Arnsten, 2009; McEwen & Morrison, 2013) und des Hippocampus (Sapolsky, 1996). Seit einigen Jahren wird körperliche Aktivität als ausgleichender Faktor in Zusammenhang mit Stress diskutiert (Brown, 1991; Roth & Holmes, 1987). Neuere Studien mit

Erwachsenen im mittleren und höheren Lebensalter liefern weitere Hinweise für den Stresspuffereffekt von Sport (Gerber, Kellmann, Hartmann, & Pühse, 2010; Klaperski, Seelig, & Fuchs, 2012; Rimmele et al., 2007), insbesondere bei jenen Personen, die viel Stress erleben (Reiner, Niermann, Krapf, & Woll, 2013; Rueggeberg, Wrosch, & Miller, 2012). Die sportlichen Schulkinder der Studie I begannen früh, durchschnittlich im 7. Lebensjahr, mit ihrer Sportausübung. Fast zwei Drittel der körperlich-aktiven älteren Erwachsenen aus der Studie II betrieben ein Leben lang Sport. Möglicherweise konnten diese Personen auch aufgrund ihrer langjährigen Bewegungsaktivität die negativen Folgen ihres Stresserlebens besser abpuffern, als die Teilnehmer in den Vergleichsgruppen.

Leistungsaspekte der Reserveerfassung

Ausgehend von der Annahme, dass Motive in engem Zusammenhang mit persönlichen Bedürfnissen stehen und modulierend in die Handlungssteuerung eingreifen (Atkinson, 1958; Heckhausen, 1989; McClelland, 1985), konzentriert sich die moderne motivationspsychologische Forschung insbesondere auf drei Basismotive (Kuhl, 2001). Neben dem Anschluss- und Machtmotiv ist das Leistungsmotiv mit der damit assoziierten Leistungsmotivation von großer Bedeutung für menschliches Handeln (McClelland, Atkinson, Clark, & Lowell, 1953). Gerade im Kontext von Sport und körperlicher Bewegung erscheint es deshalb sinnvoll über die Leistungsmotivation als möglichen Einflussfaktor auf die Studienergebnisse nachzudenken. Die aktuelle Motivation in einer Situation ergibt sich immer aus einer Interaktion von Persönlichkeitseigenschaften, hier insbesondere die Ausprägung des Leistungsmotivs, und Aspekten von Anreiz und Erwartung in dieser speziellen Situation (Rheinberg, 2002). Es ist nun gut vorstellbar, dass Menschen mit einem hoch ausgeprägten Leistungsmotiv die geforderte Aufgabe im Rahmen des „*Testing-the-limits*“-Ansatzes als herausfordernder erleben und infolge eine größere Leistungsmotivation bei dieser Erfassung der kognitiven Reserve entwickeln, als Menschen mit geringerer Ausprägung des Leistungsmotivs. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Leistungsmotiv in den ersten zehn Lebensjahren bis zu einem relativ stabilen, aber nicht unveränderlichen Niveau entwickelt (Beckmann, Elbe, Szymanski, & Ehrlenspiel, 2006; Heckhausen & Roelofsen, 1962). Für Beckmann et al. (2006) sind solche Veränderungen gerade im sportlichen Kontext möglich (vgl. Hecker, 1984; Winterstein, 1991). Nachteilig für die Aussagekraft der gefundenen Studienergebnisse wäre nun, wenn nur die sportlichen Studienteilnehmer aufgrund ihrer körperlichen Aktivität ein größer ausgeprägtes Leistungs-

motiv und infolge eine höhere Leistungsmotivation in der Testsituation hätten. Aus zwei Gründen scheint dies hier allerdings nicht notwendigerweise gegeben: Zum einen ist Leistungsmotivation wie dargestellt über das Leistungsmotiv hinaus situationsabhängig. Sportler müssten systematisch ein erfolgreiches Abschneiden in der Testsituation persönlich wichtiger bewerten und überzeugter davon sein, dies mit ihrem Verhalten erreichen zu können, als die jeweilige Vergleichsgruppe (Rheinberg, 2002). Zum anderen erscheint es zumindest gewagt, bei jungen sportlich inaktiven Gymnasiasten in der heutigen G8-Realität sowie bei älteren Teilnehmern eines universitären Seniorenstudiums mit außerordentlich hohem Bildungsstand, a priori und ohne zusätzliche Informationen, von einer geringeren Leistungsmotivation in der Testsituation auszugehen. Trotzdem sollte dieser Punkt im Rahmen zukünftiger Forschung berücksichtigt werden.

Ein weiterer erwähnenswerter Punkt ist, dass ein großer Teil der sportlich aktiven adolescenten Schulkinder an Wettkämpfen teilnahm oder andere öffentliche Auftritte absolvierte (Triathlon, Fußball, Basketball sowie Tanz). Dies könnte zu systematisch unterschiedlichem Verhalten in der Testsituation geführt haben. Sportler, die es gewohnt sind, unter Druck Leistung bringen zu müssen, haben im Idealfall den Umgang mit solchen Situationen gelernt und können ihre maximal mögliche Leistung abrufen. Allerdings weiß man aus dem Sport auch, dass sich Menschen in Drucksituationen nicht selten über die Leistungsmotivkomponente „Furcht vor Misserfolg“ motivieren und dies häufig eher limitierend als leistungsfördernd wirkt (Atkinson, 1957; Thomassen & Halvari, 1996). Der Anteil der körperlich-aktiven älteren Erwachsenen, die früher an Wettkämpfen teilnahmen oder immer noch teilnehmen, war vernachlässigbar gering. Insgesamt erscheint es aber auch hier überlegenswert, die individuelle Erfahrung in Drucksituationen zumindest abzufragen.

Validität des modifizierten ZST

Für beide Studien der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund der Überlegungen von Stern (2002, 2009) und Zihl et al. (2014) ein modifizierter ZST als Messverfahren ausgewählt. Anstelle der Leistung bei einmaliger Durchführung des ZST, geht es bei diesem Messansatz um die Verbesserung der Testleistung durch wiederholtes Üben. Um im ZST eine gute Testleistung realisieren zu können, müssen sehr unterschiedliche kognitive Prozesse effektiv ineinander greifen. Bei der einmaligen Durchführung des ZST beeinflussen die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit, die Effizienz der visuellen Suche sowie nachrangig Gedächtnisaspekte, in Form von implizitem Lernen, das Ergebnis (Joy, et al., 2003; Joy,

Fein, Kaplan, & Freedman, 2000; Joy, Kaplan, & Fein, 2004). Dabei werden nur 1.9 Prozent aller Items ohne Abgleich mit dem Kodierungsschlüssel aus dem Gedächtnis übertragen (Stephens, 2006). Wird der ZST, wie in beiden Studien dieser Arbeit, zehnmal hintereinander durchgeführt, so verändern sich die eigentlichen Testanforderungen von Durchgang zu Durchgang nicht, wohl aber die jeweiligen Voraussetzungen des Probanden. Was passiert aber nun bei zehnmaliger Wiederholung des Verfahrens? Die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit dürfte kaum zu steigern sein, weil bereits ab dem ersten Testdurchgang instruktionsgemäß zu maximal möglicher Leistung aufgefordert wird. Eine idealtypische Augenbewegung, vom Testitem hin zum Kodierungsschlüssel oben auf dem Testbogen und wieder zurück, benötigt durchschnittlich 460 Millisekunden (Joy, et al., 2003). Zusätzlich aufaddiert werden muss die Zeit, um Zielinformationen des Kodierungsschlüssels zu lernen und zu behalten, sowie Korrektursakkaden auszuführen. Die zeitlichen Kosten können deshalb trotz einer möglichen Effizienzsteigerung der letztgenannten Prozesse nicht unter 460 Millisekunden gesenkt werden, was insgesamt die Leistungssteigerung im Test limitiert (Joy, et al., 2003). Andererseits findet bei der einmaligen Durchführung des Tests eine Übertragung von Items aus dem Gedächtnis kaum statt (s.o. Stephens, 2006), weil sie langsamer ist. Joy et al. (2003) gehen von etwa 200 Millisekunden für die Initiierung des Gedächtniszugriffs und weiteren 340 Millisekunden für den eigentlichen Zugriff aus, was langsamer ist, als die Abgleichstrategie bei jedem einzelnen Item. Bei zehnmaliger Durchführung des Tests reduziert sich die Gedächtniszugriffszeit durch immer besseres Lernen der Zahlen-Symbol-Zuordnungen jedoch deutlich. Je schneller also die Probanden die Zahlen-Symbol-Pärchen lernen (können), desto früher sind sie in der Lage von der zeitlich limitierenden Abgleichstrategie zur dann schnelleren Gedächtnisstrategie zu wechseln um so größere Übungsgewinne zu realisieren. Verschiedentliche Aussagen von Studienteilnehmer bestätigen diesen impliziten Lernvorgang: Manche Zahlen-Symbol-Pärchen waren für sie schwieriger zu memorieren als andere (vgl. auch Piccinin & Rabbitt, 1999). Die, für eine erfolgreiche Bearbeitung des modifizierten ZST erforderlichen, unterschiedlichen kognitiven Leistungen einerseits und die Komplexität jener mentalen Vorgänge, die kognitive Reserve widerspiegeln, andererseits, lassen das Testverfahren als geeignet erscheinen, kognitive Reserve valide zu erfassen (Baltes & Kühl, 1992; Jones, et al., 2011; Lindenberger & Baltes, 1995). Bis dato wurde der ZST in dieser Form nur bei gesunden Erwachsenen (Emmert, 2010; Zihl, et al., 2014) und erwachsenen Patienten (Zieger, 2010) eingesetzt. In dieser Studie kam das

Verfahren zum ersten Mal im Schulkindalter zum Einsatz. Ob sich der ZST auch als geeignetes Instrument für eine standardisierte Messung erweist, wie Zihl et al. (2014) es vorschlagen, wird zukünftige Forschung zeigen müssen.

Einschränkungen

Datengrundlage dieser Analysen ist eine freiwillige Untersuchung der kognitiven Leistungsfähigkeit mit quasi-experimentellem Design. Sowohl bei den adoleszenten Kindern als auch älteren Erwachsenen wurde gezielt in einem Personenkreis zu dieser Untersuchung eingeladen, der ein hohes oder niedriges körperlich-sportliches Engagement erwarten ließ. Bei freiwilligen Untersuchungen mit quasi-experimentellem Charakter besteht das Problem der Stichprobenselektivität. Im Umfeld Sport ist es denkbar, dass Menschen mit bereits guter Lernfähigkeit in diesem Umfeld adäquat verstärkt werden und so überzufällig häufig dort verbleiben. Ein zweiter Selektionseffekt könnte insbesondere die älteren Erwachsenen in Studie II betreffen. Es ist trotz kontrolliertem Gesundheitsstatus nicht auszuschließen, dass sich sportlich aktive Personen vermehrt für die Thematik Gesundheit interessieren und sich beispielsweise gesünder ernähren. Einschränkungen in Studie I sind, dass Intelligenz durch den Besuch der Schulart abgeschätzt wurde, kardiorespiratorische Fitness als Maß für körperliche Aktivität nicht gemessen, sondern nur selbstberichtet erfasst wurde und eine Erfassung der Arbeitsgedächtnisleistung fehlte. Letzteres ist gerade im Hinblick auf die gefundenen Unterschiede bei den älteren Erwachsenen als kritisch zu bewerten. In Studie II ist, neben den möglichen und oben bereits angesprochenen Selektionseffekten, die weitere Einschränkung zu nennen, dass die Daten der Vergleichsgruppe nicht selbst erhoben wurden. Dies ist trotz genauer Angleichung des Erhebungsablaufs ein methodischer Nachteil und schränkte die Analysemöglichkeiten aufgrund fehlender Daten im Bereich der exekutiven Funktionen und Fragebögen ein. Studienübergreifend muss als Einschränkung hingenommen werden, dass, bedingt durch das Versuchsdesign, keine kausalen Aussagen zum Zusammenhang von kognitiver Reserve und körperlicher Bewegung gemacht werden können. Das überdurchschnittliche Bildungsniveau der Teilnehmer beider Studien schränkt möglicherweise die Generalisierbarkeit der Befunde ein, was aber billiger in Kauf genommen wurde, um so die Intelligenz, als wichtigen Einflussfaktor auf die kognitive Reserve gut zu kontrollieren. Als Kritikpunkt an den durchgeführten Studien ist ein denkbarer Versuchsleiter-Bias zu nennen. Nachdem es sich um keine „Blind“-Studien handelte, ist nicht auszuschließen, dass die Erwartungen der Versuchsleiter das Ergebnis der Datenerhebung beeinflusst haben.

Ausblick

In weiteren Untersuchungen wird vorrangig zu klären sein, ob ein Kausalzusammenhang zwischen kognitiver Reserve und körperlicher Bewegung besteht. Zukünftige Interventionsstudien in verschiedenen Abschnitten des Lebens sowie Längsschnittstudien können dazu beitragen, das Potential von körperlicher Bewegung auf die kognitive Reserve und damit das Ausmaß an Lern- und Anpassungsfähigkeit näher zu bestimmen. Dabei sollten neben selbstregulatorischen und motivationalen Aspekten auch der Einfluss von Stress und Ernährung überprüft werden. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, die Veränderungen des emotionalen Erlebens bei und durch körperliche Aktivität im Zusammenhang mit der Reservekapazität zu untersuchen. Zukünftig werden neben den Verhaltensmaßen, wie sie auch in dieser Arbeit eingesetzt wurden, verstärkt moderne bildgebende sowie neuroelektrische Verfahren, einzeln und in Kombination, eingesetzt werden, um differenzierte Effekte von physischer Aktivität auf die kognitive Reserve zu erforschen. Zudem wird es wichtig sein, mehr Informationen zur Generalisierbarkeit bzw. ökologischen Validität der gefundenen Ergebnisse zu sammeln. Fernziel dabei ist, Menschen aus unterschiedlichen Altersbereichen konkrete Handlungsempfehlungen geben zu können, wie sie durch individuell abgestimmte physische Aktivität ihre kognitive Reservekapazität trainieren können.

