

Der Zusammenhang zwischen motorischen Fertigkeiten und exekutiven
Funktionen im Vorschul- und frühen Erwachsenenalter

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doctor philosophiae (Dr. phil.)

der Philosophischen Fakultät

der Universität Rostock

vorgelegt von

Christina Stuhr, geb. am 03.04.1985 in Güstrow

aus Rostock

Rostock, 04.06.2020

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003020



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen
Bedingungen 4.0 International Lizenz.

Dekan: Prof. Dr. phil. habil. Hillard von Thiessen

1. Gutachter: Prof. Dr. Stefanie Klatt

2. Gutachter: Prof. Dr. Matthias Weigelt

3. Gutachter: Prof. Dr. Charmayne Mary Lee Hughes

Datum der Verteidigung: 25. Februar 2021

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	II
Kurzzusammenfassung.....	2
1 Einführung.....	2
2 Das Konstrukt der exekutiven Funktionen	2
2.1 Definition und Bedeutung einzelner exekutiver Funktionen	2
2.1.1 Arbeitsgedächtnis	2
2.1.2 Inhibitorische Kontrolle.....	2
2.1.3 Kognitive Flexibilität.....	2
2.1.4 Planung	2
2.2 Entwicklungsverlauf der drei Kernfunktionen Arbeitsgedächtnis, Inhibition und kognitive Flexibilität sowie der Planungsfähigkeit.....	2
2.3 Der Zusammenhang zwischen exekutiven und motorischer Funktionen - Korrelationsstudien	2
2.4 Darstellung bisheriger Interventionsstudien.....	2
3 Spezifität und der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit (Studie 1).....	2
3.1 Material und Methoden.....	2
3.1.1 Probanden	2
3.1.2 Ablauf und Testauswahl der Untersuchung	2
3.1.3 Datenanalyse	2
3.2 Ergebnisse.....	2
3.3 Diskussion	2
4 Unterschiedliche Nutzung exekutiver Funktionen bei Vorschulkindern und jungen Erwachsenen (Studie 2).....	2
4.1 Untersuchungsmethodik	2
4.1.1 Probanden	2
4.1.2 Ablauf und Testauswahl der Untersuchung.....	2
4.1.3 Datenanalyse	2
4.2 Ergebnisse.....	2
4.3 Diskussion	2

5 Untersuchung der Kausalität zwischen exekutiven Funktionen und der Handgeschicklichkeit bei fünf- bis sechsjährigen Kindern (Studie 3)	2
5.1 Untersuchungsmethodik	2
5.1.1 Probanden	2
5.1.2 Ablauf und Testauswahl von Prä- und Posttest	2
5.1.3 Intervention	2
5.1.4 Datenanalyse	2
5.2 Ergebnisse.....	2
5.3 Diskussion	2
6 Gesamtdiskussion und Ausblick.....	2
6.1 Der Einfluss der Aufgabenspezifität auf das Domänenzusammenspiel	2
6.2 Der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit und des kalendarischen Alters auf das Domänenzusammenspiel	2
6.3 Einfluss eines Handgeschicklichkeitstrainings auf die exekutiven Funktionen von fünf- bis sechsjährigen Kindern	2
6.4 Implikationen für zukünftige Untersuchungen zum Forschungsgegenstand.....	2
7 Fazit.....	2
Literaturverzeichnis.....	2
Anhang.....	2
Danksagung.....	2
Curriculum Vitae.....	2
Eigenständigkeitserklärung.....	2

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

η^2	Eta Quadrat
AP	anterior-posterior
AuO	Bedingung: Augen offen
AuZ	Bedingung: Augen geschlossen
CBT	<i>Corsi Block-Tapping Test</i>
CBT _{GSpanne}	abhängige Variable: Corsi Block-Tapping Test
CoP	<i>center of pressure</i>
DLPFC	dorsolateraler präfrontaler Kortex
EF/EFs	Exekutive Funktion/Exekutive Funktionen
E-VG	einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit
F-Rt _{korrekt}	abhängige Variable: <i>Flanker Test</i>
GKS	Gleichgewichts-Koordinations-System
HG _{fein}	abhängige Variable: Handgeschicklichkeit fein
HG _{grob}	abhängige Variable: Handgeschicklichkeit grob
H-Rt _{korrekt}	abhängige Variable: <i>Hearts & Flowers Test</i>
Hz	Hertz
IG	Interventionsgruppe
KG	Kontrollgruppe
KZG	Kurzzeitgedächtnis
ML	medio-lateral
mm	Millimeter
ms	Millisekunden
PAD	Bedingung: auf einem Balancepad stehend
PEBL	Software: <i>Psychology Experiment Building Language</i>
PFC	präfrontaler Cortex
PV	Performancevariabilität
RT/Rt	Reaktionsgeschwindigkeit
Sek.	Sekunde/n
TMT	<i>Trail Making Test</i>
TMT-B _A	abhängige Variable: <i>Trail Making Test</i>
TOL	<i>Tower of London Test</i>
TOL _{t/korrekt}	abhängige Variable: <i>Tower of London Test</i>
WCST	<i>Wisconsin Card Sorting Test</i>
WCST _{Fehler}	abhängige Variable: <i>Wisconsin Card Sorting Test</i>

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Rahmenkonzeption für das Konstrukt der exekutiven Funktionen in Anlehnung an Diamond (2013) (übersetzt ins Deutsche). Die für die Arbeit relevanten Bestandteile des Konstrukt sind farbig markiert. Die englischen Begriffe (in violett) sind die ursprünglich gewählten englischen Bezeichnungen, die nicht adäquat ins Deutsche übersetzt werden konnten..... 2
- Abbildung 2:** Mögliche Wege und damit potentielle Interventionsinhalte zur Förderung von EFs nach Diamond (2012) (übersetzt ins Deutsche). 2
- Abbildung 3:** Standardisierte Regressionskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen spezifischen EFs (A) Inhibition/Selbstregulation, (B) Kognitive Flexibilität/set shifting, (C) Kognitive Flexibilität/response shifting und der Gleichgewichtsfähigkeit unter dem Einfluss der Performancevariabilität als mediierender Faktor. Dargestellt sind die standardisierten Regressionskoeffizienten mit den adjustierten Benjamini-Hochberg p-Werten, *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, $^{\$}p < .10$, N = 46..... 2
- Abbildung 4:** Partielle Korrelationen zwischen den motorischen Fähigkeiten (A) Handgeschicklichkeit, (B) Gleichgewicht, (C) Schnelligkeit und Geschicklichkeit und (D) Kraft, sowie den Tests zur Erfassung der exekutiven Funktionen (Arbeitsgedächtnis, Inhibition/Selbstregulation, Inhibition/selektive Aufmerksamkeit, kognitive Flexibilität) bei Vorschulkindern und jungen Erwachsenen. Die Fehlerbalken zeigen die 95% Konfidenzintervalle der Pearson Korrelationskoeffizienten an. Der grau schraffierte Bereich markiert die Zone ($-0,1 < r < 0,1$) ohne Effekt. Die jeweiligen Korrelationen wurden entsprechend dem Ergebnis der Regressionsanalyse, falls notwendig für Geschlecht, BMI und/oder Verarbeitungsgeschwindigkeit korrigiert..... 2
- Abbildung 5:** Leistungen der Kontroll- (KG) und der Interventionsgruppe (IG) in den Tests zur Handgeschicklichkeit (A: Pegboard, B: BOT-2) zum Zeitpunkt des Prätests und dem nach dem Handgeschicklichkeitstraining stattgefundenen Posttest. Das feinmotorische Training führte (im Vergleich zum Vorlesen) zu Verbesserungen in der Handgeschicklichkeit. Die Daten wurden für Alter, Geschlecht, Zeit in der Kita, sportliche Aktivität und Nutzung elektronischer Geräte kontrolliert. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall. * = $p \geq .05$ 2
- Abbildung 6:** Standardisierte Arbeitsgedächtnisleistung für die Kontroll- (KG) und die Interventionsgruppe (IG), gemittelt über die drei Tests zur Erfassung der verschiedenen Arbeitsgedächtniskomponenten, zum Prä- und zum Posttest. Das feinmotorische Training resultierte (im Vergleich zum Vorlesen) in einer verbesserten Arbeitsgedächtnisleistung. Die Daten wurden für Alter, Geschlecht, Zeit in der Kita, sportliche Aktivität und Nutzung elektronischer Geräte kontrolliert. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall..... 2
- Abbildung 7:** Die Leistungen von Kontroll- (KG) und Interventionsgruppe (IG) in den einzelnen Arbeitsgedächtnistests zur Erfassung (A) der zentralen Exekutive (List Sorting-Test), (B) dem visuell-räumlichen KZG (CBT) und (C) dem verbalen KZG (SETK/Merkspanne) zum Prä- und zum Posttest. Keine der Gruppe erzielt signifikante Leistungszuwächse. Die zentrale Exekutive und das visuell-räumliche KZG profitieren jedoch zu einem höheren Ausmaß als das verbale KZG von einem feinmotorischen Training (im Vergleich zum Vorlesen). Die Daten wurden für Alter, Geschlecht, Zeit in der Kita, sportliche Aktivität und Nutzung elektronischer Geräte kontrolliert. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall..... 2

Abbildung 8: Vergleich der Leistungen zwischen den Probanden der zweiten und dritten Teilstudie im List Sorting Test (links) und Purdue Pegboard Test (rechts). Trotz gleichen Alters zeigen die Probanden aus Studie 2 im Durchschnitt schlechtere Leistungen (List Sorting: Median SD; Pegboard: Median SD) als die Probanden der Studie 3 (List Sorting: Median SD; Pegboard: Median SD) 2

Abbildung 9: Ein hypothetisches Konzept das die möglichen Interaktionswege zwischen der exekutiven und motorischen Ebene darzustellen versucht: vermutete Relationen der ermittelten Einflussfaktoren (der vorliegenden Arbeit) zueinander bzw. in Abhängigkeit voneinander..... 2

Abbildung 10: In Anlehnung an Jain und Spieß (2012): Ein mögliches Multiples-Baseline-Design für die Einzelfallanalysen zur Förderung der zugrundeliegenden Prozesse von EFs (z. B. der AX-CPT Test zur Erfassung der proaktiven kognitiven Kontrolle)..... 2

Abbildung 11: Schritt für Schritt Bastelanleitung des „Himmel und Hölle“ – Spiels (Kloskowski, o.J.) aus Station 2 der Intervention in Studie 3..... 2

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht bisheriger Korrelationsstudien zum Domänenzusammenhang. Die genutzten motorischen Tests sind eingeteilt nach Fein- und Grobmotorik sowie einer Kombination beider Inhalte und Aufgaben, die der motorischen Planung zuzuordnen sind. Die genutzten Tests zur Erfassung der EFs sind eingeteilt nach Arbeitsgedächtnis, Inhibition, kognitiver Flexibilität und höheren EFs.....	16
Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsstudien. Es wird die Anzahl an Studien ersichtlich, die in den jeweiligen genannten Bereichen existieren, sowie die Anzahl der Untersuchungen, die innerhalb dieser Auswahl über signifikante positive Assoziationen berichten (sowie deren Übertrag in einen Prozentwert).....	2
Tabelle 3: Übersicht bisheriger motorischer Interventionsstudien mit koordinativen Inhalten zur Förderung von EFs. Die genutzten Tests zur Erfassung der exekutiven Funktionen sind eingeteilt nach Arbeitsgedächtnis, Inhibition und kognitiver Flexibilität. Bei den mit *markierten Studien wurden die Effekte teils selbst berechnet (aufgrund fehlender Angaben in der Originalstudie), weshalb es zu unterschiedlichen Aussagen in der Tabelle und der Originalstudie kommen kann.	30
Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Interventionsstudien. Es wird die Anzahl an Studien ersichtlich, die versucht haben, durch motorisches Training einzelne EFs zu fördern, sowie die Anzahl der Untersuchungen, die dabei über signifikant positive Leistungszuwächse berichteten (sowie deren Übertrag in einen Prozentwert).....	2
Tabelle 5: Deskriptive Statistik (Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD)) für alle relevanten Variablen und die individuelle Performancevariabilität (PV) gemittelt über alle Probanden für die Aufgabe zur statischen posturalen Kontrolle/Gleichgewicht.....	2
Tabelle 6: Direkte Effekte (d. h. Effekt der EF auf Gleichgewichtsfähigkeit) und indirekte Effekte (d. h. Effekt der EF auf Gleichgewichtsfähigkeit indirekt erklärt durch den Mediator Performance-variabilität) zwischen der Gleichgewichtsfähigkeit und den kognitiven Kontrollprozessen Inhibition/ Selbst-regulation, Kognitive Flexibilität/response shifting und Kognitive Flexibilität/set shifting, gemittelt über alle drei Bedingungen und für jede Kondition isoliert (Augen geöffnet, Balance-Pad, Augen geschlossen). Dargestellt sind Sobel Test β -Werte. Anmerkung: *** $p<0.001$, ** $p<0,01$, * $p<0,05$ wie durch den Sobel Z Test angezeigt.	2
Tabelle 7: Demographische Daten und deskriptive Statistik (Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern)) aller motorischen und kognitiven Variablen von Vorschulkindern und jungen Erwachsenen, sowie die statistischen Kennzahlen der Prüfung von Unterschieden zwischen den Gruppen.....	2
Tabelle 8: Ergebnisse der multiplen hierarchischen Regressionen bei Kindern und Erwachsenen zur Prädiktion von motorischen durch exekutive Funktionen. Die standardisierten kognitiven Variablen (LS, HF _{Fehler-diff} bzw. HF _{Rt-diff} , FF _{Fehler} , WCST _{Fehler}) wurden als separate Regressionen in Model 2 (M2) eingefügt, um die Varianzaufklärung für jede einzelne motorische Fähigkeit (jeweils bei Kindern und bei Erwachsenen) zu ermitteln. Geschlecht, Alter, Body-Mass-Index (BMI) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (E-VG) gingen in Model 1 (M1) in die Regressionsgleichungen ein. Dargestellt sind die adjustierten R^2 – Werte (Varianzaufklärung in der jeweiligen motorischen Funktion durch alle	

Prädiktoren) basierend auf dem Model (Model 1 oder 2) das signifikant mehr Anteil an der Varianzaufklärung der motorischen Funktion hat und die Werte der Veränderungsstatistik (ΔR^2 , ΔF , df_1 , df_2 , Δp) von M1 und M2, d. h. wie viel erklärte Varianz kann zusätzlich durch die Berücksichtigung der EFs generiert werden, nachdem für die moderierenden Faktoren kontrolliert wurde. Faktoren/Variablen, die einen signifikanten Anteil in der Varianzaufklärung der motorischen Funktion einnehmen, sind in der letzten Spalte (Prädiktoren) aufgelistet. 2