Fazit

Die vorliegende Arbeit konnte zeigen, dass körperliche Bewegung in engem Zusammenhang mit kognitiver Reserve steht. Dies gilt sowohl für adoleszente Schulkinder als auch für ältere Erwachsene. Darüber hinaus erwiesen sich die kognitive Reserve und alle weiteren kognitiven Fähigkeiten bei den sportlich aktiven älteren Studienteilnehmern als erstaunlich stabil. Die Ergebnisse dieser Arbeit, insbesondere der Studie II, erlauben eine erste Einordnung des Reservekonstruktes im Kontext von physischer Aktivität: Kognitive Flexibilität, Interferenzleistung und Kurzzeitgedächtnis waren neben fluider Intelligenz signifikante Korrelate dieses Konstruktes und stützen das 4-Faktoren-Modell der kognitiven Reserve von Satz (2011). Eine hohe kognitive Reservekapazität zu haben, dürfte sowohl in der Adoleszenz als auch im Erwachsenenalter sehr hilfreich für die Bewältigung der herausfordernden Aufgaben im Alltag sein. Dies gilt insbesondere für den alternden Menschen, der nach einer langen Phase wahrgenommener Stabilität, zunehmend Adaptationsprozesse an sich verändernde Bedingungen meistern muss, um seine Lebensqualität möglichst lange zu

erhalten. Körperlicher Bewegung scheint dabei eine große Bedeutung sowohl für den Aufbau als auch den Erhalt der kognitiven Reserve zuzukommen. Die heutige Lebenswirklichkeit, mit ihrer Entwicklung hin zu immer weniger körperlicher Aktivität, separiert Kognition von Bewegung – zwei elementare Phänomene menschlichen Lebens – die auch aufgrund der genetischen Disposition des Menschen interaktiv zusammengehören (vgl. Kempermann et al., 2010). Das Bemühen, wieder mehr Bewegung in den Alltag zu integrieren, ist also weniger eine neuartige Idee im Rahmen eines aktuellen Modetrends, sondern vielmehr der Versuch, zur ureigenen Veranlagung des Menschen zurückzukehren.

8 Zusammenfassung

Die Anforderungen einer modernen Gesellschaft erfordern lebenslang ein hohes Maß an Lern- und Anpassungsfähigkeit. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden zwei empirische Studien mit Schulkindern sowie älteren Erwachsenen durchgeführt, um den Einfluss von körperlich-sportlicher Aktivität auf das Lernpotential und somit die Anpassungsfähigkeit zu untersuchen. Das Lernpotential als Maß für die kognitive Reserve betont die Zunahme der kognitiven Leistungsfähigkeit unter herausfordernden Bedingungen (Baltes, et al., 1995). Die Ermittlung der Reservekapazität erfolgte in beiden Studien mit Hilfe eines „*Testing-the-Limits*“-Ansatzes (Kliegl, et al., 1989). Es zeigte sich sowohl im Schulkind- als auch im höheren Erwachsenenalter ein signifikanter Zusammenhang zwischen kognitiver Reserve und körperlich-sportlicher Aktivität. Die Ergebnisse beider Studien legen den Schluss nahe, dass neben bekannten Einflussgrößen wie Intelligenz, intellektuelles Engagement, sozioökonomischer Status sowie Bildungsabschluss und beruflicher Erfolg, auch körperliche Bewegung ein bedeutender Faktor sowohl für den Aufbau als auch den Erhalt der kognitiven Reserve zu sein scheint.

Schlüsselwörter: Kognitive Reserve, Sport, Lernpotential, lebenslange Anpassungsfähigkeit.

Abstract

Throughout life, modern society requires a high degree of learning ability as well as adaptability. The dissertation presents two empirical studies in order to investigate the influence of physical activity on learning ability and thereby the adaptability in adolescents and the elderly. Learning ability is a proxy of cognitive reserve and focuses on the increase of cognitive performance under challenging conditions (Baltes, et al., 1995). A “*testing-the-limits*” paradigm was used as a measure in both studies (Kliegl, et al., 1989). Results revealed a significant relationship for cognitive reserve and physical activity in adolescents as well as in the elderly. This leads to the assumption, that in addition to the well-known parameters of cognitive reserve, such as intelligence, cognitive activity, socioeconomic status and educational and occupational achievement, physical activity seems to play an important role not only for the build-up but also for the preservation of cognitive reserve.

Keywords: cognitive reserve, physical activity, learning ability, lifelong adaptability.

Literaturverzeichnis

- Adams, J. A. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, *101*(1), 41-74.
- Aggarwal, N. T., Wilson, R. S., Beck, T. L., Rajan, K. B., Mendes de Leon, C. F., Evans, D. A., & Everson-Rose, S. A. (2014). Perceived stress and change in cognitive function among adults 65 years and older. *Psychosomatic Medicine*, *76*(1), 80-85.
- Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Herrmann, S. D., Meckes, N., Bassett, D. R. J., Tudor-Locke, C., . . . Leon, A. S. (2011). Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *43*(8), 1575-1581.
- Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Leon, A. S., Jacobs, D. R. J., Montoye, H. J., Sallis, J. F., & Paffenbarger, R. S. J. (1993). Compendium of Physical Activities: classification of energy costs of human physical activities. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *25*(1), 71-80.
- Allen, J. S., Bruss, J., Brown, C. K., & Damasio, H. (2005). Normal neuroanatomical variation due to age: the major lobes and a parcellation of the temporal region. *Neurobiology of Aging*, *26*(9), 1245-1260.
- Andel, R., Crowe, M., Pedersen, N. L., Fratiglioni, L., Johansson, B., & Gatz, M. (2008). Physical exercise at midlife and risk of dementia three decades later: a population-based study of swedish twins. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences & Medical Sciences*, *63*(1), 62-66.
- Anderson, P. (2002). Assessment and development of executive function (EF) during childhood. *Child Neuropsychology*, *8*(2), 71-82.
- Andreasen, N. C. (2002). *Brave New Brain*. Berlin: Springer.
- Andrews-Hanna, J. R., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Lustig, C., Head, D., Raichle, Marcus E., & Buckner, R. L. (2007). Disruption of large-scale brain systems in advanced aging. *Neuron*, *56*(5), 924-935.
- Arnsten, A. F. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(6), 410-422.
- Aron, A. R., Poldrack, R. A., & Wise, S. P. (2009). Cognition: basal ganglia role. *Encyclopedia of Neuroscience*, *2*, 1069-1077.

- Aster, M., Neubauer, A. C., & Horn, R. (2006). *WIE. Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene*. Frankfurt: Harcourt.
- Atkinson, J. W. (1957). Motivational determinants of risk-taking behavior. *Psychological Review*, *64*(6), 359-372.
- Atkinson, J. W. (1958). *Motives in fantasy, action, and society*. Princeton, NJ: Van Nostrand.
- Audiffren, M., Tomporowski, P. D., & Zagrodnik, J. (2009). Acute aerobic exercise and information processing: modulation of executive control in a Random Number Generation task. *Acta Psychologica*, *132*(1), 85–95.
- Azizian, A., & Polich, J. (2007). Evidence for attentional gradient in the serial position memory curve from event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(12), 2071-2081.
- Babyak, M., Blumenthal, J. A., Herman, S., Khatri, P., Doraiswamy, M., Moore, K., . . . Krishnan, K. R. (2000). Exercise treatment for major depression: maintenance of therapeutic benefit at 10 months. *Psychosomatic Medicine*, *62*(5), 633-638.
- Bäckman, L., & Nyberg, L. (2013). Dopamine and training-related working-memory improvement. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *37*(9, Part B), 2209-2219.
- Baddeley, A. D., & Sala, D. (1998). Working memory and executive control. In A. C. Roberts, T. W. Robbins & L. Weiskrantz (Hrsg.), *The prefrontal cortex* (S. 9-21). Oxford, NY: Oxford University Press.
- Baltes, M. M., & Kühl, K.-P. (1992). Testing for limits of cognitive reserve capacity: a promising strategy for early diagnosis of dementia? *Journal of Gerontology*, *47*(3), P165-P167.
- Baltes, M. M., Kühl, K.-P., Gutzmann, H., & Sowarka, D. (1995). Potential of cognitive plasticity as a diagnostic instrument: A cross-validation and extension. *Psychology and Aging*, *10*(2), 167-172.
- Baltes, P. B. (1987). Theoretical propositions of life-span developmental psychology: On the dynamics between growth and decline. *Developmental Psychology*, *23*(5), 611-626.
- Baltes, P. B., & Baltes, M. M. (1990). Psychological perspectives on successful aging: The model of selective optimization with compensation. In P. B. Baltes & M. M. Baltes (Hrsg.), *Successful Aging: Perspectives From the Behavioral Sciences* (S. 1-34). New York: Cambridge University Press.

- Baltes, P. B., Sowarka, D., & Kliegl, R. (1989). Cognitive training research on fluid intelligence in old age: What can older adults achieve by themselves? *Psychology and Aging, 4*(2), 217-221.
- Baltes, P. B., Staudinger, U. M., & Lindenberger, U. (1999). Lifespan psychology: theory and application to intellectual functioning. *Annual Review of Psychology, 50*, 471-507.
- Barnes, D. E., Whitmer, R. A., & Yaffe, K. (2007). Physical activity and dementia: the need for prevention trials. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 35*(1), 24-29.
- Barulli, D., & Stern, Y. (2013). Efficiency, capacity, compensation, maintenance, plasticity: emerging concepts in cognitive reserve. *Trends in Cognitive Sciences, 17*(10), 502-509.
- Barulli, D. J., Rakitin, B. C., Lemaire, P., & Stern, Y. (2013). The influence of cognitive reserve on strategy selection in normal aging. *Journal of the International Neuropsychological Society, 19*(07), 841-844.
- Baumeister, R. F., Bratslavsky, E., Muraven, M., & Tice, D. M. (1998). Ego depletion: is the active self a limited resource? *Journal of Personality and Social Psychology, 74*(5), 1252-1265.
- Beck, U. (1986). *Risikogesellschaft: Auf dem Weg in eine andere Moderne* (5. Auflage). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Beck, U. (2007). *Weltrisikogesellschaft: Auf der Suche nach der verlorenen Sicherheit*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Beckmann, J., Elbe, A.-M., Szymanski, B., & Ehrlenspiel, F. (2006). *Chancen und Risiken: Vom Leben im Verbundsystem von Schule und Leistungssport : psychologische, soziologische und sportliche Leistungsaspekte* (1. Auflage). Köln: Sportverlag Strauss.
- Beckmann, J., & Kazén, M. (1994). Action and state orientation and the performance of top athletes. In J. Kuhl & J. Beckmann (Hrsg.), *Volition and Personality: Action versus State Orientation* (S. 439-451). Seattle: Hogrefe & Huber Publishers.
- Best, J. R., Miller, P. H., & Jones, L. L. (2009). Executive functions after age 5: changes and correlates. *Developmental Review, 29*(3), 180-200.
- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Bécic, E. (2006). Testing the limits of cognitive plasticity in older adults: application to attentional control. *Acta Psychologica, 123*(3), 261-278.

- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Becic, E. (2008). Transfer effects in task-set cost and dual-task cost after dual-task training in older and younger adults: further evidence for cognitive plasticity in attentional control in late adulthood. *Experimental Aging Research*, 34(3), 188-219.
- Biddle, S. J., Gorely, T., & Stensel, D. (2004). Health-enhancing physical activity and sedentary behaviour in children and adolescents. *Journal of Sports Sciences*, 22(8), 679-701.
- Black, J. E., Isaacs, K. R., Anderson, B. J., Alcantara, A. A., & Greenough, W. T. (1990). Learning causes synaptogenesis, whereas motor activity causes angiogenesis, in cerebellar cortex of adult rats. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(14), 5568-5572.
- Blakemore, S.-J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: implications for executive function and social cognition. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(3-4), 296-312.
- Borenstein Graves, A., Mortimer, J. A., Bowen, J. D., McCormick, W. C., McCurry, S. M., Schellenberg, G. D., & Larson, E. B. (2001). Head circumference and incident Alzheimer's disease: modification by apolipoprotein E. *Neurology*, 57(8), 1453-1460.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624-652.
- Boyle, P. A., Wilson, R. S., Yu, L., Barr, A. M., Honer, W. G., Schneider, J. A., & Bennett, D. A. (2013). Much of late life cognitive decline is not due to common neurodegenerative pathologies. *Annals of Neurology*, 74(3), 478-489.
- Braak, H., & Braak, E. (1997). Frequency of stages of Alzheimer-related lesions in different age categories. *Neurobiology of Aging*, 18(4), 351-357.
- Brayne, C. (2007). The elephant in the room—healthy brains in later life, epidemiology and public health. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(3), 233-239.
- Brayne, C., Ince, P. G., Keage, H. A. D., McKeith, I. G., Matthews, F. E., Polvikoski, T., & Sulkava, R. (2010). Education, the brain and dementia: neuroprotection or compensation? *Brain*, 133(8), 2210-2216.
- Brickenkamp, R. (2002). *Test d2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test (9., überarbeitete und neu normierte Auflage)*. Göttingen: Hogrefe.
- Brock, D. (2012). *Die klassische Moderne: Moderne Gesellschaften*. Wiesbaden: VS - Verlag für Sozialwissenschaften.

- Brown, J., Cooper-Kuhn, C. M., Kempermann, G., Van Praag, H., Winkler, J., Gage, F. H., & Kuhn, H. G. (2003). Enriched environment and physical activity stimulate hippocampal but not olfactory bulb neurogenesis. *European Journal of Neuroscience*, *17*(10), 2042-2046.
- Brown, J. D. (1991). Staying fit and staying well: physical fitness as a moderator of life stress. *Journal of Personality and Social Psychology*, *60*(4), 555-561.
- Buck, S. M., Hillman, C. H., & Castelli, D. M. (2008). The relation of aerobic fitness to stroop task performance in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *40*(1), 166–172.
- Buckner, R. L., Andrews-Hanna, J. R., & Schacter, D. L. (2008). The Brain's Default Network. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1124*(1), 1-38.
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietrabyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P., & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, *441*(2), 219-223.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2013a). Das Wissenschaftsjahr 2013 - Die demografische Chance. Abgerufen am 26.04.2013, verfügbar unter <http://www.bmbf.de/de/21029.php>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2013b). Den demografischen Wandel aktiv gestalten. Abgerufen am 26.04.2013, verfügbar unter <http://www.bmbf.de/de/4657.php>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2013c). Programm für Lebenslanges Lernen. Abgerufen am 01.09.2013, verfügbar unter <http://www.bmbf.de/archiv/newsletter/de/919.php?hilite=LebenslangesLernen>
- Burdette, J. H., Laurienti, P. J., Espeland, M. A., Morgan, A., Telesford, Q., Vechlekar, C. D., . . . Kraft, R. A. (2010). Using network science to evaluate exercise-associated brain changes in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *2*, 1-10.
doi:10.3389/fnagi.2010.00023
- Byrne, N. M. (2005). Metabolic equivalent: one size does not fit all. *Journal of Applied Physiology*, *99*(3), 1112–1119.
- Carlson, S. M. (2003). Executive function in context: development, measurement, theory, and experience. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, *68*(3), 138-151.

- Carro, E., Nuñez, A., Busiguina, S., & Torres-Aleman, I. (2000). Circulating insulin-like growth factor I mediates effects of exercise on the brain. *The Journal of Neuroscience*, *20*(8), 2926-2933.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, *280*, 747-749.
- Casey, B. J., Getz, S., & Galvan, A. (2008). The adolescent brain. *Developmental Review*, *28*(1), 62-77.
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: Their structure, growth, and action*. Boston: Houghton Mifflin.
- Chaddock-Heyman, L., Erickson, K. I., Voss, M. W., Powers, J. P., Knecht, A. M., Pontifex, M. B., . . . Kramer, A. F. (2013). White matter microstructure is associated with cognitive control in children. *Biological Psychology*, *94*(1), 109-115.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., VanPatter, M., . . . Kramer, A. F. (2010a). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Research*, *1358*, 172-183.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., VanPatter, M., Voss, M. W., Pontifex, M. B., . . . Kramer, A. F. (2010b). Basal ganglia volume is associated with aerobic fitness in preadolescent children. *Developmental Neuroscience*, *32*(3), 249-256.
- Chaddock, L., Hillman, C. H., Buck, S. M., & Cohen, N. J. (2011a). Aerobic fitness and executive control of relational memory in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *43*(2), 344-349.
- Chaddock, L., Pontifex, M. B., Hillman, C. H., & Kramer, A. F. (2011b). A review of the relation of aerobic fitness and physical activity to brain structure and function in children. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *17*(6), 975-985.
- Chang, Y. K., Labban, J. D., Gapin, J. I., & Etnier, J. L. (2012). The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis. *Brain Research*, *1453*, 87-101.
- Chao, L. L., DeCarli, C., Kriger, S., Truran, D., Zhang, Y., Laxamana, J., . . . Weiner, M. W. (2013). Associations between white matter hyperintensities and β amyloid on integrity of projection, association, and limbic fiber tracts measured with diffusion tensor MRI. *PLoS ONE*, *8*(6), 1-8. doi:10.1371/journal.pone.0065175
- Chaouloff, F. (1989). Physical exercise and brain monoamines: a review. *Acta Physiologica Scandinavica*, *137*(1), 1-13.

- Charness, N. (2006). The influence of work and occupation on brain development. In P. B. Baltes, P. A. Reuter-Lorenz & F. Rösler (Hrsg.), *Lifespan development and the brain* (S. 306-325). Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- Chodzko-Zajko, W. J., Proctor, D. N., Fiatarone Singh, M. A., Minson, C. T., Nigg, C. R., Salem, G. J., & Skinner, J. S. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(7), 1510-1530.
- Christensen, H., Henderson, A. S., Griffiths, K., & Levings, C. (1997). Does ageing inevitably lead to declines in cognitive performance? A longitudinal study of elite academics. *Personality and Individual Differences*, 23(1), 67-78.
- Christensen, L. O. D., Johannsen, P., Sinkjær, T., Petersen, N., Pyndt, H. S., & Nielsen, J. B. (2000). Cerebral activation during bicycle movements in man. *Experimental Brain Research*, 135(1), 66-72.
- Clair-Thompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745-759.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Auflage). Hillsdale (NJ): L. Erlbaum Associates.
- Cohen, N. J., & Eichenbaum, H. (1993). *Memory, amnesia, and the hippocampal system*. Cambridge (MA): MIT Press.
- Cohen, N. J., Ryan, J., Hunt, C., Romine, L., Wszalek, T., & Nash, C. (1999). Hippocampal system and declarative (relational) memory: summarizing the data from functional neuroimaging studies. *Hippocampus*, 9(1), 83-98.
- Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychological Science*, 14(2), 125-130.
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Raz, N., Webb, A. G., Cohen, N. J., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2003). Aerobic fitness reduces brain tissue loss in aging humans. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences & Medical Sciences*, 58(2), 176-180.
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., . . . Kramer, A. F. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences & Medical Sciences*, 61(11), 1166-1170.

- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., & Scalf, P. (2005). The implications of cortical recruitment and brain morphology for individual differences in inhibitory function in aging humans. *Psychology and Aging, 20*(3), 363-375.
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J., . . . Elavsky, S. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101*(9), 3316-3321.
- Cools, R., & D'Esposito, M. (2011). Inverted-U-shaped dopamine actions on human working memory and cognitive control. *Biological Psychiatry, 69*(12), e113-e125.
- Cools, R., Gibbs, S. E., Miyakawa, A., Jagust, W., & D'Esposito, M. (2008). Working Memory Capacity Predicts Dopamine Synthesis Capacity in the Human Striatum. *The Journal of Neuroscience, 28*(5), 1208–1212.
- Cooney, G. M., Dwan, K., Greig, C. A., Lawlor, D. A., Rimer, J., Waugh, F. R., . . . Mead, G. E. (2013). Exercise for depression. *The Cochrane Database of Systematic Reviews, 2013*(9), 1-160. doi:10.1002/14651858.CD004366.pub6
- Corral, M., Rodriguez, M., Amenedo, E., Sanchez, J. L., & Diaz, F. (2006). Cognitive reserve, age, and neuropsychological performance in healthy participants. *Developmental Neuropsychology, 29*(3), 479-491.
- Cotman, C. W., & Berchtold, N. C. (2002). Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends in Neurosciences, 25*(6), 295-301.
- Cotman, C. W., Berchtold, N. C., & Christie, L.-A. (2007). Exercise builds brain health: key roles of growth factor cascades and inflammation. *Trends in Neurosciences, 30*(9), 464-472.
- Crone, E. A., & Dahl, R. E. (2012). Understanding adolescence as a period of social–affective engagement and goal flexibility. *Nature Reviews Neuroscience, 13*(9), 636-650.
- Damoiseaux, J. S., Beckmann, C. F., Arigita, E. J. S., Barkhof, F., Scheltens, P., Stam, C. J., . . . Rombouts, S. A. R. B. (2008). Reduced resting-state brain activity in the “default network” in normal aging. *Cerebral Cortex, 18*(8), 1856-1864.
- Danyel, J. (2012). Zeitgeschichte der Informationsgesellschaft. *Zeithistorische Forschungen/Studies in Contemporary History, Online-Ausgabe, 9* (2). Abgerufen am 31.08.2013, verfügbar unter <http://www.zeithistorische-forschungen.de/16126041-Danyel-2-2012>

- David, J. P., & Suls, J. (1999). Coping efforts in daily life: Role of big five traits and problem appraisals. *Journal of Personality, 67*(2), 265-294.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., Boyle, C. A., Waller, J. L., Miller, P. H., Naglieri, J. A., & Gregoski, M. (2007). Effects of aerobic exercise on overweight children's cognitive functioning. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 78*(5), 510-519.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., . . . Naglieri, J. A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: a randomized, controlled trial. *Health Psychology, 30*(1), 91-98.
- Davranche, K., Hall, B., & McMorris, T. (2009). Effect of acute exercise on cognitive control required during an Eriksen Flanker Task. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 31*, 628–639.
- Davranche, K., & McMorris, T. (2009). Specific effects of acute moderate exercise on cognitive control. *Brain and Cognition, 69*(3), 565–570.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2012). Motivation, personality, and development within embedded social contexts: overview of self-determination theory. In R. M. Ryan (Hrsg.), *The Oxford Handbook of Human Motivation*. New York: Oxford University Press.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science, 5*(5), 303-305.
- Del Tredici, K., & Braak, H. (2008). Neurofibrillary changes of the Alzheimer type in very elderly individuals: neither inevitable nor benign: commentary on “No disease in the brain of a 115-year-old woman”. *Neurobiology of Aging, 29*(8), 1133-1136.
- Di Martino, A., Scheres, A., Margulies, D. S., Kelly, A. M. C., Uddin, L. Q., Shehzad, Z., . . . Milham, M. P. (2008). Functional connectivity of human striatum: a resting state fMRI study. *Cerebral Cortex, 18*(12), 2735-2747.
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science, 318*(5855), 1387-1388.
- Die deutsche Rechtschreibung* (26. Auflage). (2013). Berlin: Dudenverlag.
- Dietrich, A. (2006). Transient hypofrontality as a mechanism for the psychological effects of exercise. *Psychiatry Research, 145*(1), 79-83.
- Dietrich, A., & Sparling, P. B. (2004). Endurance exercise selectively impairs prefrontal-dependent cognition. *Brain and Cognition, 55*(3), 516–524.

- Ding, Q., Vaynman, S., Akhavan, M., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2006). Insulin-like growth factor I interfaces with brain-derived neurotrophic factor-mediated synaptic plasticity to modulate aspects of exercise-induced cognitive function. *Neuroscience*, *140*(3), 823-833.
- Ding, Y.-H., Li, J., Zhou, Y., Rafols, J. A., Clark, J. C., & Ding, Y. (2006). Cerebral angiogenesis and expression of angiogenic factors in aging rats after exercise. *Current Neurovascular Research*, *3*(1), 15-23.
- Ding, Y., Li, J., Luan, X., Ding, Y. H., Lai, Q., Rafols, J. A., . . . Diaz, F. G. (2004). Exercise pre-conditioning reduces brain damage in ischemic rats that may be associated with regional angiogenesis and cellular overexpression of neurotrophin. *Neuroscience*, *124*(3), 583-591.
- Donchin, E. (1981). Surprise!... Surprise? *Psychophysiology*, *18*(5), 493-513.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, *11*(3), 357-374.
- Dosenbach, N. U. F., Visscher, K. M., Palmer, E. D., Miezin, F. M., Wenger, K. K., Kang, H. C., . . . Petersen, S. E. (2006). A core system for the implementation of task sets. *Neuron*, *50*(5), 799-812.
- Draganski, B., Kherif, F., Klöppel, S., Cook, P. A., Alexander, D. C., Parker, G. J. M., . . . Frackowiak, R. S. J. (2008). Evidence for segregated and integrative connectivity patterns in the human basal ganglia. *The Journal of Neuroscience*, *28*(28), 7143-7152.
- Drollette, E. S., Shishido, T., Pontifex, M. B., & Hillman, C. H. (2012). Maintenance of cognitive control during and after walking in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *44*(10), 2017-2024.
- Duncan-Johnson, C. C. (1981). P300 latency: A new metric of information processing. *Psychophysiology*, *18*, 207-215.
- Durston, S., Davidson, M. C., Tottenham, N., Galvan, A., Spicer, J., Fossella, J. A., & Casey, B. (2006). A shift from diffuse to focal cortical activity with development. *Developmental Science*, *9*(1), 1-8.
- Duyckaerts, C., & Hauw, J. J. (1997). Prevalence, incidence and duration of Braak's stages in the general population: can we know? *Neurobiology of Aging*, *18*(4), 362-369.
- Edelberg, J. M., & Reed, M. J. (2003). Aging and angiogenesis. *Frontiers in Bioscience*, *8*, s1199-1209. doi:10.2741/1166

- Emmert, M. (2010). *Cognitive reserve and its association with cognitive abilities and the big five: an examination of young and older adults*. Unveröffentlichte Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- Engelhardt, A. (Hrsg.). (2010). *Handbuch Wissensgesellschaft: Theorien, Themen und Probleme*. Bielefeld: Transcript.
- Erickson, K., Raji, C., Lopez, O., Becker, J., Rosano, C., Newman, A., . . . Kuller, L. (2010a). Physical activity predicts gray matter volume in late adulthood: the Cardiovascular Health Study. *Neurology*, 75(16), 1415-1422.
- Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Elavsky, S., McAuley, E., Korol, D. L., Scalf, P. E., & Kramer, A. F. (2007a). Interactive effects of fitness and hormone treatment on brain health in postmenopausal women. *Neurobiology of Aging*, 28(2), 179-185.
- Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Wadhwa, R., Bherer, L., Peterson, M. S., Scalf, P. E., . . . Kramer, A. F. (2007b). Training-induced functional activation changes in dual-task processing: an fMRI study. *Cerebral Cortex*, 17(1), 192-204.
- Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Heo, S., McLaren, M., . . . Kramer, A. F. (2010b). Brain-derived neurotrophic factor is associated with age-related decline in hippocampal volume. *The Journal of Neuroscience*, 30(15), 5368-5375.
- Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Hu, L., Morris, K. S., . . . Kramer, A. F. (2009). Aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans. *Hippocampus*, 19(10), 1030-1039.
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., . . . White, S. M. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 3017-3022.
- Erixon-Lindroth, N., Farde, L., Wahlin, T. B., Sovago, J., Halldin, C., & Backman, L. (2005). The role of the striatal dopamine transporter in cognitive aging. *Psychiatry Research*, 138(1), 1-12.
- European Respiratory Society. (1993). Standardized lung function testing. Official statement of the European Respiratory Society. *European Respiratory Journal*, 6, Sup. 16.

- Fabel, K., Fabel, K., Tam, B., Kaufer, D., Baiker, A., Simmons, N., . . . Palmer, T. D. (2003). VEGF is necessary for exercise-induced adult hippocampal neurogenesis. *European Journal of Neuroscience*, *18*(10), 2803-2812.
- Fabiani, M. (2012). It was the best of times, it was the worst of times: A psychophysiological's view of cognitive aging. *Psychophysiology*, *49*(3), 283-304.
- Farmer, J., Zhao, X., van Praag, H., Wodtke, K., Gage, F. H., & Christie, B. R. (2004). Effects of voluntary exercise on synaptic plasticity and gene expression in the dentate gyrus of adult male sprague-dawley rats in vivo. *Neuroscience*, *124*(1), 71-79.
- Fay, T. B., Yeates, K. O., Taylor, H. G., Bangert, B., Dietrich, A., Nuss, K. E., . . . Wright, M. (2010). Cognitive reserve as a moderator of postconcussive symptoms in children with complicated and uncomplicated mild traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *16*(1), 94-105.
- Fernández-Ballesteros, R., Robine, J. M., Walker, A., & Kalache, A. (2013). Active aging: a global goal. *Current Gerontology and Geriatrics Research*, *2013*(3), 1-4.
- Ferris, L. T., Williams, J. S., & Shen, C.-L. (2007). The effect of acute exercise on serum brain-derived neurotrophic factor levels and cognitive function. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(4), 728-734.
- Finch, C. E. (2009). The neurobiology of middle-age has arrived. *Neurobiology of Aging*, *30*(4), 515-520.
- Fiorillo, C. D. (2004). The uncertain nature of dopamine. *Molecular Psychiatry*, *9*(2), 122-123.
- Fleischmann, U. M., & Oswald, W. D. (1999). *Nürnberger-Alters-Inventar (NAI) (4. Auflage)*. Göttingen: Hogrefe.
- Flöel, A., Breitenstein, C., Hummel, F., Celnik, P., Gingert, C., Sawaki, L., . . . Cohen, L. G. (2005). Dopaminergic influences on formation of a motor memory. *Annals of Neurology*, *58*(1), 121-130.
- Flöel, A., Hummel, F., Breitenstein, C., Knecht, S., & Cohen, L. G. (2005). Dopaminergic effects on encoding of a motor memory in chronic stroke. *Neurology*, *65*(3), 472-474.
- Foley, J. M., Ettenhofer, M. L., Kim, M. S., Behdin, N., Castellon, S. A., & Hinkin, C. H. (2012). Cognitive reserve as a protective factor in older HIV-positive patients at risk for cognitive decline. *Applied Neuropsychology*, *19*(1), 16-25.
- Forbes, E. E., & Dahl, R. E. (2010). Pubertal development and behavior: Hormonal activation of social and motivational tendencies. *Brain and Cognition*, *72*(1), 66-72.