Tabelle 9: Demographische Daten und deskriptive Statistik (Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern)) aller erhobenen Kontrollvariablen für die Interventions- und Kontrollgruppe, sowie die Ergebnisse der F-Test Statistik zur Prüfung von Unterschieden zwischen den Gruppen..... 2

Tabelle 10: Rohwerte (nicht adjustierte Mittelwerte und Standardabweichungen) für alle motorischen und exekutiven Funktionen, numerisch-mathematische Fähigkeiten und Verarbeitungs-geschwindigkeit zum Prä- und zum Posttest für die Interventions (IG)- und die Kontrollgruppe..... 2

Tabelle 11: Gegenüberstellung ausgewählter Studien sowie deren Ergebnisse zur Verdeutlichung einer vorliegenden Testspezifität. Grün: großer Effekt ($r \geq 0,50$), Orange: mittlerer Effekt ($r = 0,30$ bis $0,49$), Blau: kleiner Effekt ($r = 0,10$ bis $0,29$). Es sind lediglich die Komponenten und Tests dargestellt, die in den jeweils gegenübergestellten Studien vergleichbar sind..... 2

Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichungen der exekutiven Tests für die 5- bis 6-jährigen Probanden aus Studie 2 (linke Spalte) und 3 (rechte Spalte). 2

Tabelle 13: Korrelationen innerhalb der exekutiven Funktionen für die 5- bis 6-jährigen Kinder aus Studie 2 (oberhalb der Diagonale) und Studie 3 (unterhalb der Diagonale). Signifikante Werte sind fett markiert. 2

Tabelle 14: Übersicht über die einzelnen Stationen der Intervention aus Studie 3. Die Farben markieren den aufsteigenden Schwierigkeitsgrad von leicht (grau) über mittel (gelb) zu schwer (orange). 2

„[...], if you ask targeted questions, you are led to accurate answers; if you ask poorly formulated questions, you obtain incomplete, misleading, and even perplexing answers.” (Koziol, 2012, S. 1)

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde sich mit dem Zusammenhang zwischen motorischen Fertigkeiten (motorische Domäne) und exekutiven Funktionen (kognitive Domäne) beschäftigt. Die bisherige Literatur liefert heterogene Befunde, was darauf schließen lässt, dass das Domänenzusammenspiel unterschiedlichen Einflussfaktoren unterliegt. Die Relevanz der exekutiven Funktionen für den Erfolg in Schule, Alltag und Beruf macht eine intensive Bearbeitung dieses Themas notwendig. Damit langfristig Fördermaßnahmen zur Verbesserung exekutiver Funktionen abgeleitet werden können, die mitunter evtl. motorischer Natur sein könnten, muss die Interaktion zwischen den Domänen intensiver untersucht und verstanden werden. Dazu fehlt es bislang an Untersuchungen, die eindeutige Einflussfaktoren ermitteln konnten.

Zur Bearbeitung dieser Forschungsfrage wurden drei Teilstudien durchgeführt, die aufeinander aufbauen. Die erste Studie fand mit jungen Erwachsenen statt und fokussierte sich auf die Frage nach dem Einfluss der motorischen Aufgabenschwierigkeit.

Schlussfolgerung Teilstudie 1: Motorische Aufgaben mit höherer Schwierigkeit und Komplexität sind stärker mit exekutiven Funktionen assoziiert als Aufgaben mit geringerer Schwierigkeit und Komplexität. Der Zusammenhang zwischen den Domänen ist zudem spezifisch. Die zweite Studie fand mit fünf- bis sechsjährigen Vorschulkindern und jungen Erwachsenen statt. Hier lag der Fokus auf dem Vergleich dieser beiden Altersgruppen.

Schlussfolgerung Teilstudie 2: Motorische und exekutive Funktionen sind im Kindesalter stärker miteinander assoziiert als im Erwachsenenalter. Bei Vorschulkindern sind vor allem die Handgeschicklichkeit und das Arbeitsgedächtnis miteinander assoziiert.

Auf der Grundlage der ersten zwei Studien wurde in der dritten Teilstudie ein feinmotorisches Interventionsprogramm mit fünf- bis sechsjährigen Vorschulkindern durchgeführt.

Schlussfolgerung Teilstudie 3: Ein anspruchsvolles Training zur Förderung der Handgeschicklichkeit, welches zudem Inhalte zur Förderung der emotionalen und sozialen Ebene enthält, kann bei fünf- bis sechsjährigen Kindern zu Verbesserungen in den Arbeitsgedächtnisleistungen führen.

Im abschließenden Diskussionsteil wurden die eingangs aufgestellten Hypothesen mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse sowie der Einordnung in die bisherige Literatur diskutiert und präzisiert. Des Weiteren wurde ein Konzept erstellt, dass versucht, die in dieser Arbeit untersuchten und diskutierten Einflussfaktoren miteinander in Beziehung zu setzen. Darauf aufbauend wurden Implikationen für zukünftige Untersuchungen zum Forschungsfeld erörtert. Da vor allem das individuelle Fähigkeitslevel der motorischen und exekutiven Funktionen in der Diskussion als bedeutsam herausgestellt wurde, wird vor allem die Durchführung einer intensiveren Diagnostik gefordert sowie die Erarbeitung von *Tools* zur Erfassung des Fähigkeitslevels und der Einbezug von Einzelfall-Interventionsstudien.

1 Einführung

Mit circa sechs Jahren besucht ein Kind zum ersten Mal die Schule. In den darauffolgenden Jahren fällt einigen Kindern das Suchen nach flexiblen Lösungsstrategien leicht, während andere Schwierigkeiten haben sich zu konzentrieren oder sich komplexe Sachverhalte einzuprägen. Die beschriebenen kognitiven Fähigkeiten gehören zum psychologischen Konstrukt der exekutiven Funktionen (EFs; auch bezeichnet als exekutive - oder kognitive Kontrolle; kognitive Kontrollprozesse): eine Gruppe von untereinander assoziierten Prozessen, die immer dann gebraucht werden, wenn zielgerichtetes, anspruchsvolles Handeln notwendig ist (Anderson, 2008; Diamond, 2013; Miyake et al., 2000). In einer Vielzahl von Studien konnte bisher belegt werden, dass EFs einen entscheidenden Einfluss auf die Schulreife sowie den akademischen und beruflichen Erfolg haben (u. a. Blair & Razza, 2007; Mann, Hund, Hesson-McInnis, & Roman, 2017; Morrison, Ponitz, & McClelland, 2010; Pellicano et al., 2017). Dieser herausragende prädiktive Wert, der sogar jenen des Intelligenzquotienten übersteigt (Alloway & Alloway, 2010), führte zu unzähligen Bemühungen, geeignete Interventionsmaßnahmen zur Förderung von EFs abzuleiten und zu entwickeln (Diamond & Ling, 2016; Erickson et al., 2015; Tomporowski et al., 2015).

Neuropsychologische Befunde, die zeigen, dass die neuronale Basis der EFs untrennbar mit jener der motorischen Entwicklung verbunden ist (Adolph & Berger, 2006; Diamond, 2000; Koziol et al., 2012; Leisman et al., 2016; von Hofsten, 2009), bestätigen die Annahme Piagets (1952), der diese Koexistenz als Erster formulierte. Eine tragende Rolle in diesem Zusammenspiel wird dabei vor allem dem Kleinhirn sowie dem präfrontalen Cortex (PFC) und deren Interaktion zugeschrieben (Diamond, 2000; Koziol et al., 2012; Steinlin, 2007). Aus evolutionärer Sicht beschreibt Koziol (2014) die enge Verbindung dabei folgendermaßen:

„In other words, we “think” in order to control and anticipate the outcomes of what we do; we “think” to control the motor system; we did not develop the ability to think for the primary purpose of thinking per se.“ (Koziol, 2014, S. 43)

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse ist es naheliegend, dass Studien im behavioristischen Feld versuchten, Assoziationen zwischen motorischen und exekutiven Funktionen aufzuzeigen, um motorische Interventionsmaßnahmen abzuleiten, die die EFs fördern sollen. Generell konnte durch diese Studien immer wieder ein Domänenzusammenspiel zwischen motorischen und exekutiven Funktionen bestätigt werden. Dieser Zusammenhang scheint jedoch von einigen unbekannten Faktoren beeinflussbar zu sein, denn die Datenlage ist von enormer Inkonsistenz und Heterogenität geprägt. Querschnittsstudien im Forschungsfeld berichten trotz ähnlicher Methodik und inkludierter Altersgruppen von unterschiedlichen Ergebnissen (u. a. Livesey et al., 2006; Michel, Kauer, et al., 2011; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016). Die dieser Heterogenität zugrundeliegenden

Faktoren konnten bisher nicht eindeutig bestimmt werden. Houwen et al. (2019) vermuten bspw. einen Einfluss individueller Charakteristika auf das Zusammenspiel und nennen u. a. die motorische Kompetenz als möglichen Moderator. Unterschiedliche Populationen würden folglich differente Assoziationen zwischen den Domänen zeigen. In eine ähnliche Richtung wies schon Diamond (2000), die der Aufgabenschwierigkeit eine zentrale Rolle zuschrieb. Dieser Ansätze zum Trotz konnten eindeutige Moderatoren bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht verifiziert und präzisiert bzw. in Studien nicht genügend berücksichtigt werden. Folglich ist die Ableitung evidenzbasierter motorischer Interventionen zur Förderung von EFs zum jetzigen Zeitpunkt kaum möglich.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb in zwei Teilstudien, mögliche Einflussfaktoren im Kindesalter aufzudecken und darauf basierend eine geeignete zielgerichtete Fördermaßnahme aus diesen Erkenntnissen abzuleiten und durchzuführen. Zu diesem Zweck wurden drei Studien durchgeführt, die im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden. In einem abschließenden studienübergreifenden Diskussionsteil werden alle Ergebnisse im Gesamten betrachtet und es wird versucht, Implikationen für weiterführende Untersuchungen abzuleiten. Dazu werden die eingangs aufgestellten Hypothesen, wenn notwendig, präzisiert und in Verbindung gebracht, um zukünftig zielgerichtete und exakte Antworten auf Forschungsfragen zum Domänenzusammenhang zu ermöglichen (Koziol et al., 2012).

2 Das Konstrukt der exekutiven Funktionen

2.1 Definition und Bedeutung einzelner exekutiver Funktionen

EFs – das sind multiple, miteinander verknüpfte, kognitive Fähigkeiten (Anderson, 2008; Diamond, 2013), die zur Anwendung kommen, wenn Gedanken und Bewegungen bewusst gesteuert werden müssen, um zielorientiert agieren zu können (Jurado & Rosselli, 2007). Sie sind immer dann von Relevanz, wenn in Situationen Konzentration und Nachdenken gefordert sind, weil ein Verharren im „Autopiloten“ oder das Verlassen auf Instinkte nicht zum Erfolg führen würde (Burgess & Simons, 2005; Diamond, 2013; Espy et al., 2004; Miller & Cohen, 2001). EFs ermöglichen damit laut Diamond (2013) u. a. das Durchhalten eines langen, anstrengenden Arbeitsprozesses, das mentale Durchspielen verschiedener Lösungsstrategien, bevor es zur Handlung kommt und die Aufrechterhaltung des Fokus auf bestimmte Inhalte oder situative Aspekte. Weiterhin werden die EFs von Lezak (1982) als Kern aller sozialförderlichen, persönlichkeitsentwickelnden, konstruktiven und kreativen Aktivitäten angesehen. Es gibt diverse weitere Autoren und Autorinnen¹, die eine Definition zu EFs liefern (u. a. Luria, 1973; Miyake et al., 2000). Gemeinsam ist ihnen jedoch die Ansicht, dass das exekutive System vor allem dann aktiviert wird, wenn eine Aufgabe neu, komplex, schwierig und/oder unvorhersehbar ist (Diamond, 2000; Shallice, 1988). Das Nutzen von EFs sei demnach mühsam (Diamond, 2013). Stuss und Alexander (2000) argumentieren allerdings, dass selbst die meisten Handlungen im Alltag ein gewisses Maß an exekutiver Kontrolle benötigen. Mit den EFs werden auf neuronaler Ebene, vor allem der präfrontale Cortex und das Kleinhirn in Verbindung gebracht (Diamond, 2000).

Genauso umfassend wie die Definitionsversuche sind auch die Modellkonzeptionen, die zum EF-Begriff entwickelt wurden (Anderson, 2002; Diamond, 2013; Miyake et al., 2000; Stuss, Shallice, Alexander, & Picton, 1995). Das Zugrundlegen eines bestimmten Modells hat entscheidenden Einfluss auf die wissenschaftliche Praxis. Der theoretische Einbezug spezifischer Fähigkeiten hat praktisch nicht nur Einfluss auf die Testauswahl, sondern auch auf die Interpretation der Ergebnisse und das Verständnis über die Entwicklung der EFs über die Lebensspanne (Anderson, 2008). In der vorliegenden Arbeit wurde sich an der Rahmenkonzeption von Diamond (2013) orientiert (Abbildung 1). Sie fasst unter dem Obergriff der EFs die drei Kernfunktionen Arbeitsgedächtnis, Inhibition (auch: inhibitorische Kontrolle) und kognitive Flexibilität zusammen, sowie darauf aufbauend die höheren kognitiven Fähigkeiten wie schlussfolgerndes Denken, Problemlösefähigkeiten und Planung. In der EFs-Forschung wird zwischen *hot* und *cool* EFs unterschieden (Zelazo et al., 2005). Die in Diamonds Modell beschriebenen Funktionen sind den *cool* EFs zuzuordnen. Während *cool* EFs als rein kognitiv beschrieben werden und in abstrakten und dekontextualisierten Situationen erhoben werden, bilden *hot* EFs Prozesse in affektiven und emotionalen Situationen ab und werden demnach in subjektiv bedeutungsvollen Momenten erhoben. *Hot* und *cool* EFs aktivieren unterschiedliche

¹ In der vorliegenden Arbeit wird versucht auf genderneutrale Formulierungen zurückzugreifen. Zur besseren Lesbarkeit wird aber oftmals auf das generische Maskulin zurückgegriffen werden, welches jedoch die weibliche Geschlechteridentität mit einbezieht.

neuroanatomische Areale (Zelazo & Müller, 2002), werden aber dennoch häufig parallel aktiviert und gelten damit als eng verzahnt (De Luca & Leventer, 2008; Miyake et al., 2000). Während *cool* EFs jedoch eine bedeutende Voraussagekraft für spätere Schulleistungen zugeschrieben wird, sollen *hot* EFs eher einen guten Prädiktor für emotionale Probleme darstellen (Poon, 2018).

Im Folgenden sollen die für die vorliegende Arbeit relevanten (und im Modell farblich markierten) *cool* EFs aus Diamonds Modell (Diamond, 2013) näher erläutert, deren Relevanz für akademische Kompetenzen dargestellt sowie Möglichkeiten der Testung in Auszügen vorgestellt werden.

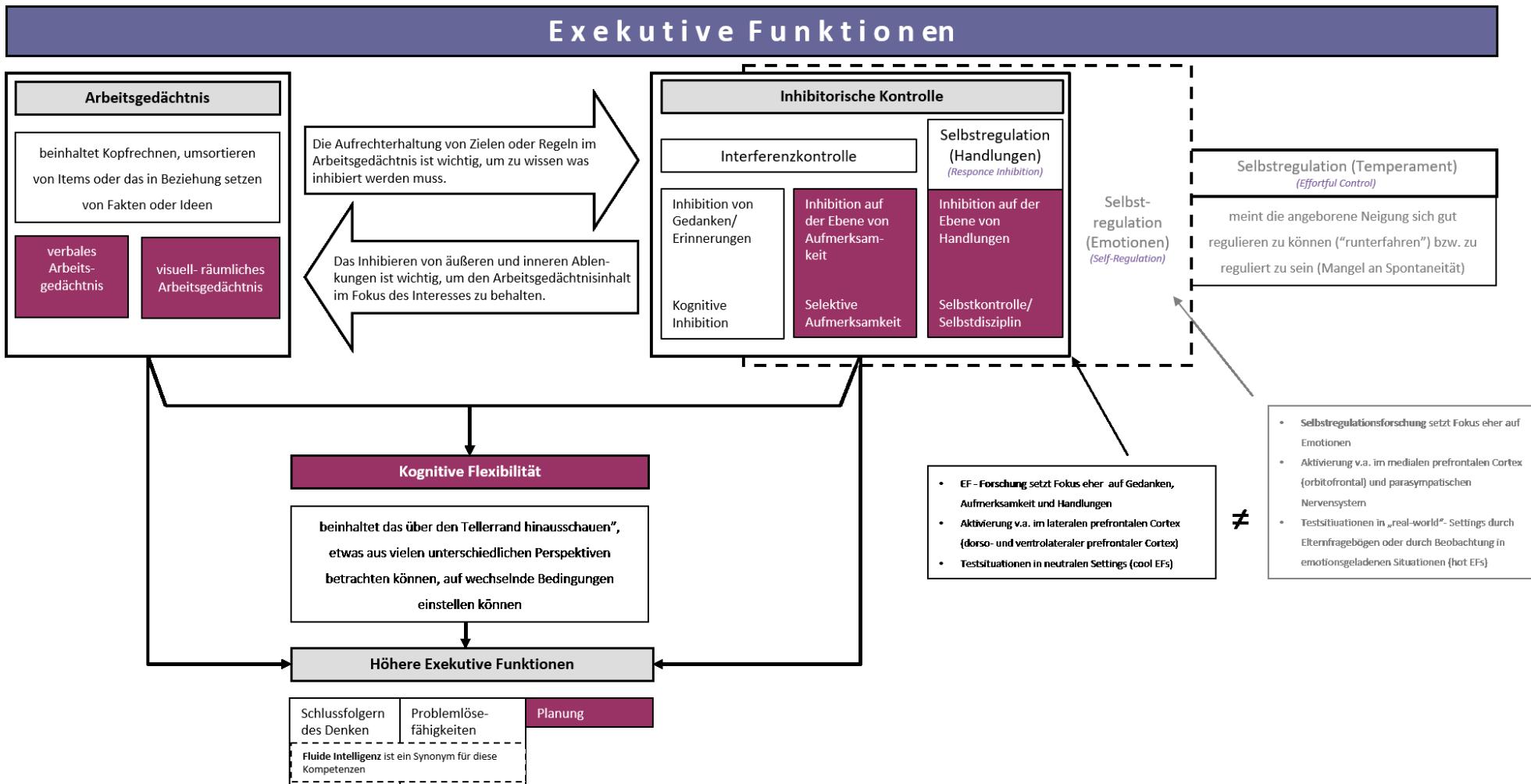


Abbildung 1: Rahmenkonzeption für das Konstrukt der exekutiven Funktionen in Anlehnung an Diamond (2013) (übersetzt ins Deutsche). Die für die Arbeit relevanten Bestandteile des Konstrukts sind farbig markiert. Die englischen Begriffe (in violettt) sind die ursprünglich gewählten englischen Bezeichnungen, die nicht adäquat ins Deutsche übersetzt werden konnten.

2.1.1 Arbeitsgedächtnis

Mit dem Begriff des Arbeitsgedächtnisses wird die Fähigkeit beschrieben, Informationen mental aufrecht zu erhalten, während gleichzeitig mit ihnen gearbeitet wird (Diamond, 2013).

“Working memory has been found to require the simultaneous storage and processing of information. It can be divided into the following three subcomponents: (i) the central executive, which is assumed to be an attentional-controlling system [...] and two slave systems, namely (ii) the visuospatial sketch pad, which manipulates visual images and (iii) the phonological loop, which stores and rehearses speech-based information [...]” (Baddeley, 1992, S.556)

Die Definitionen von Diamond (2013) und Baddeley (1992) sind sich sehr ähnlich. Diamond unterscheidet jedoch lediglich das verbale und das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis voneinander. Im weiterentwickelten Mehrkomponentenmodell von Baddeley (2000) wird das Arbeitsgedächtnis dagegen in vier Subbereiche gegliedert: die phonologische Schleife, der visuell-räumliche Notizblock, die zentrale Exekutive und der episodische *Buffer*. Die genannten Komponenten bestehen wiederum aus verschiedenen Elementen und inkludieren teilweise Fähigkeiten, die Diamond als eine der anderen exekutiven Funktionen interpretieren würde. In der vorliegenden Arbeit wird sich vorrangig an der Konzeption von Diamond (2013) orientiert, weshalb auf das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley (1992, 2000) und Baddeley und Hitch (1994) zunächst nicht weiter eingegangen werden soll. Im Modell von Diamond (2013) wird das Arbeitsgedächtnis nicht als isolierte Fähigkeit beschrieben, sondern es wird davon ausgegangen, dass die EFs miteinander verzahnt sind und sich teilweise gegenseitig bedingen (Best et al., 2009; Blackwell et al., 2009; Davidson, Amso, Anderson, et al., 2006; Shing et al., 2010). Bezuglich der inhibitorischen Kontrolle ist es demnach wichtig, sein Ziel und dazugehörige Informationen im Arbeitsgedächtnis mental aufrecht zu erhalten, um irrelevante Reize ausblenden zu können. Die Verbindung von Arbeitsgedächtnis und kognitiver Flexibilität betreffend, konnten Blackwell et al. (2009) bei fünf- bis sechsjährigen Kindern zeigen, dass diejenigen mit schnelleren Reaktionszeiten in einer Aufgabe zur kognitiven Flexibilität auch diejenigen mit stärkeren Leistungen im Arbeitsgedächtnis waren.

Es besteht weitestgehend Konsens über die Bedeutsamkeit der Arbeitsgedächtniskapazität für das schulische Lernen (Alloway & Alloway, 2010; Lan, Legare, Ponitz, Li, & Morrison, 2011; Monette, Bigras, & Guay, 2011). Alloway & Alloway (2010) berichteten bspw., dass die Arbeitsgedächtnisleistungen einen besseren Prädiktor für mathematische und schriftsprachliche Schulleistungen darstellen als der Intelligenzquotient. Bezuglich des Lesens zeigten Studien, dass Lernende mit Schwierigkeiten in der phonologischen Bewusstheit (Purpura et al., 2017), in der Phonem-Graphem-Korrespondenz (Nevo & Breznitz, 2013) und/oder im Lesesinnverständnis (Butterfuss & Kendeou, 2018) Defizite im AG aufwiesen. Die mathematischen Leistungen von Kindern

konnten ebenfalls mit verschiedenen Arbeitsgedächtnisfunktionen zusammengeführt werden (De Rammelaere et al., 2001; McKenzie et al., 2003; Raghubar et al., 2010). Mathematisch-numerische Vorläuferfähigkeiten, die im Kindergarten erhoben wurden, konnten vor allem mit visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisfunktionen in Verbindung gebracht werden (Simmons et al., 2008).

Der Umfang an Tests, die in Studien zur Erfassung der Arbeitsgedächtnisleistung herangezogen werden, ist groß. Tests, in denen präsentierte Items (z. B. Elefant, Maus, Katze) anschließend in umgeordneter Reihenfolge (z. B. von klein nach groß: Maus, Katze, Elefant) wiedergegeben werden müssen, spricht Diamond (2013) eine hohe Validität zu. Ein häufig genutztes und standardisiertes Instrument zur Erfassung der visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisleistung ist aber auch der *Corsi-Block-Tapping Test* (Corsi, 1972). Dem Test wird ebenfalls eine hohe Validität bescheinigt (Alloway et al., 2009). Da hier jedoch in der „Vorwärtsversion“ lediglich auf einem Computerbildschirm präsentierte Quadrate auf einem Computerbildschirm in der richtigen Reihenfolge angetippt werden müssen, ist diskutierbar, ob nicht eher das visuell-räumliche Kurzzeitgedächtnis (KZG) erfasst wird.

Das Arbeitsgedächtnis ist vom KZG abzugrenzen. Beim KZG geht es lediglich um die exakte Wiedergabe der kurz vorher präsentierten Inhalte, nicht aber um die aktive Manipulation und/oder Weiterverarbeitung dieser (Diamond, 2013). Verschiedene Studien zeigten, dass Aufgaben zum KZG und Arbeitsgedächtnis auf verschiedenen Faktoren laden (Alloway et al., 2004; Gathercole, Pickering, Ambridge, et al., 2004).

2.1.2 Inhibitorische Kontrolle

Eine weitere Kernfunktion im Konstrukt der EFs ist laut dem Modell von Diamond (2013) die inhibitorische Kontrolle (auch: Inhibition). Im EF-Kontext beschreibt dieser Begriff die Fähigkeit zur aktiven Kontrolle der eigenen Aufmerksamkeit, des Verhaltens und der Gedanken. Inhibition ist immer dann von Relevanz, wenn ungünstigen internalen Prädispositionen und/oder externalen Ablenkungen standgehalten werden muss, um ein kurz- oder langfristiges Ziel zu erreichen. Das Gegenteil von inhibitorischer Kontrolle wären laut Diamond (2013) bspw. das impulsgesteuerte Verhalten oder das Verharren in alten Angewohnheiten und Gedanken. Diamond (2013) unterscheidet verschiedene Aspekte der inhibitorischen Kontrolle: die Interferenzkontrolle und die Selbstregulierung auf der Ebene von Handlungen. Die Interferenzkontrolle umfasst die Inhibition von Gedanken und Erinnerungen (kognitive Inhibition) und die für die vorliegende Arbeit relevante selektive Aufmerksamkeit (auch: inhibitorische Kontrolle der Aufmerksamkeit).

Inhibition/selektive Aufmerksamkeit: Die selektive Aufmerksamkeit beschreibt das bewusste Steuern unseres Aufmerksamkeitsfokus. Soll sich bspw. in einem Klassenraum auf den Vortrag des Lehrenden konzentriert werden, müssen aktiv, viele konkurrierende Störquellen unterdrückt werden. Erfasst wird die selektive Aufmerksamkeit typischerweise mit einem *Flanker-Test* (Eriksen & Eriksen, 1974; McDermott et al., 2007; Zaitchik et al., 2014). Dabei wird von dem Getesteten gefordert, sich auf

einen zentral präsentierten Stimulus zu konzentrieren und entsprechend zu reagieren (z. B. Drücken der rechten Pfeiltaste auf einer Computertastatur, wenn der in der Mitte präsentierte Stimulus einen nach rechts zeigenden Pfeil darstellt), während die Ablenkungsstimuli ausgeblendet werden müssen (z. B. Pfeile rechts und links vom zentralen Stimulus, die in die inkongruente Richtung nach links zeigen).

Inhibition/Selbstregulierung: Die Selbstregulierung von Handlungen (auch: Selbstkontrolle, Selbstdisziplin) meint dagegen das Unterdrücken von präpotenten Reizen auf der Verhaltensebene. Dazu gehört bspw. die Unterdrückung impulsiven Verhaltens oder das Zurückhalten von unüberlegten Worten. Getestet wird dieser Aspekt z. B. mittels *Simon*-Tests (Diamond et al., 2007; Simon & Rudell, 1967; Wright & Diamond, 2014). In Tests dieser Art erscheint auf einem Bildschirm ein Stimulus, entweder auf der rechten oder der linken Seite. Mit dem Erscheinen des Stimulus hat der Getestete die Aufgabe, so schnell wie möglich die Taste auf der gegenüberliegenden Seite zu drücken. Diese Aufgabe bildet die Fähigkeit zur Selbstregulation auf der Verhaltensebene ab, weil wir die präpotente Tendenz dazu haben, die Taste auf der Seite des Stimulus zu drücken (*Simon*-Effekt oder Stimulus-Antwort-Kompatibilität, Hommel, 2011; Lu & Proctor, 1995). Neben dem *Simon*-Test werden zudem der *go/no-go*- (Cragg & Nation, 2008), der *Stroop*- (Stroop, 1935) und der *stop-signal*-Test (Verbruggen & Logan, 2008) zur Einschätzung der Inhibition/Selbstregulation herangezogen. Der Begriff der Selbstregulation wird auch in anderen Kontexten genutzt (Abbildung 1; grau markiert). Jedoch meint er z. B. in der Selbstregulationsforschung (*self-regulation*) das Unterdrücken von Emotionen und Gefühlen in emotional bedeutenden *real-world*- Situationen und ist damit eher dem Forschungsfeld der *hot* EFs zuzuordnen (Zelazo & Müller, 2002). Auch bei der Beschreibung von Temperamentsmerkmalen wird gelegentlich von Selbstregulation (*effortful control*) gesprochen (Rothbart & Bates, 2006). In der vorliegenden Arbeit meint der Terminus Selbstregulation ausschließlich den von Diamond (2013) beschriebenen Aspekt auf der Handlungsebene (*response inhibition*), der in möglichst emotionsneutralen Testsituationen erfasst wird und demzufolge den *cool* EFs zuzuordnen ist.