- Fotinos, A. F., Mintun, M. A., Snyder, A. Z., Morris, J. C., & Buckner, R. L. (2008). Brain volume decline in aging: Evidence for a relation between socioeconomic status, preclinical alzheimer disease, and reserve. *Archives of Neurology*, *65*(1), 113-120.
- Foubert-Samier, A., Catheline, G., Amieva, H., Dilharreguy, B., Helmer, C., Allard, M., & Dartigues, J.-F. (2012). Education, occupation, leisure activities, and brain reserve: a population-based study. *Neurobiology of Aging*, *33*(2), 423.e415-423.e425.
- Gabbard, C., & Barton, J. (1979). Effects of physical activity on mathematical computation among young children. *The Journal of Psychology*, *103*(2), 287-288.
- Galvan, A., Hare, T. A., Parra, C. E., Penn, J., Voss, H., Glover, G., & Casey, B. (2006). Earlier development of the accumbens relative to orbitofrontal cortex might underlie risk-taking behavior in adolescents. *The Journal of Neuroscience*, *26*(25), 6885-6892.
- Galvao, R. P., Garcia-Verdugo, J. M., & Alvarez-Buylla, A. (2008). Brain-derived neurotrophic factor signaling does not stimulate subventricular zone neurogenesis in adult mice and rats. *The Journal of Neuroscience*, *28*(50), 13368–13383.
- Gehlen, A. (1961). *Anthropologische Forschung*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, *4*(6), 385-390.
- Gerber, M., Kellmann, M., Hartmann, T., & Pühse, U. (2010). Do exercise and fitness buffer against stress among Swiss police and emergency response service officers? *Psychology of Sport and Exercise*, *11*(4), 286-294.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., . . . Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, *2*(10), 861-863.
- Giedd, J. N., & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of pediatric brain development: what have we learned and where are we going? *Neuron*, *67*(5), 728-734.
- Gold, S. M., Schulz, K.-H., Hartmann, S., Mladek, M., Lang, U. E., Hellweg, R., . . . Heesen, C. (2003). Basal serum levels and reactivity of nerve growth factor and brain-derived neurotrophic factor to standardized acute exercise in multiple sclerosis and controls. *Journal of Neuroimmunology*, *138*(1), 99-105.
- Gonzalez-Alonso, J., Dalsgaard, M. K., Osada, T., Volianitis, S., Dawson, E. A., Yoshiga, C. C., & Secher, N. H. (2004). Brain and central haemodynamics and oxygenation during maximal exercise in humans. *The Journal of Physiology*, *557*(1), 331–342.

- Gow, A. J., Mortensen, E. L., & Avlund, K. (2012). Activity Participation and Cognitive Aging from Age 50 to 80 in the Glostrup 1914 Cohort. *Journal of the American Geriatrics Society*, 60(10), 1831-1838.
- Graybiel, A. M. (2005). The basal ganglia: learning new tricks and loving it. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(6), 638-644.
- Graybiel, A. M. (2008). Habits, rituals, and the evaluative brain. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 359-387.
- Greenwood, P. (2007). Functional plasticity in cognitive aging: review and hypothesis. *Neuropsychology*, 21(6), 657-673.
- Gunnar, M., & Quevedo, K. (2007). The Neurobiology of Stress and Development. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 145-173.
- Gusnard, D. A., & Raichle, M. E. (2001). Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(10), 685-694.
- Hagger, M. S., Wood, C., Stiff, C., & Chatzisarantis, N. L. D. (2010). Ego depletion and the strength model of self-control: a meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 136(4), 495-525.
- Hallal, P. C., Andersen, L. B., Bull, F. C., Guthold, R., Haskell, W., & Ekelund, U. (2012). Global physical activity levels: surveillance progress, pitfalls, and prospects. *The Lancet*, 380(9838), 247-257.
- Halperin, J. M., & Healey, D. M. (2011). The influences of environmental enrichment, cognitive enhancement, and physical exercise on brain development: can we alter the developmental trajectory of ADHD? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(3), 621-634.
- Härting, C., Markowitsch, H.-J., Neufeld, H., Calabrese, P., Deisinger, K., & Kessler, J. (2000). *WMS-R. Wechsler Gedächtnistest - revidierte Fassung*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Hasher, L., & Zacks, R. (1988). Working memory, comprehension, and aging: a review and a new view. In G. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (S. 193-225). San Diego, CA: Academic Press.
- Hashimoto, T., Nguyen, Q. L., Rotaru, D., Keenan, T., Arion, D., Beneyto, M., . . . Lewis, D. A. (2009). Protracted developmental trajectories of GABAA receptor $\alpha 1$ and $\alpha 2$ subunit expression in primate prefrontal cortex. *Biological Psychiatry*, 65(12), 1015-1023.

- Hautzinger, M., Bailer, M., Hofmeister, D., & Keller, F. (2012). *ADS - Allgemeine Depressionsskala. 2., überarbeitete und neu normierte Auflage. Manual*. Göttingen: Hogrefe.
- Hautzinger, M., Kühner, C., & Keller, F. (2006). *BDI-II Beck-Depressionsinventar (2. Auflage)*. Frankfurt/Main: Pearson Assessment & Information GmbH.
- Havighurst, R. J. (1963). Successful aging. In R. H. Williams, I. Tibbitts & W. Donahue (Hrsg.), *Processes of aging* (Bd. 1, S. 299-320). New York: Williams.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. New York, NY: Wiley.
- Hecker, G. (1984). Möglichkeiten der Motivationsförderung im Sportunterricht. In D. Hackfort (Hrsg.), *Handeln im Sportunterricht - psychologisch-didaktische Analysen* (S. 210-233). Köln: Deutsche Sporthochschule.
- Heckhausen, H. (1989). *Motivation und Handeln*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Heckhausen, H., & Roelofsen, I. (1962). Anfänge und Entwicklung der Leistungsmotivation: I. Im Wetteifer des Kleinkindes. *Psychologische Forschung*.
- Hedden, T., & Gabrieli, J. D. (2004). Insights into the ageing mind: a view from cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(2), 87-96.
- Heinzel, S., Lorenz, R. C., Brockhaus, W.-R., Wüstenberg, T., Kathmann, N., Heinz, A., & Rapp, M. A. (2014). Working memory load-dependent brain response predicts behavioral training gains in older adults. *The Journal of Neuroscience*, 34(4), 1224-1233.
- Hellstrom, G., Fischer-Colbrie, W., Wahlgren, N. G., & Jogestrand, T. (1996). Carotid artery blood flow and middle cerebral artery blood flow velocity during physical exercise. *Journal of Applied Physiology*, 81(1), 413-418.
- Hempstead, B. (2006). Dissecting the diverse actions of pro- and mature neurotrophins. *Current Alzheimer Research*, 3(1), 19-24.
- Hertzog, C., Kramer, A. F., Wilson, R. S., & Lindenberger, U. (2008). Enrichment effects on adult cognitive development: can the functional capacity of older adults be preserved and enhanced? *Psychological Science in the Public Interest*, 9(1), 1-65.
- Heyn, P., Abreu, B. C., & Ottenbacher, K. J. (2004). The effects of exercise training on elderly persons with cognitive impairment and dementia: a meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(10), 1694-1704.
- Hickson, M. (2006). Malnutrition and ageing. *Postgraduate Medical Journal*, 82(963), 2-8.

- Hillman, C. H., Buck, S. M., Themanson, J. R., Pontifex, M. B., & Castelli, D. M. (2009a). Aerobic fitness and cognitive development: event-related brain potential and task performance indices of executive control in preadolescent children. *Developmental Psychology, 45*(1), 114-129.
- Hillman, C. H., Castelli, D. M., & Buck, S. M. (2005). Aerobic fitness and neurocognitive function in healthy preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 37*(11), 1967-1974.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Motl, R. W., O'Leary, K. C., Johnson, C. R., Scudder, M. R., . . . Castelli, D. M. (2012). From ERPs to academics. *Developmental cognitive neuroscience, 2*, S90-S98.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009b). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience, 159*(3), 1044-1054.
- Hillman, C. H., & Schott, N. (2013). Der Zusammenhang von Fitness, kognitiver Leistungsfähigkeit und Gehirnzustand im Schulkindalter. *Zeitschrift für Sportpsychologie, 20*(1), 33-41.
- Hillman, C. H., Snook, E. M., & Jerome, G. J. (2003). Acute cardiovascular exercise and executive control function. *International Journal of Psychophysiology, 48*(3), 307-314.
- Holland, C. A., & Rabbitt, P. (1991). The course and causes of cognitive change with advancing age. *Reviews in Clinical Gerontology, 1*(1), 81-96.
doi:10.1017/S0959259800002598
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review, 109*(4), 679-709.
- Hsu, J.-L., Leemans, A., Bai, C.-H., Lee, C.-H., Tsai, Y.-F., Chiu, H.-C., & Chen, W.-H. (2008). Gender differences and age-related white matter changes of the human brain: A diffusion tensor imaging study. *Neuroimage, 39*(2), 566-577.
- Hultsch, D. F., Hertzog, C., Small, B. J., & Dixon, R. A. (1999). Use it or lose it: engaged lifestyle as a buffer of cognitive decline in aging? *Psychology and Aging, 14*(2), 245-263.
- Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology, 387*(2), 167-178.

- Ide, K., Horn, A., & Secher, N. H. (1999). Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *Journal of Applied Physiology*, 87(5), 1604-1608.
- Ide, K., & Secher, N. H. (2000). Cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Progress in Neurobiology*, 61(4), 397-414.
- Ilan, A. B., & Polich, J. (1999). P300 and response time from a manual Stroop task. *Clinical Neurophysiology*, 110(2), 367-373.
- Ilg, R., Wohlschläger, A. M., Gaser, C., Liebau, Y., Dauner, R., Woller, A., . . . Muhlau, M. (2008). Gray matter increase induced by practice correlates with task-specific activation: a combined functional and morphometric magnetic resonance imaging study. *The Journal of Neuroscience*, 28(16), 4210-4215.
- Illingworth, R. S., Nair, M. K. C., & Russell, P. S. S. (2013). *Illingworth's the development of the infant and young child: Normal and abnormal* (10. Auflage). New Delhi: Elsevier.
- Isaacs, K. R., Anderson, B. J., Alcantara, A. A., Black, J. E., & Greenough, W. T. (1992). Exercise and the brain: angiogenesis in the adult rat cerebellum after vigorous physical activity and motor skill learning. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 12(1), 110-119.
- Jack, C., Petersen, R., Xu, Y., O'Brien, P., Smith, G., Ivnik, R., . . . Kokmen, E. (2000). Rates of hippocampal atrophy correlate with change in clinical status in aging and AD. *Neurology*, 55(4), 484-490.
- Jack, C., Petersen, R. C., Xu, Y., O'Brien, P. C., Smith, G. E., Ivnik, R. J., . . . Kokmen, E. (1998). Rate of medial temporal lobe atrophy in typical aging and Alzheimer's disease. *Neurology*, 51(4), 993-999.
- Jay, T. M. (2003). Dopamine: a potential substrate for synaptic plasticity and memory mechanisms. *Progress in Neurobiology*, 69(6), 375-390.
- Johnson, D. K., Storandt, M., Morris, J. C., & Galvin, J. E. (2009). Longitudinal study of the transition from healthy aging to Alzheimer disease. *Archives of Neurology*, 66(10), 1254-1259.
- Jones, R. N., Manly, J., Glymour, M. M., Rentz, D. M., Jefferson, A. L., & Stern, Y. (2011). Conceptual and measurement challenges in research on cognitive reserve. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(04), 593-601.

- Jørgensen, L. G., Perko, M., Hanel, B., Schroeder, T. V., & Secher, N. H. (1992). Middle cerebral artery flow velocity and blood flow during exercise and muscle ischemia in humans. *Journal of Applied Physiology*, 72(3), 1123-1132.
- Joy, S., Fein, D., & Kaplan, E. (2003). Decoding digit symbol: speed, memory, and visual scanning. *Assessment*, 10(1), 56-65.
- Joy, S., Fein, D., Kaplan, E., & Freedman, M. (2000). Speed and memory in WAIS-R-NI Digit Symbol performance among healthy older adults. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6(7), 770-780.
- Joy, S., Kaplan, E., & Fein, D. (2004). Speed and memory in the WAIS-III Digit Symbol--Coding subtest across the adult lifespan. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 19(6), 759-767.
- Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The elusive nature of executive functions: a review of our current understanding. *Neuropsychology Review*, 17(3), 213-233.
- Jurca, R., Jackson, A. S., LaMonte, M. J., Morrow, J. R., Jr., Blair, S. N., Wareham, N. J., . . . Laukkanen, R. (2005). Assessing cardiorespiratory fitness without performing exercise testing. *American Journal of Preventive Medicine*, 29(3), 185-193.
- Kadota, T., Horinouchi, T., & Kuroda, C. (2001). Development and aging of the cerebrum: assessment with proton MR spectroscopy. *AJNR: American Journal of Neuroradiology*, 22(1), 128-135.
- Kallman, D. A., Plato, C. C., & Tobin, J. D. (1990). The role of muscle loss in the age-related decline of grip strength: cross-sectional and longitudinal perspectives. *Journal of Gerontology*, 45(3), M82-M88.
- Kaplan, R. J., Greenwood, C. E., Winocur, G., & Wolever, T. M. (2001). Dietary protein, carbohydrate, and fat enhance memory performance in the healthy elderly. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 74(5), 687-693.
- Karnath, H.-O. (2003). *Neuropsychologie*. Berlin: Springer.
- Katzman, R. (1993). Education and the prevalence of dementia and Alzheimer`s disease. *Neurology*, 43(1), 13-20.
- Katzman, R., Terry, R., DeTeresa, R., Brown, T., Davies, P., Fuld, P., . . . Peck, A. (1988). Clinical, pathological, and neurochemical changes in dementia: a subgroup with preserved mental status and numerous neocortical plaques. *Annals of Neurology*, 23(2), 138-144.