Im Hinblick auf akademisches Können konnten Inhibitionsleistungen mit mathematischen Kompetenzen (Cragg et al., 2017; Espy et al., 2004; St Clair-Thompson & Gathercole, 2006) und/oder Lesefähigkeiten (Cantin et al., 2016; Doyle et al., 2018) in Verbindung gebracht werden.

2.1.3 Kognitive Flexibilität

Die Fähigkeit sowohl räumlich als auch interpersonell eine andere Perspektive einzunehmen, beschreibt Diamond (2013) als kognitive Flexibilität. Diese dritte Kernfunktion fußt laut Diamond sowohl auf der Inhibitionsleistung, da eine vorangegangene Perspektive ausgeblendet bzw. unterdrückt werden muss, als auch auf der Arbeitsgedächtniskapazität, um unterschiedliche Perspektiven abzuspeichern bzw. nebeneinander abgleichen zu können. Die Fähigkeit zur kognitiven

Flexibilität ist z. B. notwendig, um bei der Lösung eines Problems nicht starr an einer Lösungsstrategie festzuhalten, die eventuell nicht effizient genug oder nicht erfolgsversprechend ist.

Tests, die zur Einschätzung dieser Fähigkeit herangezogen werden, nutzen häufig das Hin- und Herwechseln zwischen zwei oder mehreren Regeln. Im *Wisconsin Card Sorting Test* (Grant & Berg, 1948; Milner, 1964) müssen bspw. Karten schnellstmöglich entweder nach Farbe, Form oder Anzahl der abgebildeten Symbole sortiert werden. Während des Tests ändert sich regelmäßig das Kriterium, nach dem sortiert werden soll und ein Verharren in der vorangegangenen Regel wirkt sich ungünstig auf die Testleistung aus. Gläscher et al. (2012) unterteilen die Fähigkeit der kognitiven Flexibilität in zwei Subgruppen. Während der *Wisconsin Card Sorting Test* dabei die kognitive Flexibilität/*set shifting* abbildet, gibt es weiterhin auch Tests, wie bspw. den *Trail Making Test* (Bowie & Harvey, 2006; Reitan & Wolfson, 1995), der der Erfassung der kognitiven Flexibilität/*response shifting* dient. Im Gegensatz zum *set shifting*, wechselt die Regel beim *response shifting* kontinuierlich bei jedem Versuch bzw. Item hin und her und ist damit etwas vorhersehbarer (Gläscher et al., 2012; Sánchez-Cubillo et al., 2009).

Obwohl es Tests zur Erfassung der kognitiven Flexibilität gibt, soll erwähnt werden, dass in der Literatur auch kritische Meinungen dazu präsentiert werden. Ionescu (2012) beschreibt die kognitive Flexibilität bspw. eher als Eigenschaft eines kognitiven Systems, in dem eine Vielzahl anderer dynamischer Interaktionen zeitlich versetzt ineinander greifen müssen, um die Fähigkeit zum flexiblen Denken zu ermöglichen. Folgt man dem Ansatz von Ionescu (2012), wäre die Abbildung verschiedenster Fähigkeiten, Voraussetzungen und Bedingungen sinnvoller, um die kognitive Flexibilität abzubilden als einen einzigen Test zu Rate zu ziehen.

Nichtsdestotrotz konnten Leistungen in Tests zur Erfassung der kognitiven Flexibilität in den Untersuchungen von Yeniad, Malda, Mesman, van IJzendorp und Pieper (2013) und Cantin et al. (2016) mit mathematischen - und Lesekompetenzen in Zusammenhang gebracht werden.

2.1.4 Planung

Planung kategorisiert Diamond (2013) zusammen mit der Problemlösefähigkeit und der Fähigkeit zum schlussfolgernden Denken in die Gruppe der höheren exekutiven Funktionen. Gemeint ist die Fähigkeit, noch vor dem eigentlichen Handeln Entscheidungen zu treffen, abzuwägen und zeitlich zu sortieren (McCormack & Atance, 2011). Typische Tests zur Erfassung der Planungsfähigkeit sind sogenannte *Tower Tests*, wie bspw. der *Tower of London-Test* (ToL; Shallice, 1982). Bei diesem computerisierten Test müssen unterschiedlich farbige Kugeln auf unterschiedlich lange Stäbe platziert werden. Den Probanden wird meist visuell eine Zielkonfiguration präsentiert, die sie in einer vorgegebenen Anzahl an Zügen nachbauen müssen. Dabei kann immer nur eine Kugel pro Zug bewegt werden. Der Test startet mit relativ einfachen Durchgängen, in denen lediglich zwei Kugeln bewegt werden müssen, um zur Zielkonfiguration zu kommen und endet bei komplexen Durchgängen mit sieben Handlungsschritten. Für den *ToL-Test* präzisieren einige Autoren (u. a. Kaller, Rahm, Spreer,

Mader, & Unterrainer, 2008; Unterrainer et al., 2020), dass die Durchgänge mit lediglich zwei Kugeln noch keine Planungsfähigkeit abbilden, sondern eher ein wahrnehmungsgelenktes Vorgehen ausreicht, um das Zielbild nachzubauen. Von einer Planungsleistung im engeren Sinne könne man erst sprechen, wenn in den Durchgängen, die drei Schritte und mehr erfordern, mindestens ein Zwischenschritt notwendig ist, um zur Zielkonfiguration zu gelangen. Die Fähigkeit zur Bewältigung dieser „Drei-Kugel-Probleme“ kann jedoch erst ab einem Alter von fünf Jahren beobachtet werden (Kaller et al., 2008).

Die Verbindung der Planungsfähigkeit mit anderen EFs, wie z. B. dem Arbeitsgedächtnis, wird kontrovers diskutiert (Asato et al., 2006; Senn et al., 2004). Die Inhibition scheint jedoch einen gewissen Einfluss auf die Planungsfähigkeit zu haben (Hughes, Ensor, Wilson, & Graham, 2010; McCormack & Atance, 2011).

Im Hinblick auf die akademische Entwicklung weisen Autoren auf die Relevanz des *ToL*-Tests als Prädiktor für mathematische Kompetenzen (Sikora et al., 2002) und das Lesesinnverständnis hin (Georgiou & Das, 2016). Cohen, Bronson und Casey (1995) wiederum berichten über nicht vorhandene Zusammenhangsmaße zwischen Schulleistungen und den Ergebnissen in einem *Tower*-Test.

2.2 Entwicklungsverlauf der drei Kernfunktionen Arbeitsgedächtnis, Inhibition und kognitive Flexibilität sowie der Planungsfähigkeit

Die Entwicklung der EFs über die Lebensspanne hinweg wird v. a. mit der parallelen Entwicklung des PFCs und assoziierter neuronaler Schaltkreise in Verbindung gebracht (Casey et al., 2000; Cummings, 1993; Fuster, 2002; Rubia et al., 2000). Der Frontallappen ist einer der Bereiche des menschlichen Gehirns, der am spätesten in ausgereifter Form vorliegt (Gogtay et al., 2004). Erst im jungen Erwachsenenalter erreicht der PFC sein Maximum an komplexen Verbindungen innerhalb des Frontallappens, aber auch zu anderen Hirnregionen (bspw. Hypothalamus, Hippocampus, parietale, temporale und occipitale Cortices; Cummings, 1993; Fuster, 2002). Die beschriebene Reifeentwicklung geht mit mehreren dynamischen Strukturveränderungen einher. Dazu gehören bspw. die neuronale Proliferation und Differenzierung der grauen Substanz, die axonale und dendritische Arborisierung, die Apoptose und Reduzierung von synaptischen Verbindungen und die Myelinisierung, die dafür sorgt, dass elektrische Signale schnell weitergegeben werden (Deoni et al., 2011; Huttenlocher, 1979; Kuan et al., 2000). Der PFC weist demnach, im Gegensatz zu anderen Hirnarealen, eine verlängerte Entwicklung auf, ist aber gleichzeitig auch einer der ersten Bereiche, die im Altersgang degenerieren (Peters et al., 1998; Salat et al., 2001). Die mit dem PFC assoziierte kognitive Entwicklung wird deshalb in der Literatur mit einer umgedrehten U-Kurve beschrieben (Vygotsky, 2012).

Auch die Performance in EF-Tests (Antwortgenauigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit) folgt demnach einem glockenförmigen Verlauf (Cepeda, Kramer, & Gonzalez de Sather, 2001; De Luca et al., 2003;

Kray, Eber, & Lindenberger, 2004; Zelazo, Craik, & Booth, 2004). Dabei werden jedoch den verschiedenen, von Diamond beschriebenen Kernfunktionen unterschiedliche Verläufe, in Bezug auf ihre Ausreifung, zugeschrieben:

Der Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses wird ein linearer Verlauf nachgesagt, bei dem die Performanceleistung von vier bis 14 Jahren stetig steigt (Best et al., 2009; Gathercole, Pickering, Knight, et al., 2004) und evtl. erst mit 19 Jahren ausgereift vorliegt (Luna et al., 2004). Komplexe Gedächtnistests, bei denen Gemerktes im Kopf weiterverarbeitet bzw. manipuliert werden muss, können jedoch erst ab ca. sechs Jahren absolviert werden (Gathercole, Pickering, Knight, et al., 2004). Die Performanceleistung in Tests zur inhibitorischen Kontrolle entwickelt sich ebenfalls bis zu einem Alter von 14 Jahren stetig (Luna et al., 2004), gefolgt von einer Phase der Stabilisation und anschließenden Reduktion im älteren Erwachsenenalter (Butler et al., 1999). Der Verlauf wird im Gegensatz zu dem des Arbeitsgedächtnisses jedoch nicht als linear beschrieben. Es wird angenommen, dass es früh in der Entwicklung rapide Zuwächse gibt, denen dann langsamere, stetige Verbesserungen folgen (Best & Miller, 2010). Romine & Reynolds (2005) gehen dabei davon aus, dass vor allem zwischen fünf und acht Jahren deutliche Zuwächse im Leistungsvermögen beobachtbar sind. Der kognitiven Flexibilität, also der Fähigkeit zwischen verschiedenen Regeln bzw. Alternativen hin- und her zu wechseln und kreative Lösungswege zu finden, wird ebenfalls ein linearer Verlauf bis ins Jugend- und frühe Erwachsenenalter zugeschrieben (Poon, 2018; Somsen, 2007). In Abhängigkeit von der Untersuchungsmethodik ist nicht eindeutig, ab wann komplexe Tests zur Erfassung der kognitiven Flexibilität absolviert werden können (Davidson, Amso, Cruess, et al., 2006; Huizinga et al., 2006), aber die Performance ist eng an das Leistungsvermögen von AG und inhibitorischer Kontrolle gekoppelt (Garon et al., 2008). Die Ergebnisse von Davidson, Amso, Cruess, et al. (2006) zeigen zudem, dass die Genauigkeitsmaße in den Tests (d. h. die Anzahl am richtigen Entscheidungen) ab dem Jugendalter keine Leistungszuwächse mehr erfahren, während die Probanden bis in das Erwachsenenalter an Schnelligkeit (d.h. die Reaktionszeiten der richtigen Entscheidungen) zulegen. Der Annahme folgend, dass die Fähigkeit zur kognitiven Flexibilität auf der Kompetenz des Arbeitsgedächtnisses und der inhibitorischen Kontrolle fußt, erscheint es logisch, dass die vollständige Ausreifung dieser dritten Komponente über viele Jahre anhält und erst im späteren Entwicklungsverlauf vorliegt (Luciana & Nelson, 1998). Über diesen Aspekt gibt es jedoch unterschiedliche Auffassungen. Nach De Luca & Leventer (2008) ist die kognitive Flexibilität bereits mit acht Jahren voll entwickelt. Hier wird deutlich, dass schon innerhalb des EFs-Forschungsfeldes eine gewisse Inkonsistenz vorherrscht und das Konstrukt oftmals nicht einheitlich interpretiert wird.

Die Fähigkeit zur Planung entwickelt sich wahrscheinlich ebenfalls in Abhängigkeit von Arbeitsgedächtnis und inhibitorischer Kontrolle (Brocki & Bohlin, 2004) ab einem Alter von ca. fünf Jahren (De Luca & Leventer, 2008) bis in das Erwachsenenalter (Luciana & Nelson, 1998). Poon (2018) beschreibt den Verlauf vom 12. bis zum 16. Lebensjahr als relativ flach, bevor vom 16. bis zum 17.

Lebensjahr ein Entwicklungssprung beobachtbar ist. Krikorian, Bartok, & Gay (1994) bestätigen diesen nahezu linearen Verlauf für das Alter von sieben bis dreizehn Jahren.

Der Versuch einer genaueren Beschreibung der einzelnen Entwicklungslinien ist wenig sinnvoll, da Studien zur Entwicklung unterschiedliche Tests genutzt haben und davon auszugehen ist, dass unterschiedliche Tests auch unterschiedliche Verläufe nachweisen (u. a. aufgrund von unterschiedlich ausgeprägter Testkomplexität) und somit nicht immer miteinander vergleichbar sind (Best & Miller, 2010). Garon et al. (2008) gehen dennoch insgesamt davon aus, dass zwischen drei und fünf Jahren lediglich komplexe Fähigkeiten weiteren starken Veränderungen unterliegen und leiten daraus ab, dass ab dem späten Vorschulalter (5- bis 6-jährige Kinder) lediglich ein *fine-tuning* der bisher entwickelten EFs (Basisfähigkeiten der EFs; z. B. einfache Gedächtnisaufgaben) stattfindet, nicht aber weitere qualitative Aneignungsprozesse vollzogen werden.