- Kempermann, G., Fabel, K., Ehninger, D., Babu, H., Leal-Galicia, P., Garthe, A., & Wolf, S. (2010). Why and how physical activity promotes experience-induced brain plasticity. *Frontiers in Neuroscience*, 4. doi:10.3389/fnins.2010.00189
- Kida, N., Oda, S., & Matsumura, M. (2005). Intensive baseball practice improves the Go/Nogo reaction time, but not the simple reaction time. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 22(2), 257-264.
- Kitamura, T., Mishina, M., & Sugiyama, H. (2003). Enhancement of neurogenesis by running wheel exercises is suppressed in mice lacking NMDA receptor $\epsilon 1$ subunit. *Neuroscience Research*, 47(1), 55-63.
- Klaperski, S., Seelig, H., & Fuchs, R. (2012). Sportaktivität als Stresspuffer. *Zeitschrift für Sportpsychologie*, 19(2), 80–90.
- Kliegl, R., Smith, J., & Baltes, P. B. (1989). Testing-the-limits and the study of adult age differences in cognitive plasticity of a mnemonic skill. *Developmental Psychology*, 25(2), 247-256.
- Knecht, S., Breitenstein, C., Bushuven, S., Wailke, S., Kamping, S., Flöel, A., . . . Ringelstein, E. B. (2004). Levodopa: faster and better word learning in normal humans. *Annals of Neurology*, 56(1), 20-26.
- Koenen, K. C., Moffitt, T. E., Roberts, A. L., Martin, L. T., Kubzansky, L., Harrington, H., . . . Caspi, A. (2009). Childhood IQ and adult mental disorders: a test of the cognitive reserve hypothesis. *The American Journal of Psychiatry*, 166(1), 50-57.
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 38(3), 557-577.
- Komulainen, P., Pedersen, M., Hänninen, T., Bruunsgaard, H., Lakka, T. A., Kivipelto, M., . . . Rauramaa, R. (2008). BDNF is a novel marker of cognitive function in ageing women: the DR's EXTRA study. *Neurobiology of Learning and Memory*, 90(4), 596-603.
- Konrad, K. (2011). Strukturelle Hirnentwicklung in der Adoleszenz. In P. J. Uhlhaas & K. Konrad (Hrsg.), *Das adoleszente Gehirn* (S. 123-138). Stuttgart: Kohlhammer.
- Konrad, K., Firk, C., & Uhlhaas, P. J. (2013). Hirnentwicklung in der Adoleszenz: Neurowissenschaftliche Befunde zum Verständnis dieser Entwicklungsphase. *Deutsches Ärzteblatt International*, 110(25), 425-431.

- Kozey, S., Lyden, K., Staudenmayer, J., & Freedson, P. (2010). Errors in MET estimates of physical activities using $3.5 \text{ ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$ as the baseline oxygen consumption. *Journal of physical activity & health*, 7(4), 508-516.
- Kraemer, W. J., Häkkinen, K., Newton, R. U., Nindl, B. C., Volek, J. S., McCormick, M., . . . Evans, W. J. (1999). Effects of heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs. older men. *Journal of Applied Physiology*, 87(3), 982-992.
- Kramer, A. F., Bherer, L., Colcombe, S. J., Dong, W., & Greenough, W. T. (2004). Environmental influences on cognitive and brain plasticity during aging. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences & Medical Sciences*, 59(9), M940-957.
- Kramer, A. F., & Erickson, K. I. (2007). Capitalizing on cortical plasticity: influence of physical activity on cognition and brain function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(8), 342-348.
- Kramer, A. F., Hahn, S., Cohen, N. J., Banich, M. T., McAuley, E., Harrison, C. R., . . . Colcombe, A. (1999). Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature*, 400(6743), 418-419.
- Kramer, J. H., Mungas, D., Reed, B. R., Wetzel, M. E., Burnett, M. M., Miller, B. L., . . . Chui, H. C. (2007). Longitudinal MRI and cognitive change in healthy elderly. *Neuropsychology*, 21(4), 412-418.
- Kruggel, F. (2006). MRI-based volumetry of head compartments: normative values of healthy adults. *Neuroimage*, 30(1), 1-11.
- Kubesch, S., & Walk, L. (2009). Körperliches und kognitives Training exekutiver Funktionen in Kindergarten und Schule. *Sportwissenschaft*, 39(4), 309-317.
- Kübler, H.-D. (2009). *Mythos Wissensgesellschaft: Gesellschaftlicher Wandel zwischen Information, Medien und Wissen: eine Einführung* (2. Auflage). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Kuhl, J. (2001). *Motivation und Persönlichkeit: Interaktionen psychischer Systeme*. Göttingen: Hogrefe.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: the P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197(4305), 792-795.
- Lambourne, K., & Tomporowski, P. (2010). The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Research*, 1341, 12-24.

- Langdon, D. (2011). Cognition in multiple sclerosis. *Current Opinion in Neurology*, 24(3), 244-249.
- Larson, E. B., Wang, L., Bowen, J. D., McCormick, W. C., Teri, L., Crane, P., & Kukull, W. (2006). Exercise is associated with reduced risk for incident dementia among persons 65 years of age and older. *Annals of Internal Medicine*, 144(2), 73-81.
- Laux, L. F., & Lane, D. M. (1985). Information processing components of substitution test performance. *Intelligence*, 9(2), 111-136.
- Lawlor, D. A., & Hopker, S. W. (2001). The effectiveness of exercise as an intervention in the management of depression: systematic review and meta-regression analysis of randomised controlled trials. *BMJ*, 322:763(7289).
- Le Carret, N., Lafont, S., Letenneur, L., Dartigues, J. F., Mayo, W., & Fabrigoule, C. (2003). The effect of education on cognitive performances and its implication for the constitution of the cognitive reserve. *Developmental Neuropsychology*, 23(3), 317-337.
- Levenson, M. R., & Aldwin, C. M. (1994). Aging, personality, and adaptation. In V. S. Ramachandran (Hrsg.), *Encyclopedia of Human Behavior* (Bd. 1, S. 47-55). San Diego, CA: Academic Press.
- Lezak, M. D. (2004). *Neuropsychological assessment* (4. Auflage). Oxford, New York: Oxford University Press.
- Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1995). Testing-the-limits and experimental simulation - 2 methods to explicate the role of learning in development. *Human Development*, 38(6), 349-360.
- Lindenberger, U., Burzynska, A. Z., & Nagel, I. E. (2013). Heterogeneity in frontal-lobe aging. In D. T. Stuss & R. T. Knight (Hrsg.), *Principles of frontal lobe functions* (2. Auflage, S. 609-627). New York, NY: Oxford University Press.
- Lindenberger, U., Li, S.-C., & Bäckman, L. (2006). Delineating brain-behavior mappings across the lifespan: substantive and methodological advances in developmental neuroscience. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30(6), 713-717.
- Liu-Ambrose, T., Nagamatsu, L. S., Graf, P., Beattie, B., Ashe, M. C., & Handy, T. C. (2010). Resistance training and executive functions: a 12-month randomized controlled trial. *Archives of Internal Medicine*, 170(2), 170-178.

- Liu-Ambrose, T., Nagamatsu, L. S., Voss, M. W., Khan, K. M., & Handy, T. C. (2012). Resistance training and functional plasticity of the aging brain: a 12-month randomized controlled trial. *Neurobiology of Aging*, *33*(8), 1690-1698.
- Lojovich, J. M. (2010). The relationship between aerobic exercise and cognition: is movement medicinal? *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *25*(3), 184-192.
- Lövdén, M., Bäckman, L., Lindenberger, U., Schaefer, S., & Schmiedek, F. (2010a). A theoretical framework for the study of adult cognitive plasticity. *Psychological Bulletin*, *136*(4), 659-676.
- Lövdén, M., Bodammer, N. C., Kühn, S., Kaufmann, J., Schütze, H., Tempelmann, C., . . . Lindenberger, U. (2010b). Experience-dependent plasticity of white-matter microstructure extends into old age. *Neuropsychologia*, *48*(13), 3878-3883.
- Lövdén, M., Wenger, E., Mårtensson, J., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2013). Structural brain plasticity in adult learning and development. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *37*(9, Part B), 2296-2310.
- Lustig, C., Shah, P., Seidler, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (2009). Aging, training, and the brain: a review and future directions. *Neuropsychology Review*, *19*(4), 504-522.
- Lustig, C., Snyder, A. Z., Bhakta, M., O'Brien, K. C., McAvoy, M., Raichle, M. E., . . . Buckner, R. L. (2003). Functional deactivations: change with age and dementia of the Alzheimer type. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*(24), 14504-14509.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, *21*(2), 171-186.
- Magnié, M.-N., Bermon, S., Martin, F., Madany-Lounis, M., Suisse, G., Muhammad, W., & Dolisi, C. (2000). P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. *Psychophysiology*, *37*, 369-377.
- Magnotta, V. A., Andreasen, N. C., Schultz, S. K., Harris, G., Cizadlo, T., Heckel, D., . . . Flaum, M. (1999). Quantitative in vivo measurement of gyrification in the human brain: changes associated with aging. *Cerebral Cortex*, *9*(2), 151-160.
- Mahar, M., Murphy, S., Rowe, D., Golden, J., Shields, T., & Raedeke, T. (2006). Effects of a classroom-based program on physical activity and on-task behavior. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *38*(12), 2086-2094.
- Mahar, M. T. (2011). Impact of short bouts of physical activity on attention-to-task in elementary school children. *Preventive Medicine*, *52*, S60-S64.

- Mailey, E. L., White, S. M., Wójcicki, T. R., Szabo, A. N., Kramer, A. F., & McAuley, E. (2010). Construct validation of a non-exercise measure of cardiorespiratory fitness in older adults. *BMC Public Health, 10*(1), 59.
- Makanya, A., Hlushchuk, R., & Djonov, V. (2009). Intussusceptive angiogenesis and its role in vascular morphogenesis, patterning, and remodeling. *Angiogenesis, 12*(2), 113-123.
- Marin, M.-F., Lord, C., Andrews, J., Juster, R.-P., Sindi, S., Arseneault-Lapierre, G., . . . Lupien, S. J. (2011). Chronic stress, cognitive functioning and mental health. *Neurobiology of Learning and Memory, 96*(4), 583-595.
- Marioni, R. E. (2012). Active cognitive lifestyle associates with cognitive recovery and a reduced risk of cognitive decline. *Journal of Alzheimer's Disease, 28*(1), 223-230.
- Marks, B. L., Madden, D. J., Bucur, B., Provenzale, J. M., White, L. E., Cabeza, R., & Huettel, S. A. (2007). Role of aerobic fitness and aging on cerebral white matter integrity. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1097*, 171-174.
- Martin, M., & Kliegel, M. (2010). *Psychologische Grundlagen der Gerontologie* (3. Auflage). Stuttgart: Kohlhammer.
- Mathiowetz, V., Kashman, N., Volland, G., Weber, K., Dowe, M., & Rogers, S. (1985). Grip and pinch strength: normative data for adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 66*(2), 69-74.
- Maud, P. J., & Foster, C. (2006). *Physiological assessment of human fitness* (2. Auflage). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Maynard, T., & Waters, J. (2007). Learning in the outdoor environment: a missed opportunity? *Early Years, 27*(3), 255-265.
- Mazzocco, M. M. M., & Kover, S. T. (2007). A longitudinal assessment of executive function skills and their association with math performance. *Child Neuropsychology, 13*(1), 18-45.
- McArdle, J. J., Ferrer-Caja, E., Hamagami, F., & Woodcock, R. W. (2002). Comparative longitudinal structural analyses of the growth and decline of multiple intellectual abilities over the life span. *Developmental Psychology, 38*(1), 115-142.
- McClelland, D., Atkinson, J. W., Clark, R. A., & Lowell, E. L. (1953). *The achievement motive*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- McClelland, D. C. (1985). *Human motivation*. Glenview, IL: Scott, Foresman & Co.

- McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation: central role of the brain. *Physiological Reviews*, 87(3), 873-904.
- McEwen, Bruce S., & Morrison, John H. (2013). The brain on stress: vulnerability and plasticity of the prefrontal cortex over the life course. *Neuron*, 79(1), 16-29.
- McGivern, R. F., Andersen, J., Byrd, D., Mutter, K. L., & Reilly, J. (2002). Cognitive efficiency on a match to sample task decreases at the onset of puberty in children. *Brain and Cognition*, 50(1), 73-89.
- McMorris, T., Sproule, J., Turner, A., & Hale, B. J. (2011). Acute, intermediate intensity exercise, and speed and accuracy in working memory tasks: a meta-analytical comparison of effects. *Physiology and Behavior*, 102(3-4), 421-428.
- McNaughten, D., & Gabbard, C. (1993). Physical exertion and immediate mental performance of sixth-grade children. *Perceptual and Motor Skills*, 77(3), 1155-1159.
- Meeusen, R., & De Meirleir, K. (1995). Exercise and brain neurotransmission. *Sports Medicine*, 20(3), 160-188.
- Miltner, W. H. R., Lemke, U., Weiss, T., Holroyd, C., Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. (2003). Implementation of error-processing in the human anterior cingulate cortex: a source analysis of the magnetic equivalent of the error-related negativity. *Biological Psychology*, 64(1-2), 157-166.
- Miyake, A. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100.
- Molteni, R., Ying, Z., & Gómez-Pinilla, F. (2002). Differential effects of acute and chronic exercise on plasticity-related genes in the rat hippocampus revealed by microarray. *European Journal of Neuroscience*, 16(6), 1107-1116.
- Morley, J. E. (2001). Decreased food intake with aging. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences & Medical Sciences*, 56 Spec No 2, 81-88.
- Mortimer, J. A., Schuman, L. M., & French, L. R. (1981). Epidemiology of dementing illness. In J. A. S. Mortimer, L.M. (Hrsg.), *The epidemiology of dementia: Monographs in epidemiology and biostatistics* (S. 323-333). New York: Oxford University Press.
- Mortimer, J. A., Snowdon, D. A., & Markesbery, W. R. (2003). Head circumference, education and risk of dementia: findings from the Nun Study. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(5), 671-679.

- Münch, R. (1991). *Dialektik der Kommunikationsgesellschaft* (1. Auflage). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Mungas, D., Harvey, D., Reed, B., Jagust, W., DeCarli, C., Beckett, L., . . . Schuff, N. (2005). Longitudinal volumetric MRI change and rate of cognitive decline. *Neurology*, *65*(4), 565-571.
- Muraven, M., & Baumeister, R. F. (2000). Self-regulation and depletion of limited resources: does self-control resemble a muscle? *Psychological Bulletin*, *126*(2), 247-259.
- Murrin, L. C., Sanders, J. D., & Bylund, D. B. (2007). Comparison of the maturation of the adrenergic and serotonergic neurotransmitter systems in the brain: implications for differential drug effects on juveniles and adults. *Biochemical Pharmacology*, *73*(8), 1225-1236.
- Neeper, S. A., Goautemez-Pinilla, F., Choi, J., & Cotman, C. (1995). Exercise and brain neurotrophins. *Nature*, *373*(6510), 109.
- Neeper, S. A., Gómez-Pinilla, F., Choi, J., & Cotman, C. W. (1996). Physical activity increases mRNA for brain-derived neurotrophic factor and nerve growth factor in rat brain. *Brain Research*, *726*(1-2), 49-56.
- Nelson, P. T., Braak, H., & Markesbery, W. R. (2009). Neuropathology and cognitive impairment in Alzheimer disease: a complex but coherent relationship. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology*, *68*(1), 1-14.
- Ng, S. W., & Popkin, B. M. (2012). Time use and physical activity: a shift away from movement across the globe. *Obesity Reviews*, *13*(8), 659-680.
- Nithianantharajah, J., & Hannan, A. J. (2006). Enriched environments, experience-dependent plasticity and disorders of the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*(9), 697-709.
- Nyberg, L., Lövdén, M., Riklund, K., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2012). Memory aging and brain maintenance. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(5), 292-305.
- Nybo, L., Nielsen, B., Blomstrand, E., Møller, K., & Secher, N. (2003). Neurohumoral responses during prolonged exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, *95*(3), 1125-1131.
- O'Sullivan, M., Jones, D., Summers, P., Morris, R., Williams, S., & Markus, H. (2001). Evidence for cortical "disconnection" as a mechanism of age-related cognitive decline. *Neurology*, *57*(4), 632-638.

- Olbrich, E. (1987). Kompetenz im Alter. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 20, 319-330.
- Olbrich, E. (1992). Das Kompetenzmodell des Alterns. In J. D.-R. H. Reggentin (Hrsg.), *Neue Wege in der Bildung Älterer: Band I. Theoretische Grundlagen und Konzepte* (S. 53–61). Freiburg: Lambertus.
- Osterhammel, J. (2009). *Die Verwandlung der Welt: Eine Geschichte des 19. Jahrhunderts*. München: Beck.
- Park, D. C., Lautenschlager, G., Hedden, T., Davidson, N. S., Smith, A. D., & Smith, P. K. (2002). Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span. *Psychology and Aging*, 17(2), 299-320.
- Park, D. C., Polk, T. A., Mikels, J. A., Taylor, S. F., & Marshuetz, C. (2001). Cerebral aging: integration of brain and behavioral models of cognitive function. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 3(3), 151-165.
- Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology*, 60, 173-196.
- Pavot, W., Diener, E., & Suh, E. (1998). The Temporal Satisfaction With Life Scale. *Journal of Personality Assessment*, 70(2), 340-354.
- Pechtel, P., & Pizzagalli, D. A. (2011). Effects of early life stress on cognitive and affective function: an integrated review of human literature. *Psychopharmacology*, 214(1), 55-70.
- Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunov, A. A., Hen, R., McKhann, G. M., . . . Small, S. A. (2007). An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(13), 5638-5643.
- Perrin, J. S., Hervé, P.-Y., Leonard, G., Perron, M., Pike, G. B., Pitiot, A., . . . Paus, T. (2008). Growth of white matter in the adolescent brain: role of testosterone and androgen receptor. *The Journal of Neuroscience*, 28(38), 9519-9524.
- Pesce, C., Crova, C., Cereatti, L., Casella, R., & Bellucci, M. (2009). Physical activity and mental performance in preadolescents: effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity*, 2(1), 16-22.
- Petersen, R. C., Jack, C., Xu, Y.-C., Waring, S., O'Brien, P., Smith, G., . . . Kokmen, E. (2000). Memory and MRI-based hippocampal volumes in aging and AD. *Neurology*, 54(3), 581-581.

- Piccinin, A. M., & Rabbitt, P. M. (1999). Contribution of cognitive abilities to performance and improvement on a substitution coding task. *Psychology and Aging, 14*(4), 539-551.
- Podewils, L. J., Guallar, E., Kuller, L. H., Fried, L. P., Lopez, O. L., Carlson, M., & Lyketsos, C. G. (2005). Physical activity, APOE genotype, and dementia risk: findings from the cardiovascular health cognition study. *American Journal of Epidemiology, 161*(7), 639-651.
- Poletti, M., Emre, M., & Bonuccelli, U. (2011). Mild cognitive impairment and cognitive reserve in Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders, 17*(8), 579-586.
- Polich, J. (1987). Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 68*(4), 311-320.
- Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology, 118*(10), 2128-2148.
- Polich, J., & Heine, M. R. D. (1996). P300 topography and modality effects from a single-stimulus paradigm. *Psychophysiology, 33*(6), 747-752.
- Pontifex, M. B., Raine, L. B., Johnson, C. R., Chaddock, L., Voss, M. W., Cohen, N. J., . . . Hillman, C. H. (2011). Cardiorespiratory fitness and the flexible modulation of cognitive control in preadolescent children. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(6), 1332-1345.
- Pontifex, M. B., Saliba, B. J., Raine, L. B., Picchietti, D. L., & Hillman, C. H. (2013). Exercise improves behavioral, neurocognitive, and scholastic performance in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *The Journal of Pediatrics, 162*(3), 543-551.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2007). Genes and Environment *Educating the human brain* (S. 99-119). Washington, DC: American Psychological Association.
- Pott, F., Jensen, K., Hansen, H., Christensen, N., Lassen, N., & Secher, N. (1996). Middle cerebral artery blood velocity and plasma catecholamines during exercise. *Acta Physiologica Scandinavica, 158*(4), 349-356.
- Pozzo-Miller, L. D., Gottschalk, W., Zhang, L., McDermott, K., Du, J., Gopalakrishnan, R., . . . Lu, B. (1999). Impairments in high-frequency transmission, synaptic vesicle docking, and synaptic protein distribution in the hippocampus of BDNF knockout mice. *The Journal of Neuroscience, 19*(12), 4972-4983.

- Prakash, R. S., Voss, M. W., Erickson, K. I., Lewis, J. M., Chaddock, L., Malkowski, E., . . . Kramer, A. F. (2011). Cardiorespiratory fitness and attentional control in the aging brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 1-12.
doi:10.3389/fnhum.2010.00229
- Pritzel, P., Brand, M., & Markowitsch, H. (2003). *Gehirn und Verhalten: Eine Einführung in die Neurowissenschaft (für Psychologen)* (1. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Rabbitt, P., & Lowe, C. (2000). Patterns of cognitive ageing. *Psychological Research*, *63*(3-4), 308-316.
- Ragozzino, M. E., Jih, J., & Tzavos, A. (2002). Involvement of the dorsomedial striatum in behavioral flexibility: role of muscarinic cholinergic receptors. *Brain Research*, *953*(1-2), 205-214.
- Rammstedt, B., & John, O. P. (2005). Kurzversion des Big Five Inventory (BFI-K): Entwicklung und Validierung eines ökonomischen Inventars zur Erfassung der fünf Faktoren der Persönlichkeit. *Diagnostica*, *51*(4), 195-206.
- Raz, N. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and modifiers. *Cerebral Cortex*, *15*(11), 1676-1689.
- Raz, N., & Lindenberger, U. (2013). Life-span plasticity of the brain and cognition: From questions to evidence and back. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *37*(9, Part B), 2195-2200.
- Raz, N., Rodrigue, K., Head, D., Kennedy, K., & Acker, J. (2004). Differential aging of the medial temporal lobe a study of a five-year change. *Neurology*, *62*(3), 433-438.
- Raz, N., & Rodrigue, K. M. (2006). Differential aging of the brain: patterns, cognitive correlates and modifiers. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *30*(6), 730-748.
- Reichardt, L. F. (2006). Neurotrophin-regulated signalling pathways. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B: Biological Sciences*, *361*(1473), 1545-1564.
- Reichholf, J. (2008). *Warum die Menschen sesshaft wurden: Das grösste Rätsel unserer Geschichte*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Reiner, M., Niermann, C., Krapf, F., & Woll, A. (2013). Stress, Sport und Beschwerdewahrnehmung. *Sportwissenschaft*, *43*(4), 264-275.
- Rejeski, W. J., & Mihalko, S. L. (2001). Physical activity and quality of life in older adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *56*(suppl 2), 23-35.

- Reuter-Lorenz, P. A., & Cappell, K. A. (2008). Neurocognitive aging and the compensation hypothesis. *Current Directions in Psychological Science*, 17(3), 177-182.
- Rheinberg, F. (2002). *Motivation*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Richards, M., & Deary, I. J. (2005). A life course approach to cognitive reserve: A model for cognitive aging and development? *Annals of Neurology*, 58(4), 617-622.
- Rimmele, U., Zellweger, B. C., Marti, B., Seiler, R., Mohiyeddini, C., Ehlert, U., & Heinrichs, M. (2007). Trained men show lower cortisol, heart rate and psychological responses to psychosocial stress compared with untrained men. *Psychoneuroendocrinology*, 32(6), 627-635.
- Robbins, T. W. (1998). Dissociating executive functions of the prefrontal cortex. In A. C. Roberts, T. W. Robbins & L. Weiskrantz (Hrsg.), *The prefrontal cortex* (S. 117-130). Oxford, New York: Oxford University Press.
- Roberts, A. C., Robbins, T. W., & Weiskrantz, L. (Hrsg.). (1998). *The prefrontal cortex*. Oxford, NY: Oxford University Press.
- Rommelspacher, B. (2002). *Anerkennung und Ausgrenzung: Deutschland als multikulturelle Gesellschaft*. Frankfurt/Main, New York: Campus.
- Rosano, C., Venkatraman, V. K., Guralnik, J., Newman, A. B., Glynn, N. W., Launer, L., . . . Pahor, M. (2010). Psychomotor speed and functional brain MRI 2 years after completing a physical activity treatment. *The Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences & Medical Sciences*, 65(6), 639-647.
- Roth, D. L., & Holmes, D. S. (1987). Influence of aerobic exercise training and relaxation training on physical and psychologic health following stressful life events. *Psychosomatic Medicine*, 49(4), 355-365.
- Rowe, J. W., & Kahn, R. L. (1998). *Successful aging* (1. Auflage). New York: Dell Pub.
- Rowland, T. (2012). Physical activity, fitness, and children. In C. Bouchard, S. N. Blair & W. L. Haskell (Hrsg.), *Physical activity and health* (2. Auflage, S. 273-286). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Rueggeberg, R., Wrosch, C., & Miller, G. E. (2012). The different roles of perceived stress in the association between older adults' physical activity and physical health. *Health Psychology*, 31(2), 164.
- Ruscheweyh, R., Willemer, C., Krüger, K., Duning, T., Warnecke, T., Sommer, J., . . . Flöel, A. (2011). Physical activity and memory functions: An interventional study. *Neurobiology of Aging*, 32(7), 1304-1319.

- Sachdev, P. S., Valenzuela, M., & Hons, M. (2009). Brain and cognitive reserve. *The American Journal of Geriatric Psychiatry, 17*, 175-178.
- Salat, D. H., Buckner, R. L., Snyder, A. Z., Greve, D. N., Desikan, R. S., Busa, E., . . . Fischl, B. (2004). Thinning of the cerebral cortex in aging. *Cerebral Cortex, 14*(7), 721-730.
- Salthouse, T. A. (2009). When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiology of Aging, 30*(4), 507-514.
- Sapolsky, R. M. (1996). Why stress is bad for your brain. *Science, 273*(5276), 749-750.
- Sattler, C., Toro, P., Schönknecht, P., & Schröder, J. (2012). Cognitive activity, education and socioeconomic status as preventive factors for mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Psychiatry Research, 196*(1), 90-95.
- Satz, P. (1993). Brain reserve capacity on symptom onset after brain injury: a formulation and review of evidence for threshold theory. *Neuropsychology, 7*(3), 273-295.
- Satz, P., Cole, M. A., Hardy, D. J., & Rassovsky, Y. (2011). Brain and cognitive reserve: Mediator(s) and construct validity, a critique. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 33*(1), 121-130.
- Scarmeas, N., Levy, G., Tang, M.-X., Manly, J., & Stern, Y. (2001). Influence of leisure activity on the incidence of Alzheimer's disease. *Neurology, 57*(12), 2236-2242.
- Scarmeas, N., & Stern, Y. (2003). Cognitive reserve and lifestyle. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 25*(5), 625-633.
- Scarmeas, N., & Stern, Y. (2004). Cognitive reserve: implications for diagnosis and prevention of Alzheimer's disease. *Current neurology and neuroscience reports, 4*(5), 374-380.
- Schaie, K. W. (1996). *Intellectual development in adulthood: The Seattle Longitudinal Study*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schaie, K. W. (2005). *Developmental influences on adult intelligence*. New York: Oxford University Press.
- Schaie, K. W., Willis, S. L., & Caskie, G. I. L. (2004). The Seattle Longitudinal Study: relationship between personality and cognition. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B: Aging, Neuropsychology and Cognition, 11*(2-3), 304-324.
- Scharfman, H., Goodman, J., Macleod, A., Phani, S., Antonelli, C., & Croll, S. (2005). Increased neurogenesis and the ectopic granule cells after intrahippocampal BDNF infusion in adult rats. *Experimental Neurology, 192*(2), 348-356.