Ein entscheidender und zudem gesicherter Aspekt, der die Entwicklung der EFs kennzeichnet, ist dagegen das Auftreten von Differenzierung und Dedifferenzierung im Altersgang (de Frias et al., 2007; Garrett, 1946; Li et al., 2004). Mit der Umstrukturierung und Ausdifferenzierung des PFCs ändert sich demnach auch die Struktur und das Zusammenwirken der EFs untereinander. Die EFs bilden per se ein Gefüge aus miteinander verknüpften, aber dennoch abgrenzbaren kognitiven Prozessen. Ein Phänomen, das mit der Bezeichnung „*unity and diversity*“ betitelt wird (Miyake et al., 2000, S.50). In welchem Ausmaß die einzelnen Komponenten nun miteinander verknüpft sind, wird unter anderem durch das Alter bestimmt. Während Studien mit Kindern bspw. zu dem Schluss kommen, dass im Vorschulalter eher ein Zwei-Faktor-Modell dominierend ist (z. B. Arbeitsgedächtnis und inhibitorische Kontrolle/kognitive Flexibilität; Brydges, Fox, Reid, & Anderson, 2014; Monette, Bigras, & Lafrenière, 2015; Usai, Viterbori, Traverso, & De Franchis, 2014; van der Ven, Kroesbergen, Boom, & Leseman, 2013), besteht das Konstrukt im Erwachsenenalter eher aus drei verzahnten, aber dennoch abgrenzbaren, Faktoren (Arbeitsgedächtnis, inhibitorische Kontrolle, kognitive Flexibilität; Ito et al., 2015; Miyake et al., 2000). Im späten Erwachsenenalter sind wiederum stärkere Zusammenhangsmaße zwischen einzelnen kognitiven Tests zu beobachten (de Frias et al., 2007). Der Verlauf von Differenzierung und Dedifferenzierung als linearer Prozess vom Kindes- bis in das ältere Erwachsenenalter wird jedoch von einigen Autoren angezweifelt. So beschreiben bspw. Howard, Okely, & Ellis (2015) und Karr et al. (2018), dass sie eher davon ausgehen, dass bereits im Vorschulalter eine Phase der Integration stattfindet, in der initial unverbundene EFs höhere Zusammenhangsmaße entwickeln.

Den einzelnen Kern-EFs und deren Verbindungen zueinander werden, wie gerade beschrieben, zwar generelle Entwicklungslinien und -prozesse zugeschrieben, dennoch ist davon auszugehen, dass die Ausreifung, und vor allem die Ausprägung der EFs von Individuum zu Individuum differenziert verläuft. Individuelle Unterschiede in den EFs-Fähigkeiten entstehen nach Friedman et al. (2008) zu 99% durch einen genetischen Faktor, der von den Autoren als „*common-EF*“ bezeichnet wird und größtenteils

Inhibition/Selbstregulation abbildet. Die Autoren bekräftigen jedoch, dass eine hohe genetische Disposition nicht bedeute, dass Umweltfaktoren EFs nicht beeinflussen würden und könnten. Einen negativen Einfluss auf die Entwicklung des PFC und damit der EFs haben zum Beispiel Stress, Traurigkeit und Einsamkeit, da es dann u. a. zu einem Dopaminüberschuss im PFC kommt (Cacioppo & Patrick, 2008; Campbell et al., 2006; Cerqueira, Mailliet, Almeida, Jay, & Sousa, 2007; Desseilles et al., 2009; Roth, Tam, Ida, Yang, & Deutch, 1988). Dopamin ist einer der Neurotransmitter, der bei der Ausführung exekutiver Kontrolle eine bedeutende Rolle einnimmt (Cools, 2008; Diamond, 1996). Umgekehrt können Aktivitäten, die Stress reduzieren, Freude vermitteln und/oder direkt an den zu schulenden EFs ansetzen, die Entwicklung der EFs fördern (Diamond & Ling, 2016). In diesem Zusammenhang wird körperliche Aktivität als ein möglicher Zugang zur Verbesserung der EFs diskutiert (Diamond & Ling, 2016, 2019, 2020; Hillman et al., 2019; van der Fels et al., 2015). Für diesen Ansatz spricht neben der sozialen Interaktion der Fakt, dass Teile des PFC und des Cerebellums aktiviert werden, wenn eine komplexe, schwere und neue Aufgabe gelöst werden soll und dass es dabei keine Rolle spielt, ob diese Aufgabe motorischer oder kognitiver Natur ist (Diamond, 2000). Neben diesen neueren Perspektiven postulierte schon Piaget (1952) ein generelles Zusammenwirken motorischer und kognitiver Entwicklung.

In Anbetracht des enormen Stellenwerts der EFs in der Entwicklung und im Leben (Diamond, 2013) liegt es nahe, Zusammenhänge zur motorischen Domäne aufzudecken und daraus abgeleitete Fördermöglichkeiten zu untersuchen, um dieses Konstrukt bestmöglich zu verstehen und evtl. fördern zu können. Wenn Motorik, eine Domäne, die an sich bereits einen hohen Stellenwert im schulischen Kontext besitzt (Cameron et al., 2012; Dinehart & Manfra, 2013; Grissmer et al., 2010), einen Beitrag zur positiven Entwicklung von EFs leisten kann, sollte dieses Potential genutzt werden. Die aktuelle Datenlage lässt konkrete Förderableitungen jedoch nur bedingt zu. Die Aufarbeitung und Interpretation bisheriger Literatur soll im nun folgenden Kapitel geleistet werden. Dazu wird der Großteil der zum jetzigen Zeitpunkt vorliegenden Studien zum Zusammenhang von Motorik und Kognition im Kindesalter zusammengetragen und beschrieben.

2.3 Der Zusammenhang zwischen exekutiven und motorischer Funktionen - Korrelationsstudien

Motorische Funktionen lassen sich nach Fähigkeiten und Fertigkeiten unterscheiden (Edwards, 2011). Unter dem Begriff der Fähigkeiten werden stabile motorische Eigenschaften oder Merkmale verstanden, die genetisch determiniert sind. Sie bilden somit die Grundlage für motorisches Lernen und werden deshalb auch als Basis motorischer Fertigkeiten beschrieben. Folglich werden unter motorischen Fertigkeiten erlernte, zielorientierte und durch Training beeinflussbare Bewegungen verstanden. Ein wichtiger Fakt dabei ist, dass motorische Fertigkeiten zu einem gewissen Anteil Aspekte aus der motorischen aber auch aus der kognitiven und perzeptuellen Domäne inkludieren (Edwards, 2011). Weiterhin lassen sich motorische Fertigkeiten unterschiedlich klassifizieren. Eine der

gängigsten Klassifizierungen ist jene nach grob- und feinmotorischen Fertigkeiten, obgleich eine vollständige Trennung der beiden Bereiche in vielen Fällen kaum möglich ist (Payne & Isaacs, 2012). Unter der Fertigkeit der Feinmotorik wird in dieser Arbeit die Auge-Hand-Koordination verstanden, die die Ausführung feinmotorischer Präzisionshandlungen umfasst und durch kleine Muskelgruppen, lokalisiert an Fingern, Händen und Unterarmen, realisiert wird (Teipel, 1988). Unter Grobmotorik sind dagegen Bewegungen zu verstehen, die viele und vorwiegend große Muskelgruppen bzw. den ganzen Körper beanspruchen (Payne & Isaacs, 2012). Studien, die bisher versuchten exekutive Funktionen mit motorischen Fertigkeiten in Verbindung zu bringen, kamen zu dem Schluss, dass vor allem komplexe bzw. schwierige und neuartige Bewegungen dafür geeignet wären einen Domänenzusammenhang zu ermitteln (Diamond, 2000; van der Fels et al., 2015). So haben Aufgaben, die feinmotorische Anforderungen oder bilaterale Koordinationsübungen beinhalten, womöglich größere kognitive Ansprüche als bspw. kraft- und ausdauerorientierte Handlungen oder Gleichgewichtsaufgaben (Diamond & Ling, 2016).

Die folgende Zusammenfassung der bisherigen Literatur zum Zusammenhang zwischen EFs und motorischen Fertigkeiten, schließt deshalb ausschließlich Korrelationsstudien ein, bei denen Feinmotorik und/oder koordinative Aspekte expliziter Bestandteil der Diagnostik waren (Tabelle 1). Der Inhalt der Tabelle 1 soll dabei nicht dem Anspruch eines systematischen Reviews oder gar einer Meta-Analyse gerecht werden. Mit dieser Form der Darstellung soll lediglich ein grober Überblick über die aktuelle Forschungslage geleistet werden, um im weiteren Verlauf der Arbeit Hypothesen daraus ableiten zu können. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf fünf- bis sechsjährige Kinder, weshalb hauptsächlich diese Altersgruppe inkludiert wurde. Die wenigen Untersuchungen, die mit älteren Kindern oder jungen Erwachsenen durchgeführt wurden, sind dennoch aufgeführt worden, um eventuelle qualitative oder/und quantitative Veränderungen des Domänenzusammenspiels im Entwicklungsverlauf aufzeigen zu können und weil junge Erwachsene im Rahmen einer der durchgeführten Teilstudien ebenfalls untersucht wurden.

Tabelle 1: Übersicht bisheriger Korrelationsstudien zum Domänenzusammenhang. Die genutzten motorischen Tests sind eingeteilt nach Fein- und Grobmotorik sowie einer Kombination beider Inhalte und Aufgaben, die der motorischen Planung zuzuordnen sind. Die genutzten Tests zur Erfassung der EFs sind eingeteilt nach Arbeitsgedächtnis, Inhibition, kognitiver Flexibilität und höheren EFs.

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse			
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (Jahre, Monate (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation ohne Kontrollvariablen		Korrelation mit Kontrollvariablen		
					FM	G	K	mPI		Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein	
					AG	I	KF	HEF						

Frühe Kindheit/Vorschulalter (4-7 Jahre)														
#1 Livesey et al., 2006	36	-	5,3-6,11 (6,3)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG M-ABC- Balance M-ABC- Ballfertigkeit M-ABC total 	<ul style="list-style-type: none"> DNS (Gen.) SST/SSRT (RT) SST/GoRT (RT) 	-	-	Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein	(... das Alter)	
#2 Roebers & Kauer, 2009	112	-	6,7-8,10 (7,6)	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungs- störungen/- verzögerungen 	<ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik springen sw, seitliches Umsetzen, schnelles Aufstehen Pegboard (dominante Hand) 	<ul style="list-style-type: none"> Farbspanne rw Flanker/(RT) Simon Test/(RT) KF Test/(RT & Gen.) 	-	-	Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein	(... das Alter)	

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse				
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions-kriterien	Motorische Kompetenzen			Exekutive Funktionen			Kontrollvariablen	Korrelation ohne Kontrollvariablen		Korrelation mit Kontrollvariablen	
					FM	G	K	mPl	AG	I		Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein
												kontrolliert wurde für ...			

#3 Pennequin et al., 2010	44 m/w	n = 24 jüngere Gruppe (4,5 Jahre) n = 20 ältere Gruppe (6,5 Jahre) (für Berechnungen gesamte Gruppe genommen)	4-7	• Gesundheits- & Verhaltensprobleme	• <i>Planning Test</i>	• Zahlenspanne rw • <i>Size-Stroop Test</i> (Gen.) • <i>TMT</i> (RT-switch cost)	-	Effekte: ja • motorische Planung & AG ● • motorische Planung & Inhibition/SR ●	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein
#4 Röthlisberger et al., 2010	410 m/w	-	5,1-7,4 (6,2)	-	• M-ABC- HG	• Farbspanne rw • <i>Stroop</i> /(RT) • <i>KF Test</i> /(RT & Gen.) = EFs Gesamtwert	• Intelligenz (CFT-1/Substitution und Klassifikation) • VG • Wortschatz • SES • Selbstregulation des Kindes (Fragebogen Eltern & Lehrer) • Elterliche Unterstützung (EU) (EFs korrelieren mit allen Variablen außer EU) (HG korreliert mit allen außer SES und EU)	Effekte: ja • Feinmotorik & EFs Gesamt ●	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein

(... das Alter und die Verarbeitungsgeschwindigkeit)

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse				
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter) Jahre, Monate	Exklusions- kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation <u>ohne</u> Kontrollvariablen		Korrelation <u>mit</u> Kontrollvariablen			
					FM	G	K	mPl		AG	I	KF	HEF	Effekte: ja	Effekte: nein
													Effekte: ja	Effekte: nein	
#5 Michel, Röthlis- berger, et al., 2011	94 m/w	jüngere & ältere Gruppe (jeweils mit „Kontrollkindern“ und Kindern mit motorischer Entwicklungsstörung) (für Korrelationen nicht zw. Jüngeren und älteren unterschieden)	5 - 6 (5,10)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG Band 1 für jüngere und Band 2 für ältere Kinder 	<ul style="list-style-type: none"> Farbspanne rw <i>Stroop</i> (RT & Gen.) <i>KF Test</i> (RT & Gen.) 	<ul style="list-style-type: none"> akademische Vorläufer- fähigkeiten Intelligenz VG SES SR des Kindes elterliche Unterstützung & soz. Integration Wortschatz <p>(EFs korrelieren u. a. mit IQ) (HG korrelierte u. a. mit akademischen Vorläuferfähigkeiten, IQ, SR (Lehrereinschätzung))</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> <p>nur in der Gruppe der motorisch beeinträchtigten Kinder</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & AG ● </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> <p>nur in der Gruppe der motorisch beeinträchtigten Kinder</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & AG ● </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>				
#6 Michel, Kauer et al., 2011	179 m/w	<ul style="list-style-type: none"> 34 mit motorischer Störung 8 mit einem Risiko für eine motorische Störung 123 Kontrollkinder <p>(für die Berechnungen der Korrelationen wurde die gesamte Stichprobe genommen)</p>	7 (7,5)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG M-ABC- Balance M-ABC- Ballfertigkeit M-ABC total 	<ul style="list-style-type: none"> „AG einfach“: (Zahlenspanne vw & Wortspanne vw) „AG schwer“: (Zahlenspanne rws & Farbspanne rw) <i>GoNogo</i> (RT/go & Gen./Nogo) <i>Flanker</i> (RT/inc & Gen./inc) <i>Simon</i> (RT/inc & Gen./inc) 	<ul style="list-style-type: none"> Alter (keinen Einfluss auf motorische oder EF Tests) 	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> <p>Feinmotorik & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>/(RT)) ●</p> <p>Feinmotorik & Inhibition/SR (<i>Simon</i>/(RT)) ●</p> <p>Grobmotorik (Ballfertigkeit) & Inhibition/SR (<i>Simon</i>/(RT)) ●</p> <p>Grobmotorik (Ballfertigkeit) & Inhibition/SR (<i>GoNogo</i>/(RT)) ●</p> <p>Grobmotorik (Balance) & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>/(RT)) ●</p> <p>Grobmotorik (Balance) & Inhibition/SR (<i>Simon</i>/(RT)) ●</p> <p>Grobmotorik (Balance) & Inhibition/SR (<i>GoNogo</i>/(RT)) ●</p> <p>Gesamt (M-ABC total) & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>/(RT)) ●</p> <p>Gesamt (M-ABC total) & Inhibition/SR (<i>Simon</i>/(RT)) ●</p> <p>Gesamt (M-ABC total) & Inhibition/SR (<i>GoNogo</i>/(RT)) ●</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>... die Verarbeitungsgeschwindigkeit)</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>				