- Schmähl, W. (2002). Leben die „Alten“ auf Kosten der „Jungen“? Anmerkungen zur Belastungsverteilung zwischen „Generationen“ in einer alternden Bevölkerung aus ökonomischer Perspektive. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 35(4), 304-314.
- Schofield, P. W., Logroscino, G., Andrews, H. F., Albert, S., & Stern, Y. (1997). An association between head circumference and Alzheimer's disease in a population-based study of aging and dementia. *Neurology*, 49(1), 30-37.
- Scholz, J., Klein, M. C., Behrens, T. E. J., & Johansen-Berg, H. (2009). Training induces changes in white-matter architecture. *Nature Neuroscience*, 12(11), 1370-1371.
- Schulz, K.-H., Gold, S. M., Witte, J., Bartsch, K., Lang, U. E., Hellweg, R., . . . Heesen, C. (2004). Impact of aerobic training on immune-endocrine parameters, neurotrophic factors, quality of life and coordinative function in multiple sclerosis. *Journal of the Neurological Sciences*, 225(1), 11-18.
- Seeman, T. E., Lusignolo, T. M., Albert, M., & Berkman, L. (2001). Social relationships, social support, and patterns of cognitive aging in healthy, high-functioning older adults: MacArthur studies of successful aging. *Health Psychology*, 20(4), 243-255.
- Sforzo, G. A., Seeger, T. F., Pert, C. B., & Pert, A. (1986). In vivo opioid receptor occupation in the rat brain following exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 18, 380-384.
- Sheldon, K. M., & Kasser, T. (1998). Pursuing personal goals: Skills enable progress, but not all progress is beneficial. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 24(12), 1319-1331.
- Sheline, Y. I., Mintun, M. A., Moerlein, S. M., & Snyder, A. Z. (2002). Greater loss of 5-HT_{2A} receptors in midlife than in late life. *The American Journal of Psychiatry*, 159(3), 430-435.
- Shvartz, E., & Reibold, R. (1990). Aerobic fitness norms for males and females aged 6 to 75 years: a review. *Aviation, space, and environmental medicine*, 61(1), 3-11.
- Sibley, B. A., & Etnier, J. L. (2003). The relationship between physical activity and cognition in children: a meta-analysis. *Pediatric Exercise Science*, 15(3), 243-256.
- Singh-Manoux, A., Kivimaki, M., Glymour, M. M., Elbaz, A., Berr, C., Ebmeier, K. P., . . . Dugravot, A. (2012). Timing of onset of cognitive decline: results from Whitehall II prospective cohort study. *BMJ*, 344(4), 1-8. doi:10.1136/bmj.d7622

- Siuciak, J. A., Clark, M. S., Rind, H. B., Whittemore, S. R., & Russo, A. F. (1998). BDNF induction of tryptophan hydroxylase mRNA levels in the rat brain. *Journal of Neuroscience Research*, 52(2), 149-158.
- Small, G. W., Silverman, D. H., Siddarth, P., Ercoli, L. M., Miller, K. J., Lavretsky, H., . . . Phelps, M. E. (2006). Effects of a 14-day healthy longevity lifestyle program on cognition and brain function. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, 14(6), 538-545.
- Smith, J. C., Nielson, K. A., Woodard, J. L., Seidenberg, M., Durgerian, S., Antuono, P., . . . Rao, S. M. (2011). Interactive effects of physical activity and APOE-ε4 on BOLD semantic memory activation in healthy elders. *Neuroimage*, 54(1), 635-644.
- Somerville, L. H., Jones, R. M., & Casey, B. J. (2010). A time of change: behavioral and neural correlates of adolescent sensitivity to appetitive and aversive environmental cues. *Brain and Cognition*, 72(1), 124-133.
- Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, 6(3), 309-315.
- Spiriduso, W. W. (1980). Physical fitness, aging, and psychomotor speed: a review. *The Journal of Gerontology*, 35(6), 850-865.
- Spitzer, M. (2008). Geist & Gehirn: Pubertät im Kopf. *Nervenheilkunde*, 27(7), 674-678.
- St. John, P. D., & Montgomery, P. R. (2010). Cognitive impairment and life satisfaction in older adults. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 25(8), 814-821.
- Staff, R. T., Murray, A. D., Deary, I. J., & Whalley, L. J. (2004). What provides cerebral reserve? *Brain*, 127, 1191-1199.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2009). *Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2013). *Gesundheit Ausgaben 1995 bis 2011. Fachserie 12 Reihe 7.1.2*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Steffener, J., Barulli, D., Habeck, C., O'Shea, D., Razlighi, Q., Stern, Y., & Chao, L. (2014). The role of education and verbal abilities in altering the effect of age-related gray matter differences on cognition. *PLoS ONE*, 9(3), e91196. doi:10.1371/journal.pone.0091196

- Steffener, J., Brickman, A., Rakitin, B., Gazes, Y., & Stern, Y. (2009). The impact of age-related changes on working memory functional activity. *Brain Imaging and Behavior*, 3(2), 142-153.
- Stephens, R. (2006). Age-related decline in Digit-Symbol performance: Eye-movement and video analysis. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(1), 101-107.
- Stern, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8(3), 448-460.
- Stern, Y. (2006). Cognitive reserve and Alzheimer disease. *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, 20(2), 112-117.
- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47(10), 2015-2028.
- Stern, Y. (2013). *Cognitive reserve*. New York: Taylor and Francis.
- Stern, Y., Gurland, B., Tatemichi, T. K., Tang, M., Wilder, D., & Mayeux, R. (1994). Influence of education and occupation on the incidence of alzheimer's disease. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, 271(13), 1004-1010.
- Stern, Y., Habeck, C., Moeller, J., Scarmeas, N., Anderson, K. E., Hilton, H. J., . . . van Heertum, R. (2005). Brain networks associated with cognitive reserve in healthy young and old adults. *Cerebral Cortex*, 15(4), 394-402.
- Stern, Y., Rakitin, B. C., Habeck, C., Gazes, Y., Steffener, J., Kumar, A., & Reuben, A. (2012). Task difficulty modulates young-old differences in network expression. *Brain Research*, 1435(0), 130-145.
- Steverink, N., Lindenberg, S., & Ormel, J. (1998). Towards understanding successful ageing: patterned change in resources and goals. *Ageing & Society*, 18(04), 441-467.
- Stranahan, A. M. (2012). Metabolic reserve as a determinant of cognitive aging. *Journal of Alzheimer's Disease*, 30, S5-S13.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Stroth, S., Kubesch, S., Dieterle, K., Ruchsow, M., Heim, R., & Kiefer, M. (2009). Physical fitness, but not acute exercise modulates event-related potential indices for executive control in healthy adolescents. *Brain Research*, 1269, 114-124.
- Suchy, Y., Kraybill, M. L., & Franchow, E. (2011). Instrumental activities of daily living among community-dwelling older adults: discrepancies between self-report and performance are mediated by cognitive reserve. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 33(1), 92-100.

- Sullivan, E. V., & Pfefferbaum, A. (2006). Diffusion tensor imaging and aging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30(6), 749-761.
- Sumowski, J. F., Chiaravalloti, N., & DeLuca, J. (2009). Cognitive reserve protects against cognitive dysfunction in multiple sclerosis. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 31(8), 913-926.
- Supekar, K., Menon, V., Rubin, D., Musen, M., & Greicius, M. D. (2008). Network analysis of intrinsic functional brain connectivity in Alzheimer's disease. *PLOS Computational Biology*, 4(6), 1-11. doi:10.1371/journal.pcbi.1000100
- Sutoo, D. e., & Akiyama, K. (1996). The mechanism by which exercise modifies brain function. *Physiology and Behavior*, 60(1), 177-181.
- Sutoo, D. e., & Akiyama, K. (2003). Regulation of brain function by exercise. *Neurobiology of Disease*, 13(1), 1-14.
- Swain, R. A., Harris, A. B., Wiener, E. C., Dutka, M. V., Morris, H. D., Theien, B. E., . . . Greenough, W. T. (2003). Prolonged exercise induces angiogenesis and increases cerebral blood volume in primary motor cortex of the rat. *Neuroscience*, 117(4), 1037-1046.
- Thelen, E. (2000). Grounded in the world: developmental origins of the embodied mind. *Infancy*, 1(1), 3-28.
- Thomas, A. G., Dennis, A., Bandettini, P. A., & Johansen-Berg, H. (2012). The effects of aerobic activity on brain structure. *Frontiers in Psychology*, 3, 1-9. doi:10.3389/fpsyg.2012.00086
- Thomassen, T. O., & Halvari, H. (1996). Achievement motivation and involvement in sport competitions. *Perceptual and Motor Skills*, 83, 1363-1374.
- Tomporowski, P. D. (2003). Cognitive and behavioral responses to acute exercise in youths: a review. *Pediatric Exercise Science*, 15(4), 348-359.
- Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educational Psychology Review*, 20(2), 111-131.
- Trautwein, U. (2004). Die temporalen Facetten der Lebenszufriedenheit. *Diagnostica*, 50(4), 182-192.
- Uhlhaas, P. J. (2011). *Das adoleszente Gehirn* (1. Auflage). Stuttgart: Kohlhammer.
- United Nation. (2002). *Madrid-II International Plan of Action on Aging*. New York (NY): United Nation.

- Vaidya, V. A., Marek, G. J., Aghajanian, G. K., & Duman, R. S. (1997). 5-HT_{2A} receptor-mediated regulation of brain-derived neurotrophic factor mRNA in the hippocampus and the neocortex. *The Journal of Neuroscience*, *17*(8), 2785-2795.
- Valenzuela, M. J., & Sachdev, P. (2006). Brain reserve and dementia: a systematic review. *Psychological Medicine*, *36*(04), 441-454. doi:10.1017/S0033291705006264
- Valenzuela, M. J., & Sachdev, P. (2007). Assessment of complex mental activity across the lifespan: development of the Lifetime of Experiences Questionnaire (LEQ). *Psychological Medicine*, *37*(07), 1015-1025. doi:10.1017/S003329170600938X
- van Praag, H. (2009). Exercise and the brain: something to chew on. *Trends in Neurosciences*, *32*(5), 283-290.
- van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *96*(23), 13427-13431.
- van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. H. (2000). Neural consequences of environmental enrichment. *Nature Reviews Neuroscience*, *1*(3), 191-198.
- Vaynman, S., & Gomez-Pinilla, F. (2005). License to run: exercise impacts functional plasticity in the intact and injured central nervous system by using neurotrophins. *Neurorehabilitation & Neural Repair*, *19*(4), 283-295.
- Vaynman, S. S., Ying, Z., Yin, D., & Gomez-Pinilla, F. (2006). Exercise differentially regulates synaptic proteins associated to the function of BDNF. *Brain Research*, *1070*(1), 124-130.
- Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*(11), 418-424.
- Verleger, R. (1997). On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology*, *34*(2), 131-156.
- Volkow, N. D., Logan, J., Fowler, J. S., Wang, G.-J., Gur, R. C., Wong, C., . . . Hitzemann, R. (2000). Association between age-related decline in brain dopamine activity and impairment in frontal and cingulate metabolism. *The American Journal of Psychiatry*, *157*(1), 75-80.
- Vollrath, M., & Torgersen, S. (2000). Personality types and coping. *Personality and Individual Differences*, *29*(2), 367-378.

- Voss, M. W., Chaddock, L., Kim, J. S., VanPatter, M., Pontifex, M. B., Raine, L. B., . . . Kramer, A. F. (2011a). Aerobic fitness is associated with greater efficiency of the network underlying cognitive control in preadolescent children. *Neuroscience*, *199*, 166-176.
- Voss, M. W., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Chaddock, L., Malkowski, E., Alves, H., . . . Kramer, A. F. (2010a). Functional connectivity: a source of variance in the association between cardiorespiratory fitness and cognition? *Neuropsychologia*, *48*(5), 1394-1406.
- Voss, M. W., Heo, S., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Alves, H., Chaddock, L., . . . White, S. M. (2013). The influence of aerobic fitness on cerebral white matter integrity and cognitive function in older adults: results of a one-year exercise intervention. *Human Brain Mapping*, *34*(11), 2972-2985.
- Voss, M. W., Nagamatsu, L. S., Liu-Ambrose, T., & Kramer, A. F. (2011b). Exercise, brain, and cognition across the life span. *Journal of Applied Physiology*, *111*(5), 1505–1513.
- Voss, M. W., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J. S., . . . White, S. M. (2010b). Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *2*, 1-17. doi:10.3389/fnagi.2010.00032
- Wahlstrom, D., Collins, P., White, T., & Luciana, M. (2010). Developmental changes in dopamine neurotransmission in adolescence: Behavioral implications and issues in assessment. *Brain and Cognition*, *72*(1), 146-159.
- Waiter, G. D., Fox, H. C., Murray, A. D., Starr, J. M., Staff, R. T., Bourne, V. J., . . . Deary, I. J. (2008). Is retaining the youthful functional anatomy underlying speed of information processing a signature of successful cognitive ageing? An event-related fMRI study of inspection time performance. *Neuroimage*, *41*(2), 581-595.
- Wang, G.-J., Volkow, N. D., Fowler, J. S., Franceschi, D., Logan, J., Pappas, N. R., . . . Netusil, N. (2000). PET studies of the effects of aerobic exercise on human striatal dopamine release. *The Journal of Nuclear Medicine*, *41*(8), 1352-1356.
- Wang, Y., West, J. D., Flashman, L. A., Wishart, H. A., Santulli, R. B., Rabin, L. A., . . . Saykin, A. J. (2012). Selective changes in white matter integrity in MCI and older adults with cognitive complaints. *BBA Biochimica et Biophysica Acta*, *1822*(3), 423-430.

- Watson, C., Kirkcaldie, M., & Paxinos, G. (2010). *The brain: an introduction to functional neuroanatomy*. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press.
- Weinstein, A. M., Voss, M. W., Prakash, R. S., Chaddock, L., Szabo, A., White, S. M., . . . Kramer, A. F. (2012). The association between aerobic fitness and executive function is mediated by prefrontal cortex volume. *Brain, Behavior, and Immunity*, 26(5), 811-819.
- Whaley, M. H., Brubaker, P. H., Otto, R. M., & Armstrong, L. E. (2006). *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription* (7. Auflage). Philadelphia, Pa: Lippincott Williams & Wilkins.
- Wilhelm, O., Schulze, R., Schmiedek, F., & Suss, H. M. (2003). Interindividuelle Unterschiede im typischen intellektuellen Engagement. *Diagnostica*, 49(2), 49-60.
- Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L. (2008). *Physiology of sport and exercise* (4. Auflage). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Wilson, M.-M. G., & Morley, J. E. (2003). Invited review: aging and energy balance. *Journal of Applied Physiology*, 95(4), 1728-1736.
- Wilson, R., Leurgans, S., Boyle, P., Schneider, J., & Bennett, D. (2010). Neurodegenerative basis of age-related cognitive decline. *Neurology*, 75(12), 1070-1078.
- Wilson, R. S. (2009). Elderly women with larger social networks are less likely to develop dementia. *Evidence-Based Mental Health*, 12(1), 22.
- Wilson, R. S., Beckett, L. A., Barnes, L. L., Schneider, J. A., Bach, J., Evans, D. A., & Bennett, D. A. (2002). Individual differences in rates of change in cognitive abilities of older persons. *Psychology and Aging*, 17(2), 179-193.
- Winter, B., Breitenstein, C., Mooren, F. C., Voelker, K., Fobker, M., Lechtermann, A., . . . Knecht, S. (2007). High impact running improves learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 87(4), 597-609.
- Winterstein, P. J. (1991). *Leistungsmotivationsförderung im Sportunterricht: Empirische Untersuchungen an brasilianischen Grundschulen*. Hamburg: Kovac.
- Wise, R. A. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(6), 483-494.
- World Health Organization. (1946). *Verfassung der Weltgesundheitsorganisation*. Genf: WHO.
- Yanagisawa, H., Dan, I., Tsuzuki, D., Kato, M., Okamoto, M., Kyutoku, Y., & Soya, H. (2010). Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test. *Neuroimage*, 50(4), 1702-1710.