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse				
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation <u>ohne</u> Kontrollvariablen		Korrelation <u>mit</u> Kontrollvariablen			
					FM	G	K	mPl		AG	I	KF	HEF	Effekte: ja	Effekte: nein
													Effekte: ja	Effekte: nein	
#7 Asonitou et al., 2012	108 m/w	jüngere (5 Jahre) & ältere Gruppe (6 Jahre) (jeweils mit „Kontrollkindern“ und Kindern mit motorischer Entwicklungsstörung) (für die Berechnungen der Korrelationen auf die Altersgruppen-einteilung verzichtet)	4,7-5,5 (5,2) & 5,6-6,4 (5,9)	<ul style="list-style-type: none"> emotionale Störungen Verhaltensauffälligkeiten niedriger IQ 	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG M-ABC- Balance M-ABC- Ballfertigkeit M-ABC total BOTMP (Sprintschnelligkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> CAS <i>Planning Pass, Attention Pass, Simultaneous Pass</i> <p>(Die Skalen sind den EFs von Diamond nicht eindeutig zuzuordnen)</p>	-	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja <p>Gruppe mit motorischen Entwicklungsstörungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & HEF ● Gesamt (M-ABC total) & HEF ● <p>Gruppe ohne motorische Entwicklungsstörungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & HEF ● Grobmotorik (Balance) & KF ● Gesamt (M-ABC total) & KF ● Gesamt (M-ABC total) & HEF ● 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 		
#8 Roebers et al., 2014 (t1 & t2)	169 m/w	-	t1: 5-6 (5,9) t2: 6-7	<ul style="list-style-type: none"> motorische, sprachliche & psychologische Entwicklungsstörungen 	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG 	<ul style="list-style-type: none"> Farbspanne rw <i>Fruit Stroop</i> (RT/Interferenzwert) <i>KF Test</i> (Gen.) <p>= EFs Gesamtwert</p>	<ul style="list-style-type: none"> Intelligenz (CFT-1 & TONI-3) <p>(korrelierte signifikant mit motorischen und EF Tests)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja <p>• t1: Feinmotorik & EFs Gesamt ● • t2: Feinmotorik & EFs Gesamt ●</p>	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja <p>• t1: Feinmotorik & EFs Gesamt ● • t2: Feinmotorik & EFs Gesamt ●</p>	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	
#9 Stöckel & Hughes, 2016	40 m/w	-	5-6 (6,1)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG <i>Bar Transport</i> 	<ul style="list-style-type: none"> CBT <i>Animal Stroop/(RT)</i> <i>Animal Stroop/(Gen.)</i> <i>Tower of London</i> (Gen.) 	-	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja <p>• Feinmotorik & AG ● • Feinmotorik & Inhibition/SR (<i>Animal Stroop/(Gen.)</i>) ● • motorische Planung & AG ● • motorische Planung & höhere EF ●</p>	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 		

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse				
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation <u>ohne</u> Kontrollvariablen		Korrelation <u>mit</u> Kontrollvariablen			
					FM	G	K	mPl		AG	I	KF	HEF	Effekte: ja	Effekte: nein

#10 Oberer et al., 2017	156 m/w	-	5,8-7,3 (6,5)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG Perlen aufziehen, Taler einwerfen, Spur nachzeichnen Grobmotorik Einbeinstand, springen seitwärts, seitliches Umsetzen 	<ul style="list-style-type: none"> Farbspanne rückwärts <i>Flanker</i> (Gen.) <i>Flanker Mix</i> (Gen.) 	<ul style="list-style-type: none"> Kraft (Standweitsprung) Ausdauer (6-min-Lauf) PA-Level Kind PA-Level Eltern SES <p>(Nur SES & EFs korrelieren signifikant. Unter Einbezug des Alters als Kontrollvariable verliert sich dieser Effekt jedoch)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik (Taler einwerfen) & AG ● Feinmotorik (Perlen aufziehen, Spur nachzeichnen) & AG ● Feinmotorik (Perlen aufziehen, Taler einwerfen) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Taler einwerfen) & KF ● Feinmotorik (Perlen aufziehen) & KF ● Grobmotorik (alle) & AG ● Grobmotorik (springen sw, seitliches Umsetzen) & Inhibition/SA ● Grobmotorik (Einbeinstand) & Inhibition/SA ● Grobmotorik (springen seitwärts, seitliches Umsetzen) & KF ● 	Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein
									<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik (Perlen aufziehen, Taler einwerfen) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Perlen aufziehen) & KF ● Feinmotorik (Taler einwerfen) & KF ● Feinmotorik (Perlen aufziehen, Taler einwerfen) & Arbeitsgedächtnis ● Grobmotorik (Einbeinstand) & Inhibition/SA ● Grobmotorik (springen sw, seitliches Umsetzen) & Inhibition/SA ● Grobmotorik (springen seitwärts, seitliches Umsetzen) & KF ● Grobmotorik (alle) & Arbeitsgedächtnis ● 		<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik (Perlen aufziehen, Taler einwerfen) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Perlen aufziehen) & KF ● Feinmotorik (Taler einwerfen) & KF ● Feinmotorik (Perlen aufziehen, Taler einwerfen) & Arbeitsgedächtnis ● Grobmotorik (Einbeinstand) & Inhibition/SA ● Grobmotorik (springen sw, seitliches Umsetzen) & Inhibition/SA ● Grobmotorik (springen seitwärts, seitliches Umsetzen) & KF ● Grobmotorik (alle) & Arbeitsgedächtnis ● 	

(... das Alter)

#11 Michel et al., 2019 (t1)	208 m/w	-	4,3-7,0 (5,5)	<ul style="list-style-type: none"> motorische, sprachliche & psychologische Entwicklungsstörungen 	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG M-ABC- Balance M-ABC- Ballfertigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Farbspanne rw CBT rw <i>GoNogo</i> (Proportion aus richtigen und falschen Antworten) <i>Flanker</i> (Gen.) <i>Flanker Mix</i> (Gen.) 	<ul style="list-style-type: none"> nonverbale Intelligenz (CFT-1) <p>(korreliert signifikant mit motorischen und EF Tests)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & AG (beide Tests) ● Feinmotorik & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>) ● Feinmotorik & KF ● Grobmotorik (Balance) & AG (CBT rw) ● Grobmotorik (Balance) & Inhibition/SR (<i>GoNogo</i>) ● 	Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein
									<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>) ● Feinmotorik & AG (Farbspanne rw) ● Grobmotorik (Balance) & AG (CBT rw) ● Grobmotorik (Balance) & Inhibition/SR (<i>GoNogo</i>) ● 		<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>) ● Feinmotorik & AG (Farbspanne rw) ● Grobmotorik (Balance) & AG (CBT rw) ● Grobmotorik (Balance) & Inhibition/SR (<i>GoNogo</i>) ● 	

(... das Alter)

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse			
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions-kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation ohne Kontrollvariablen		Korrelation mit Kontrollvariablen		
					FM	G	K	mPl		AG	I	KF	HEF	Effekte: ja
													Effekte: nein	Effekte: ja

#12 Maurer & Roebers, 2019	124 m/w	-	5,0-6,10 (5,11)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG & Abwandlung Spur nachzeichnen (leicht & schwer), Taler einwerfen (leicht & schwer), Perlen aufziehen (leicht & schwer) Grobmotorik springen seitwärts (leicht & schwer), seitliches Umsetzen (leicht und schwer), Einbeinstand (leicht & schwer) 	<ul style="list-style-type: none"> Updating Test Flanker (RT/Inc) DCCS (pauer) <p>& EFs Gesamtwert</p>	<ul style="list-style-type: none"> Bildungsstatus der Eltern SES <p>(keinen Einfluss auf motorische oder EF Tests)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik Gesamt (leicht) & EFs Gesamt ● Feinmotorik Gesamt (schwer) & EFs Gesamt ● Grobmotorik Gesamt (schwer) & EFs Gesamt ● Feinmotorik (Spur leicht & schwer, Taler leicht & schwer) & AG ● Feinmotorik (Perlen leicht & schwer) & AG ● Feinmotorik (Spur leicht, Taler schwer, Perlen schwer) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Spur leicht, Taler leicht, Perlen leicht & schwer) & KF ● Feinmotorik (Taler schwer) & KF ● Grobmotorik (springen sw leicht & schwer, seitliches Umsetzen schwer) & AG ● Grobmotorik (Einbeinstand schwer) & AG ● Grobmotorik (springen seitwärts leicht & schwer, seitliches Umsetzen schwer) & Inhibition/SA ● </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik (leicht & EFs Gesamt ●) Feinmotorik (schwer) & EFs Gesamt ● Grobmotorik (schwer) & EFs Gesamt ● Feinmotorik (Spur leicht & schwer, Taler leicht & schwer, Perlen leicht) & AG ● Feinmotorik (Perlen schwer) & AG ● Feinmotorik (Taler schwer) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Spur leicht, Taler leicht, Perlen schwer) & KF ● Feinmotorik (Taler schwer) & KF ● Grobmotorik (springen seitwärts schwer, Einbeinstand schwer) & AG ● Grobmotorik (springen seitwärts leicht & schwer) & Inhibition/SA ● </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: ja</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik Gesamt (leicht) & EFs Gesamt ● Feinmotorik Gesamt (schwer) & EFs Gesamt ● Grobmotorik Gesamt (schwer) & EFs Gesamt ● Feinmotorik (Spur leicht & schwer, Taler leicht & schwer, Perlen leicht) & AG ● Feinmotorik (Perlen schwer) & AG ● Feinmotorik (Taler schwer) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Spur leicht, Taler leicht, Perlen schwer) & KF ● Feinmotorik (Taler schwer) & KF ● Grobmotorik (springen seitwärts schwer, Einbeinstand schwer) & AG ● Grobmotorik (springen seitwärts leicht & schwer) & Inhibition/SA ● </div> <div style="flex: 1;"> <p>Effekte: nein</p> <ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik (leicht & EFs Gesamt ●) Feinmotorik (schwer) & EFs Gesamt ● Grobmotorik (schwer) & EFs Gesamt ● Feinmotorik (Spur leicht & schwer, Taler leicht & schwer, Perlen leicht) & AG ● Feinmotorik (Perlen schwer) & AG ● Feinmotorik (Taler schwer) & Inhibition/SA ● Feinmotorik (Spur leicht, Taler leicht, Perlen schwer) & KF ● Feinmotorik (Taler schwer) & KF ● Grobmotorik (springen seitwärts schwer, Einbeinstand schwer) & AG ● Grobmotorik (springen seitwärts leicht & schwer) & Inhibition/SA ● </div> </div>
----------------------------	---------	---	-----------------	---	--	---	--	--	--

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren							Ergebnisse				
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions-kriterien	Motorische Kompetenzen			Exekutive Funktionen			Kontrollvariablen	Korrelation ohne Kontrollvariablen		Korrelation mit Kontrollvariablen		
					FM	G	K	mPl	AG	I	KF	HEF	Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein
													kontrolliert wurde für ...			

mittlere Kindheit (7-9 Jahre) & späte Kindheit (9 -12 Jahre)															
#1 Pangalinan et al., 2011	172 m/w	-	6-13 (9)	<ul style="list-style-type: none"> Linkshänder IQ unter dem Durchschnitt Anamnese mit Kopfverletzungen /neurologische Störungen Lernstörungen Pubertätsstatus außer der Norm 	<ul style="list-style-type: none"> Pegboard (bimanuell) 	<ul style="list-style-type: none"> CANTAB –AG Test (visuell-räumlich) 	<ul style="list-style-type: none"> IQ (WASI) <p>(IQ korrelierte sowohl mit Pegboard als auch mit der AG- Leistung)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 				
													(... das Alter und das Geschlecht)		
#2 Rigoli et al., 2012	93 m/w	-	12-16 (14,2)	<ul style="list-style-type: none"> sprachliche, motorische & neurologische Entwicklungsstörungen chronische Erkrankungen 	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC- HG M-ABC- Balance M-ABC- Ballfertigkeit M-ABC total 	<ul style="list-style-type: none"> N-back Test verbaler AG Test (WISC WMI) NEPSY Inhibitionstest (Dauer) NEPSY KF-Test (Dauer) 	<ul style="list-style-type: none"> Sprachverständnis Hyperaktivität (Elternfragebogen) Aufmerksamkeit (Elternfragebogen) 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 				
								<ul style="list-style-type: none"> Feinmotorik & Inhibition ● Grobmotorik (Ballfertigkeit) & beide AG Tests ● Grobmotorik (Ballfertigkeit) & KF ● Gesamt (M-ABC total) & AG/ N-back ● Gesamt (M-ABC total) & Inhibition ● Gesamt (M-ABC total) & KF ● 							
#3 Fernandes et al., 2016	45 m/w	-	8-14 (10,4)	<ul style="list-style-type: none"> Analphabetismus ADHS, kognitive Beeinträchtigungen unbehandelte Störungen im Sehen und Hören schwerwiegende motorische Störungen 	<ul style="list-style-type: none"> Shuttle Run Touch Test Discs 	<ul style="list-style-type: none"> Zahlen-Buchstaben-Sequenz Zahlenspanne rw Stroop (RT in inkongruenter Bedingung minus RT in Wortkondition) 	<ul style="list-style-type: none"> Schulleistungen BMI <p>(BMI keinen Einfluss auf motorische oder EF Tests, aber Schulleistungen & Schnelligkeit im Touch Test Discs)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: ja 	<ul style="list-style-type: none"> Effekte: nein 				

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse				
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation <u>ohne</u> Kontrollvariablen		Korrelation <u>mit</u> Kontrollvariablen			
					FM	G	K	mPl		AG	I	KF	HEF	Effekte: ja	Effekte: nein
													Effekte: ja	Effekte: nein	

#4 Aadland et al., 2017	697 m/w	340 Jungs & 357 Mädchen	(10,2)	-	<ul style="list-style-type: none"> M-ABC Ball fangen mit einer Hand, Zielwerfen, <i>Shuttle Run</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Zahlenspanne vw & rw <i>Stroop</i> (Gen.) <i>verbal fluency Test</i> <i>TMT</i> (Dauer Part B) <p>& EFs Gesamtwert</p>	<ul style="list-style-type: none"> PA aerobe Ausdauer Schulleistungen Alter Körperperfekt Geburtsgewicht SES Pubertätsstatus <p>(Interaktionen u. a. zwischen EFs & aeroben Ausdauer, Schulleistungen, Geschlecht)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: ja</p> <p>für Gruppe der Mädchen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik & Inhibition/SR ● Grobmotorik & AG ● Grobmotorik & KF (<i>TMT</i>) ● Grobmotorik & EFs Gesamt ● <p>für Gruppe der Jungs:</p> <ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik & Inhibition/SR ● Grobmotorik & KF (<i>TMT</i>) ● Grobmotorik & EFs Gesamt ● </div> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: ja</p> <p>für Gruppe der Mädchen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik & Inhibition/SR ● Grobmotorik & AG ● Grobmotorik & KF (<i>TMT</i>) ● Grobmotorik & EFs Gesamt ● <p>für Gruppe der Jungs:</p> <ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik & Inhibition/SR ● Grobmotorik & KF (<i>TMT</i>) ● Grobmotorik & EFs Gesamt ● </div> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>
-------------------------------	------------	----------------------------	--------	---	---	---	--	---	---

Frühes Erwachsenenalter bis mittleres Erwachsenenalter (20-40 Jahre)														
#1 Stöckel et al., 2017	77	n = 37 älteres Erwachsenen- alter	61-86 (73,5)	<ul style="list-style-type: none"> nicht korrigierte Sehschwäche neuromuskuläre Erkrankungen 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Pegboard</i> unimanuell <i>Pegboard</i> bimanuell <i>Bar Transport</i> <i>bimanuell</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>CBT</i> Zahlenspanne rw <i>Flanker Test</i> (RT für Gen. kontrolliert) <i>Simon Test</i> (RT für Gen. kontrolliert & Interferenz aus kongruenten und inkongruenten Versuchen) <i>WCST</i> (Gen.) <i>TMT</i> (RT Part B minus RT Part A) <i>Tower of London</i> (Gen. & Zeit bis zum ersten Zug) 	<ul style="list-style-type: none"> Händigkeit Geschlecht Alter <p>(Händigkeit und Geschlecht hatten keinen Einfluss auf motorische oder kognitive Fähigkeiten)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: ja</p> <p>für Gruppe der jungen Erwachsenen keine Effekte für die motorische Planung und die erhobenen EFs</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: ja</p> <p>für die Gruppe der älteren Erwachsenen dagegen:</p> <ul style="list-style-type: none"> motorische Planung & AG (<i>CBT</i>) ● motorische Planung & Inhibition/SA (<i>Flanker</i>/(RT)) ● motorische Planung & Inhibition/SR (<i>Simon</i> (Gen. und RT)) ● motorische Planung & KF (<i>WCST</i>) ● motorische Planung & KF (<i>TMT</i>) ● </div> <div style="width: 45%;"> <p>Effekte: nein</p> </div> </div>					

Autor/ Jahr	Umfang Stichprobe		Charakteristik Stichprobe		Angewendete Testverfahren						Ergebnisse			
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (mittleres Alter)	Exklusions-kriterien	Motorische Kompetenzen		Exekutive Funktionen		Kontrollvariablen	Korrelation ohne Kontrollvariablen		Korrelation mit Kontrollvariablen		
					FM	G	K	mPl		AG	I	KF	HEF	Effekte: ja
													Effekte: nein	Effekte: ja
														Effekte: nein

#2 Spedden et al., 2018	82 m/w	n = 30 junge Erwachsene (19-40 Jahre) n = 16 mittleres Erwachsenen- alter (41-60 Jahre) n = 36 älteres Erwachsenen- alter (61-83)	19-83	<ul style="list-style-type: none"> neuromuskuläre Erkrankungen aktuelle Operationen oder Schmerzen, die Motorik beeinträchtigen 	<p>Grobmotorik einfach und schwer/komplex:</p> <ul style="list-style-type: none"> dynamisches Gleichgewicht (schwer/komplex) <i>Sit to Stand Test</i> (einfach) 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Stroop</i> (Gen.) 	<ul style="list-style-type: none"> Alter Geschlecht einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit komplexe Verarbeitungsgeschwindigkeit 	Effekte: ja	Effekte: nein	Effekte: ja	Effekte: nein	
								für Gruppe der jungen Erwachsenen keine Effekte für die grobmotorischen Komponenten und den <i>Stroop</i> -Test zur Erfassung der Inhibition/Selbstregulierung		für Gruppe der jungen Erwachsenen keine Effekte für die grobmotorischen Komponenten und den <i>Stroop</i> -Test zur Erfassung der Inhibition/Selbstregulierung		
								für die Gruppe der älteren Erwachsenen dagegen:		für die Gruppe der älteren Erwachsenen dagegen:		
								<ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik (schwer) & Inhibition/SR ● 		<ul style="list-style-type: none"> Grobmotorik (schwer) & Inhibition/SR ● 		
								(... für Alter, Geschlecht, einfache und komplexe Verarbeitungsgeschwindigkeit)				

Abkürzungen: **ADHS:** Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung; **AG:** Arbeitsgedächtnis; **BMI:** Body-Mass-Index; **BOTMP:** Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency; **CANTAB-AG:** Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery/Arbeitsgedächtniskomponente; **CAS:** Cognitive Assessment System; **CBT:** Corsi Block-Tapping Test; **CFT-1:** Grundintelligenz Skala 1; **con:** kongruente Bedingung des Tests; **DCCS:** Dimensional Change Card Sort; **DNS:** Day-Night Stroop Test; **EFs:** Exekutive Funktionen; **EU:** Elterliche Unterstützung; **FM:** Feinmotorik; **G:** Grobmotorik; **Gen./inc:** Genauigkeit als abhängige Variable im Test; **Gen./inc:** Genauigkeit in der inkongruenten Bedingung des Tests; **GoNogo:** GoNogo Test zur Erfassung der Inhibition/Selbstregulation; **HEF:** höhere exekutive Funktionen; **I:** Inhibition; **inc:** Inkongruente Bedingung des Tests; **Inhibition/SA:** Inhibition/selektive Aufmerksamkeit; **Inhibition/SR:** Inhibition/Selbstregulierung; **IQ:** Intelligenzquotient; **K:** motorische Tests die sowohl fein- als auch grobmotorische Aspekte beinhalten; **KF:** Kognitive Flexibilität; **m:** männlich; **M-ABC:** Movement Assessment Battery for Children; **M-ABC-HG:** M-ABC-Untertest Handgeschicklichkeit; **M-ABC-Balance:** M-ABC-Untertest Gleichgewicht; **M-ABC total:** M-ABC Gesamtwert; **mPl:** motorische Planung; **n:** Anzahl der Probanden; **NEPSY:** A Developmental Neuropsychological Assessment; **PA:** physische Aktivität; **r:** Korrelationskoeffizient; **RT:** Reaktionsgeschwindigkeit als abhängige Variable im Test; **RT/go:** Reaktionszeit in der „go“-Bedingung; **RT/inc:** Reaktionszeit in der inkongruenten Bedingung; **rw:** rückwärts; **SES:** sozioökonomischer Status; **Simon:** Simon Test zur Erfassung der Inhibition/Selbstregulation; **SST/GoRT (RT):** Reaktionszeit für „Go“-Versuche im stop-signal Test; **SST/SSRT (RT):** Reaktionszeit für „stop“-Versuche im stop-signal Test; **sw:** seitwärts; **t1:** erster von mehreren Testzeitpunkten; **t2:** zweiter von mehreren Testzeitpunkten; **TMT:** Trail Making Test; **TONI-3:** Test of Nonverbal Intelligence: A language-free measure of cognitive ability; **u. a.:** unter anderem; **VG:** Verarbeitungsgeschwindigkeit; **vw:** vorwärts; **w:** weiblich; **WASI:** Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence; **WCST:** Wisconsin Card Sorting Test; **WISC WMI:** Wechsler Intelligence Scale for Children/Arbeitsgedächtnis Index.

Im Überblick ist festzuhalten, dass 12 von 12 Studien (in der Altersspanne der Drei- bis Siebenjährigen) über signifikante Zusammenhänge (Korrelationen nullter Ordnung) zwischen Fein- bzw. Grobmotorik und EFs berichteten. Die Größe der Effekte befindet sich dabei fast ausschließlich im kleinen ($0,10 \leq r \leq 0,29$) bis mittleren ($0,30 \leq r \leq 0,49$) Bereich (Cohen, 1988). Betrachtet man jedoch die von Diamond (2013) postulierten EFs im Einzelnen, gibt es weniger eindeutige Aussagen zur Existenz von signifikanten Zusammenhangsmaßen.

Mit dem Zusammenhang von Feinmotorik und Arbeitsgedächtnis beschäftigten sich sieben von zwölf Studien (Maurer & Roebers, 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Michel, Röthlisberger, et al., 2011; Michel et al., 2019; Oberer et al., 2017; Roebers et al., 2014; Stöckel & Hughes, 2016;). Fünf von diesen sieben Studien (71%) fanden dabei relevante Effekte zwischen diesen Komponenten (Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Roethlisberger, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016). Die Zusammenhangsmaße zwischen Feinmotorik und Inhibition untersuchten neun von zwölf Studien (Asonitou et al., 2012; Livesey et al., 2006; Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Michel, Roethlisberger, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016). Von diesen neun Studien berichteten sieben (78%) von signifikanten Korrelationen mit kleiner bis mittlerer Effektstärke (Livesey et al., 2006; Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016). Lediglich Livesey et al. (2006) konnten einen großen Effekt zeigen. Dieser betraf die Leistungen in den Feinmotorikaufgaben eines motorischen Entwicklungstests (Henderson & Sudgen, 1992) und dem *Day-Night Stroop Test* (Berlin & Bohlin, 2002) zur Erfassung der Inhibition/Selbstregulation. Von den sechs Untersuchungen, die die Aspekte Feinmotorik und kognitive Flexibilität inkludierten (Asonitou et al., 2012; Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Roethlisberger, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Roebers & Kauer, 2009), berichten vier (67%) von Zusammenhangsmaßen im signifikanten Bereich (Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Oberer et al., 2017; Roebers & Kauer, 2009).

Bezüglich der Grobmotorik und Tests zum Arbeitsgedächtnis verweisen sechs (Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Oberer et al., 2017; Pennequin et al., 2010; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016) von sieben Studien (86%) (Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Pennequin et al., 2010; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016) auf signifikante Effekte, die auf ein Zusammenwirken dieser zwei Aspekte schließen lassen. Tests, mit denen die inhibitorische Kontrolle und die Grobmotorik erfasst wurden, kamen in neun Untersuchungen zum Einsatz (Asonitou et al., 2012; Livesey et al., 2006; Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Pennequin et al., 2010; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016). Von den genannten Studien berichteten sieben (78%) über nennenswerte Effekte (Livesey et al., 2006; Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Pennequin et al., 2010; Roebers & Kauer, 2009).

Pennequin et al. (2010) verweisen dabei sogar auf einen großen Effekt zwischen einem Test zur motorischen Planung und einem Stroop Test, der vor allem den selbstregulatorischen Aspekt inhibitorischer Kontrolle abbildet. Der Zusammenhang zwischen Tests zur Einschätzung der kognitiven Flexibilität, grobmotorischen Fertigkeiten sowie motorischer Planungsfähigkeiten wurde in sechs Untersuchungen thematisiert (Asonitou et al., 2012; Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Oberer et al., 2017; Pennequin et al., 2010; Roebers & Kauer, 2009) und schließlich in drei von diesen mit kleinen bis mittleren Effekten bestätigt (Asonitou et al., 2012; Oberer et al., 2017; Roebers & Kauer, 2009).

Weiterhin wurde in einigen Studien auf die Trennung der einzelnen EFs in der Auswertung verzichtet und stattdessen ein Gesamtwert über die Kernfunktionen AG, inhibitorische Kontrolle und kognitive Flexibilität gebildet (Maurer & Roebers, 2019; Roebers et al., 2014; Röthlisberger et al., 2010). In allen drei Studien wurden Zusammenhangsmaße zu Grob- oder Feinmotorik im signifikanten Bereich berichtet, allerdings ging auch hier die Größe des Effektes nicht über klein bis mittel hinaus. Die beschriebenen Ergebnisse in der Dichotomie zwischen „Effekt vorhanden – Effekt nicht vorhanden“ sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelationsstudien. Es wird die Anzahl an Studien ersichtlich, die in den jeweiligen genannten Bereichen existieren, sowie die Anzahl der Untersuchungen, die innerhalb dieser Auswahl über signifikante positive Assoziationen berichten (sowie deren Übertrag in einen Prozentwert).

Motorischer Aspekt/EF	Arbeitsgedächtnis	Inhibition	Kognitive Flexibilität	Gesamtwert EFs
Feinmotorik	5/7 (71%)	7/9 (78%)	4/6 (67%)	3/3 (100%)
Grobmotorik & motorische Planung	6/7 (86%)	7/9 (78%)	3/6 (50%)	1/1 (100%)

Vor allem die Komponenten des Arbeitsgedächtnisses und der inhibitorischen Kontrolle scheinen im frühen Kindesalter sowohl mit der Fein- als auch mit der Grobmotorik assoziiert zu sein. Ebenfalls nachgewiesen, wenn auch zu einem leicht geringeren Anteil, sind aber auch Einflüsse der kognitiven Flexibilität auf die genannten motorischen Fertigkeiten.

Der überwiegenden Anzahl der Studien mit signifikanten Assoziationen zum Trotz wird bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse deutlich: die Datenlage zwischen den Studien ist von Inkonsistenz und Heterogenität geprägt. Anhand dreier Beispiele soll dies verdeutlicht werden. Zusätzlich werden mögliche Moderatoren abgeleitet, die auf das Zusammenspiel einwirken könnten und im weiteren Verlauf zur Hypothesenbildung der vorliegenden Arbeit herangezogen werden. Als Moderatoren werden in diesem Zusammenhang Variablen verstanden, die die Spezifik (Qualität) und/oder die Stärke (Quantität) des Motorik-EFs-Zusammenspiels beeinflussen könnten (Pesce, 2012).

Von den zwölf Studien die Kinder im Vorschulalter untersuchten, nutzten acht mehrere EF-Subkomponenten (Maurer & Roebers, 2019; Michel et al., 2019; Michel, Kauer, et al., 2011; Michel, Roethlisberger, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Pennequin et al., 2010; Roebers & Kauer, 2009; Stöckel & Hughes, 2016). Von diesen acht, können drei (ca. 38%) keine Assoziationen zwischen allen einbezogenen EFs beobachten, was dafür spricht, dass das Zusammenspiel nicht globaler Natur ist, sondern einer gewissen Spezifik unterliegt (Michel, Kauer, et al., 2011; Michel, Röthlisberger, et al., 2011; Pennequin et al., 2010).