- Yang, L., Krampe, R. T., & Baltes, P. B. (2006). Basic forms of cognitive plasticity extended into the oldest-old: retest learning, age, and cognitive functioning. *Psychology and Aging, 21*(2), 372-378.
- Yang, L., Reed, M., Russo, F. A., & Wilkinson, A. (2009). A new look at retest learning in older adults: learning in the absence of item-specific effects. *The Journals of Gerontology. Series B: Psychological Sciences & Social Sciences, 64*(4), 470-473.
- Yeung, N., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error detection: conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological Review, 111*(4), 931-959.
- Zhou, Y., Dougherty Jr, J. H., Hubner, K. F., Bai, B., Cannon, R. L., & Hutson, R. K. (2008). Abnormal connectivity in the posterior cingulate and hippocampus in early Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Alzheimer's & Dementia, 4*(4), 265-270.
- Zieger, L. (2010). *Kognitive Reserve bei Patienten mit unipolarer Depression*. Unveröffentlichte Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- Ziegler, M., Danay, E., Heene, M., Asendorpf, J., & Bühner, M. (2012). Openness, fluid intelligence, and crystallized intelligence: toward an integrative model. *Journal of Research in Personality, 46*(2), 173-183.
- Zihl, J., Fink, T., Pargent, F., Ziegler, M., Bühner, M., & Bayer, A. (2014). Cognitive reserve in young and old healthy subjects: differences and similarities in a testing-the-limits paradigm with DSST. *PLoS ONE, 9*(1), e84590.
doi:10.1371/journal.pone.0084590
- Zimmermann, P., & Fimm, B. (2009). *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP). Version 2.2*. Herzogenrath: Psytest.

Anhang

Anhang A: Modifizierter Zahlen-Symbol-Test (ZST; Studie I und II)

Anhang B: Korrelationsmatrix (Studie I)

Anhang C: Selbstberichtete körperliche Aktivität (Studie II)

Anhang D: Selbstbestimmtheit bei sportlicher Aktivität (Studie II)

Anhang E: Korrelationsmatrix (Studie II)

Anhang B: Korrelationsmatrix (Studie I)

Sportler (oben) - Nichtsportler (unten)

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 Sport/Woche	--	.12	-.23*	-.26*	.01	.24*	-.03	-.03	.18	.07	-.16	-.03	.16
2 Jahre/Sport	.41**	--	.09	.23	.12	.18	-.09	.03	.17	-.17	-.21	.08	.09
3 Body-Mass-Index	-.19	-.11	--	.15	-.07	-.08	-.10	-.11	-.30*	-.13	.29*	.20	-.02
4 Sportart	--	--	--	--	.04	-.07	.18	.10	.09	-.29*	-.04	.28*	-.07
5 Invoerarbeitung	-.20	-.22	.35*	--	--	.60**	.02	.10	.34**	-.05	-.14	-.10	.04
6 Inhibition	-.19	-.37*	.00	--	.62**	--	.07	-.18	.18	-.01	-.12	.03	.09
7 Interferenz	-.06	-.01	-.23	--	.33*	.07	--	-.06	.09	-.05	-.00	.23*	-.08
8 Flexibilität	.08	-.02	-.47**	--	.14	-.15	-.11	--	.32**	.03	-.32**	-.14	-.19
9 SAI (Strategie)	.04	-.04	-.33*	--	.02	-.22	.39*	-.20	--	-.13	-.11	.09	-.05
10 Übungsgewinn	.19	.20	.05	--	-.20	.12	-.07	-.04	-.33*	--	.05	-.02	.36**
11 Note Mathematik	-.21	-.15	.24	--	.17	.25	-.04	-.36*	.17	-.20	--	.33**	.10
12 Note Deutsch	-.40**	-.10	.05	--	.32	.44**	.09	-.23	-.06	-.09	.49**	--	.27*
13 Note Musik	-.18	-.08	.13	--	.10	.20	-.25	-.28	.11	-.04	.66**	.52**	--

Anmerkungen. Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$. ** $p \leq .01$. SAI = Speed-Accuracy-Index.

Anhang C: Selbstberichtete körperliche Aktivität (Studie II)

Einschätzung der derzeitigen körperlichen Aktivität:

Bitte wählen Sie eine Kategorie aus, die Ihre normalen, alltäglichen körperlichen Aktivitäten am besten beschreibt (einschließlich aller körperlichen Aktivitäten wie Haushalt und Versorgung der Familie/ des Partners betreffend, in beruflichem Zusammenhang, sportlichem Üben oder Training sowie sonstiger Freizeit- und Erholungsaktivitäten):

- Kategorie 1: Inaktiv oder wenig Aktivität außer den normalen täglichen Aktivitäten
- Kategorie 2: Regelmäßige körperliche Aktivität mit **niedrigem Anstrengungsgrad**
– erkennbar an einer **leichten Zunahme** der Atemfrequenz und des Herzschlages – **mindestens 5 Tage/Woche für jeweils mindestens 10 min**
- Kategorie 3: Teilnahme an aerobem Training wie forschem Walken, Jogging oder Laufen, Radfahren, Schwimmen oder intensiven (Spiel-) Sportarten wie Basketball oder Fußball **mit mittlerem Anstrengungsgrad** oder anderen Aktivitäten mit vergleichbarem Anstrengungsgrad – erkennbar an einer **deutlichen Zunahme** der Atemfrequenz und des Herzschlages – für **20 bis 60 Minuten pro Woche**
- Kategorie 4: Teilnahme an aerobem Training wie forschem Walken, Jogging oder Laufen **mit mittlerem Anstrengungsgrad** oder anderen Aktivitäten mit vergleichbarem Anstrengungsgrad – erkennbar an einer **deutlichen Zunahme** der Atemfrequenz und des Herzschlages – für **Stunden pro Woche**
- Kategorie 5: Teilnahme an aerobem Training wie forschem Walken, Jogging oder Laufen **mit mittlerem Anstrengungsgrad** oder anderen Aktivitäten mit vergleichbarem Anstrengungsgrad – erkennbar an einer **deutlichen Zunahme** der Atemfrequenz und des Herzschlages –für **mehr als 3 Stunden pro Woche.**

Anhang D: Selbstbestimmtheit bei sportlicher Aktivität (Studie II)

Ich betreibe Sport, weil:								
... jemand anderes (Partner, Arzt etc.) möchte, dass ich Sport treibe - oder weil ich von jemand anderem Anerkennung oder Lob dafür bekomme								
()	()	()	()	()	()	()	()	()
1	2	3	4	5	6	7	8	9
keinesfalls aus diesem Grund							genau aus diesem Grund	
... ich besorgt wäre, mich schlecht fühlen würde, wenn ich keinen Sport treibe - ich sollte mich bemühen Sport zu treiben								
()	()	()	()	()	()	()	()	()
1	2	3	4	5	6	7	8	9
keinesfalls aus diesem Grund							genau aus diesem Grund	
... ich Sport aus ganzem Herzen befürworte und es ein wichtiges Ziel für mich ist								
()	()	()	()	()	()	()	()	()
1	2	3	4	5	6	7	8	9
keinesfalls aus diesem Grund							genau aus diesem Grund	
... ich den Spaß und das Vergnügen dabei genieße								
()	()	()	()	()	()	()	()	()
1	2	3	4	5	6	7	8	9
keinesfalls aus diesem Grund							genau aus diesem Grund	

Anhang E: Korrelationsmatrix (Studie II)

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
1 Alter																																					
2 Geschlecht	.24																																				
3 Fluide Intelligenz	-.26*	.13																																			
4 Bildungsjahre	.11	.44**	.34**																																		
5 Depressivität	.12	-.21	-.25	-.21																																	
6 Einkommen	.09	.51**	.18	.58**	-.35**																																
7 Body-Mass-Index	.00	.19	-.03	-.07	.17	-.01																															
8 Sportliche Aktivität	-.05	-.19	-.06	-.06	.12	-.14	-.10																														
9 rVO2max	-.17	.62**	.20	.34**	-.19	.33*	-.20	.50**																													
10 Greifkraft	-.13	.55**	.31*	.22	-.27*	.23	-.38**	-.03	.49**																												
11 Peak-Flow-Wert	-.04	.34**	.36**	.30*	-.01	-.07	.16	-.04	.21	.49**																											
12 FEV ₁	-.30**	.19	.28*	.17	-.08	-.09	-.03	.06	.32*	.46**	.71**																										
13 Zahlen-Symbol-Test	-.41**	-.11	.27*	.03	-.17	.08	-.10	-.21	-.06	-.03	.08	.14																									
14 Alertness	.04	-.25	.04	-.21	.04	-.31*	.11	.11	-.22	-.34**	-.22	-.14	-.05																								
15 Konzentration	-.20	.07	.38**	.32*	-.33*	.17	.00	-.19	.00	-.04	.18	.25	.56**	-.06																							
16 Inhibition	-.00	.18	.31*	.10	-.17	.20	-.14	.01	.26*	.20	.23	.27*	-.11	.24																							
17 Interferenz	.15	-.09	-.31*	-.28*	.10	-.27*	.02	-.01	-.15	.02	-.13	-.11	-.31*	-.06	-.34**	-.21																					
18 Flexibilität	-.24	-.18	.34**	.04	-.17	.16	.18	.07	-.13	.08	.13	.10	.41**	-.02	.37**	.28*	-.34**																				
19 SAI (Strategie)	-.01	-.22	.04	-.04	.21	-.09	.04	-.02	-.23	-.17	.04	-.10	-.22	.14	-.28*	-.10	.01	-.06																			
20 Kurzzeitgedächtnis	-.16	.11	.54**	.18	-.10	.13	.09	.05	.13	.19	.15	.16	.19	-.02	.31*	.34**	.25	.44**	-.04																		
21 Arbeitsgedächtnis	-.11	-.01	.43**	.29*	-.10	.16	.10	.07	.06	.02	.14	.14	.29*	.00	.49**	.22	-.45**	.47**	-.07	.62**																	
22 Übungsgewinn	-.10	.01	.26*	.06	-.09	-.01	.05	-.01	.02	.08	.09	.16	.15	.03	.20	.23	-.28*	.36**	.03	.29*	.25																
23 Lesen (TIE)	.20	-.07	.07	.11	-.13	.21	-.21	.27*	.07	-.09	-.17	-.03	-.19	.00	-.09	.00	-.05	.12	.06	.02	.07	.07															
24 Kontemplation (TIE)	-.10	.09	.40**	.46**	-.14	.35**	-.04	-.03	.12	.06	.24	.28*	.28*	.09	.42**	.20	-.33**	.30*	.07	.13	.24	.29*	.10														
25 Neugier (TIE)	.15	-.03	.13	.07	.03	.10	.18	-.02	-.17	-.25	-.06	-.04	.10	.26*	.10	.28*	-.17	-.01	.06	.04	-.03	.02	.33*	.37**													
26 Selbstbestimmtheit	-.05	-.24	-.02	-.14	.01	-.02	-.41**	.45**	.24	.21	.17	.03	-.06	-.27*	-.17	-.13	.00	.01	.00	-.07	-.11	-.12	.18	.01	-.12												
27 LZF Vergangenheit	-.04	.079	-.17	.01	-.01	.00	-.03	-.02	.08	.15	.09	.10	.07	-.21	.02	.02	.19	-.12	-.15	-.14	-.37**	-.16	-.11	-.04	.05	.24											
28 LZF Gegenwart	-.11	-.07	.00	.02	-.28*	.12	-.05	.39**	.17	.14	.01	.18	.02	.16	-.04	.05	-.03	.19	-.17	.02	-.16	-.02	.15	.04	.09	.20	.27*										
29 LZF Zukunft	-.11	-.03	-.08	.07	-.06	.13	-.01	.32*	.18	.03	.05	.15	-.11	.03	-.17	-.14	-.08	.10	.06	-.07	-.17	.04	.22	.19	.07	.30*	.18	.62**									
30 Neurotizismus	-.01	-.23	-.14	-.26*	.49**	-.31*	-.05	-.05	-.21	-.21	-.26*	-.23	-.11	.05	-.14	-.31*	.11	-.15	.11	.00	-.05	-.05	-.06	-.02	.14	-.17	-.14	-.38**	-.19								
31 Extraversion	.17	.31*	-.05	.14	.13	.07	-.19	.09	-.19	-.05	.18	.10	.05	-.21	.01	.16	-.06	.02	.09	-.04	.08	.02	.15	.33*	.11	.32*	.13	-.09	-.14	-.02							
32 Offenheit	.11	-.06	.10	.32*	-.08	.19	.11	.04	-.09	-.11	.07	.09	-.03	.09	.23	.19	-.36**	.17	.00	.09	.22	.18	.16	.59**	.38**	.04	-.20	.21	.25	-.13	.23						
33 Verträglichkeit	.08	-.18	.15	.03	-.04	-.10	-.01	.03	-.13	.11	.16	-.02	.00	.07	.03	.28*	-.26*	.21	.05	.17	.19	.23	-.01	.16	-.02	.28*	-.04	.10	-.18	.26*	.27*						
34 Gewissenhaftigkeit	.04	-.13	.09	.09	.06	.04	-.15	.08	-.01	-.04	.22	.27*	.01	.10	.12	.17	-.19	.08	.14	.12	.06	.09	-.10	.38**	.03	.12	-.12	.10	.09	-.01	.33**	.34**	.04				

Anmerkung: Signifikanzniveaus: * $p \leq .05$; ** $p \leq .01$; rVO2max = relative maximale Sauerstoffaufnahme; FEV₁ = Einsekundenkapazität; SAI = Speed-Accuracy-Index; TIE = Typisches intellektuelles Engagement; LZF = Lebenszufriedenheit.