Des Weiteren gibt es Untersuchungen, die ähnliche Altersgruppen inkludierten, aber unterschiedliche Tests zur Erfassung ein und derselben EF nutzten. Sie kommen damit ebenfalls zu differenten Ergebnissen. Livesey et al. (2006) geben bspw. in ihrer Studie einen starken Effekt zwischen der Komponente der Feinmotorik und der inhibitorischen Kontrolle/Selbstregulation an (*day night Stroop Test*; Berlin & Bohlin, 2002). Michel, Röthlisberger, et al. (2011) nutzten nahezu die gleiche Feinmotorik-Testbatterie aber einen anderen Test zur Erfassung der selbstregulatorischen Fähigkeit (Stroop; Archibald & Kerns, 1999; Röthlisberger et al., 2010) und berichteten im Zuge dessen über nicht vorhandene Korrelationen. Beim Vergleich dieser Studien wird deutlich, dass die Auswahl der Tests eine weitere entscheidende Rolle in der Moderation des Zusammenspiels zwischen den Domänen einnehmen könnte. Diamond (2000) zu Folge, sind der PFC und das Kleinhirn vor allem dann aktiviert, wenn eine Aufgabe, egal welcher Natur, neu und/oder komplex ist. Dementsprechend kann vermutet werden, dass u. a. das empfundene Schwierigkeitslevel einer Aufgabe, den Grad der „Inanspruchnahme“ von EFs beeinflusst. Demzufolge würden schwere Aufgaben bzw. gleich schwere Aufgaben im kognitiven und motorischen Feld eher zu signifikanten Effekten führen als Aufgaben, die bereits automatisiert oder sehr einfach sind.

In Tabelle 1 wird zudem ersichtlich, dass Studien mit Probanden im mittleren Kindes- und jungen Erwachsenenalter (u. a. Fernandes et al., 2016; Pangelinan et al., 2011; Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017) im Gegensatz zu Untersuchungen mit Probanden im jungen Kindesalter (u. a. Asonitou et al., 2012; Livesey et al., 2006; Michel, Röthlisberger, et al., 2011; Roebers et al., 2014) gehäuft von Ergebnissen berichten, die keine Wechselwirkungen zwischen exekutiven und motorischen Funktionen vermuten lassen (4/6 vs. 0/12). Zudem wird in der statistischen Auswertung der Untersuchungen oftmals für das Alter kontrolliert, was in einigen Fällen zur einer leichten Abnahme oder gar eines Wegfalls der Effektstärken führt (Maurer & Roebers, 2019; Michel, Kauer, et al., 2011). Die genannten Punkte stützen die Annahme, dass die altersabhängige Entwicklung einen Einfluss auf die Zusammenhangsmaße hat. Konkret könnte dies bedeuten, dass es mit zunehmendem Alter bzw. kognitiver/motorischer Reife zu einer Abnahme der Stärke des Zusammenspiels kommt. Oberer und Kollegen (2017) berichten bspw. über kleine bis mittlere Effekte zwischen den Leistungen im Arbeitsgedächtnistest „Farbspanne rückwärts“ und den feinmotorischen Aufgaben aus der *Movement Assessment Battery for children* (M-ABC-2; Petermann, 2009). Michel, Kauer, et al. (2011) dagegen

kommen trotz der Anwendung gleicher Testmaterialien zu dem Ergebnis, dass zwischen den genannten Komponenten keine signifikante Wechselwirkung besteht. Während letztere ein mittleres Probandenalter von 7,5 Jahren angeben, beträgt das Alter in der Studie von Oberer et al. (2017) durchschnittlich 6,5 Jahre.

Die gewählte Form der Zusammenfassung der Studien im Forschungsfeld impliziert, dass diese auch vergleichbar sind. Dies ist jedoch nur bedingt der Fall. Ein Blick auf die Methodik der einzelnen Untersuchungen offenbart recht deutlich, dass methodologische Unterschiede in der Test- und Testvariablenauswahl (u. a. Reaktionsgeschwindigkeit vs. Genauigkeit) bestehen. Dieser Fakt und das sogenannte *task-impurity* Problem (Denckla, 1994; Rabbitt, 1997; van der Sluis et al., 2007), welches besagt, dass Tests zur Erfassung exekutiver Funktionen kaum in der Lage sind, klar abgegrenzte Prozesse und Fähigkeiten abzubilden, erschweren sowohl die Vergleichbarkeit bisheriger Studien als auch die Aussagekraft bezüglich einzelner EFs per se. Die Interpretation von Studienergebnissen sollte diese Aspekte nicht außer Acht lassen und Schlussfolgerungen ausschließlich in Anbetracht der spezifischen Untersuchungsbedingungen und -methodik treffen.

Die Darstellung der bisherigen Querschnittsstudien lässt dennoch einige Schlüsse zum Zusammenhang zwischen den Domänen zu, aus denen im Folgenden Hypothesen für die vorliegende Arbeit abgeleitet werden sollen. Generell scheinen kognitive und motorische Funktionen im frühen Kindesalter in kleiner bis mittlerer Ausprägung miteinander assoziiert zu sein. Das Auftreten von Assoziationen scheint dabei an Bedingungen gekoppelt zu sein, die sich bis dato nicht vollends entschlüsseln lassen. Viele Autoren beziehen deshalb verschiedenste Moderatorvariablen, wie bspw. Intelligenz, Alter und den sozioökonomischen Status in ihr Studiendesign mit ein (u. a. Maurer & Roebers, 2019; Oberer et al., 2017). Da jedoch auch hier eine nicht eindeutige Datenlage vorherrscht, bleiben die Pfeiler, auf denen das Zusammenspiel fußt, weitestgehend undefiniert. Mit der vorliegenden Arbeit soll an diesem Punkt angesetzt werden, indem drei mögliche Einflussfaktoren auf das Domänenzusammenspiel systematisch untersucht werden sollen. Dies betrifft zum einen die Spezifität des Zusammenspiels und die individuell empfundene Aufgabenschwierigkeit, zum anderen die Ausreifung bzw. das Fähigkeitslevel motorischer bzw. exekutiver Kompetenzen. Dementsprechend lassen sich die ersten drei Hypothesen der Arbeit wie folgt ableiten:

1. **Spezifität:** Spezifische motorische Aufgaben sind mit spezifischen exekutiven Aufgaben assoziiert. Einen globalen Zusammenhang zwischen den Domänen gibt es nicht (H1).
2. **Aufgabenschwierigkeit:** Motorische Aufgaben mit höherer Schwierigkeit und Komplexität sind stärker mit exekutiven Funktionen assoziiert als motorische Aufgaben mit geringerer Schwierigkeit und Komplexität (H2).

3. *Einfluss des kalendarischen Alters bzw. des exekutiven und motorischen Fähigkeitslevels:* Exekutive und motorische Funktionen sind im Kindesalter stärker miteinander assoziiert als im Erwachsenenalter (H3).

Um langfristig eine Ableitung von Fördermaßnahmen zu ermöglichen, muss zudem untersucht werden, ob das Zusammenspiel zwischen der motorischen und der kognitiven Domäne kausaler Natur ist. Dieser Nachweis kann nur durch Trainingsstudien erbracht werden. Im folgenden Kapitel werden deshalb bisherige Interventionsstudien dargestellt und schließlich die vierte Hypothese der Arbeit abgeleitet.

2.4 Darstellung bisheriger Interventionsstudien

Bei den in Tabelle 3 dargestellten Interventionsstudien handelt es sich ausschließlich um Längsschnittstudien mit mehrwöchigen Interventionsprogrammen. Davon abzugrenzen sind Untersuchungen, die ein einmaliges motorisches Training durchgeführt haben, um akute Effekte auf kognitive Ressourcen zu ermitteln (u. a. Best, Miller, & Naglieri, 2011; Budde, Voelcker-Rehage, Pietraßyk-Kendziorra, Ribeiro, & Tidow, 2008). Weiteres Inklusionskriterium bei der Auswahl bisheriger Studien war die Art des Trainings. Interventionsstudien lassen sich bisher meist in eine der folgenden Kategorien einordnen: Ausdauertraining, Koordinationstraining oder eine der beiden Trainingsformen kombiniert mit expliziten kognitiven Ansprüchen (Vazou et al., 2016). Auch wenn die Grenzen nicht immer klar gezogen werden können, wurde bei der Zusammenstellung der bisherigen Literatur versucht, nur diejenigen zu inkludieren, die entweder ein reines Koordinationstraining oder ein kombiniertes Training aus eben diesem Koordinationstraining und kognitiven Anforderungen angeboten haben. Untersuchungen mit dem Schwerpunkt einer Ausdauerbelastung blieben unberücksichtigt (u. a. Budde et al., 2010; Kamijo et al., 2011; Tomporowski, Davis, Lambourne, Gregoski, & Tkacz, 2008). In diesem Zusammenhang kommen de Greeff, Bosker, Oosterlaan, Visscher, & Hartman (2017) in ihrem Review, welches Untersuchungen mit Sechs- bis Zwölfjährigen inkludierte, zu dem Fazit, dass gerade Bewegungsprogramme über mehrere Wochen, die zusätzlich kognitiv anspruchsvolle motorische Aktivitäten (wie bspw. koordinative Übungen) beinhalten, im besonderen Maße zur Förderung von EFs geeignet wären. Beim Zusammentragen der Studien wurde sich weiterhin auf das Grundschulalter beschränkt, da dies dem in dieser Arbeit relevanten Vorschulalter am nächsten kommt. In der hier präferierten Altersgruppe der Fünf- bis Sechsjährigen liegen nach Kenntnis der Autorin derzeit keine Untersuchungen vor, die das erstgenannte Inklusionskriterium (koordinatives Training über mehrere Wochen) erfüllen.

Auch die nun folgende Zusammenfassung erhebt nicht den Anspruch eines systematischen Reviews, sondern dient dazu einen Überblick über spezifische Interventionsstudien im Forschungsfeld zu geben und Arbeitshypothesen abzuleiten.

Tabelle 3: Übersicht bisheriger motorischer Interventionsstudien mit koordinativen Inhalten zur Förderung von EFs. Die genutzten Tests zur Erfassung der exekutiven Funktionen sind eingeteilt nach Arbeitsgedächtnis, Inhibition und kognitiver Flexibilität. Bei den mit *markierten Studien wurden die Effekte teils selbst berechnet (aufgrund fehlender Angaben in der Originalstudie), weshalb es zu unterschiedlichen Aussagen in der Tabelle und der Originalstudie kommen kann.

Autor/ Jahr	Umfang und Charakteristik Stichprobe			Charakteristik und Bedingungen der motorischen Intervention			Angewendete EF Tests			Kontrollgruppe	Anpassung des Schwierigkeitslevels?	Transfereffekte des motorischen Trainings auf EFs	
	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (Jahre, Monate (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Art der Intervention	Umfang gesamt	Einheiten pro Woche	Dauer einer Einheit in Minuten	AG	I	KF	HEF	
# 1* Lakes & Hoyt, 2004	207 (193) m/w	IG: n = 105 KG: n = 102	5-11	-	• Tae-Kwon-Do Training	16 Wochen	~ 2-3 bis 26x45 erreicht wurden	45	• RCS Skala-kognitiv/SA • RCS Skala- affektiv/Selbstregulation	aktiv SU	ja	• Inhibition/SA ● bis ● • Inhibition/Selbstregulation ● bis ● Jungs profitierten deutlich stärker vom Training als die Mädchen	
# 2 Chang et al., 2013	26 m/w	keine Kontroll- gruppe	6-7,5 (7,1)	<ul style="list-style-type: none"> • Einnahme von Medikamenten • psychische/ neurologische/motorische Störungen • Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems • unkorrigierte Sehchwäche • Linkshändigkeit 	<p>Fußballtraining mit</p> <ul style="list-style-type: none"> • moderater (60-70 % der max. HF) oder • geringer Intensität (40-50 % der max. HF) <p>(u. a. Dribbeln im Laufen bzw. Gehen; Passen; freudbetonte Anweisungen)</p>	8 Wochen	2	35	• Flanker (Gen./RT)	-	nein	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibitionsleistungen (Gen./RT) steigen nach dem Training • kein Unterschied in den Ergebnissen für die geringe oder moderate Intensität • da es keine aktive oder passive Kontrollgruppe gibt, können Aussagen zur Wirksamkeit des Trainings nicht getroffen werden 	
# 3 Crova et al., 2014	70 m/w	IG: n = 37 Fertigkeits- und Tennistraining KG: n = 32 normaler Sportunterricht	9-10 (9,6)	<ul style="list-style-type: none"> • psychische und physische Störungen 	<ul style="list-style-type: none"> • fertigkeitsorientiertes Training und Tennistraining (1x pro Woche Sportunterricht nach Curriculum & 2x pro Woche Tennistraining bzw. Entwicklung fundamentaler motorischer Fähigkeiten) 	21 Wochen	3	ca. 60 (n.a.)	<ul style="list-style-type: none"> • RNG Test/AG • RNG Test/I 	aktiv SU 1 x pro Woche	nein	<ul style="list-style-type: none"> • Inhibition ● <p>nur für die übergewichtigen Kinder in der Gruppe mit dem zusätzlichen fertigkeitsorientierten Training und Tennistraining</p>	

Autor/ Jahr	Umfang und Charakteristik Stichprobe				Charakteristik und Bedingungen der motorischen Intervention				Angewendete EF Tests				Kontrollgruppe	Anpassung des Schwierigkeitslevels?	Transfereffekte des motorischen Trainings auf EFs
	Anzahl gesamt & Geschlecht (n/m/w)	Anzahl pro Gruppe	Alter (Jahre, Monate (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Art der Intervention	Umfang gesamt	Einheiten pro Woche	Dauer einer Einheit in Minuten	AG	I	KF	HEF			
# 4* Dalziell et al., 2015	46 m/w	IG: n = 25 BMT- Programm KG: n = 21 normaler Sportunterricht mit Mannschafts- spielen und Gymnastik	9-10		<ul style="list-style-type: none"> Better Movers and Thinkers (BMT) - Programm (z. B. Gleichgewicht, grobmotorische Koordination, Rhythmus und Timing; Förderung von Motivation, Zielstrebigkeit und Mut; u. a. Integration von Aufgaben, die EFs erfordern) 	16 Wochen	2	60	<ul style="list-style-type: none"> AG – Gesamtwert (Zahlenspanne vorwärts & visuell-räumlicher Gedächtnistest) 	aktiv SU	nein	<ul style="list-style-type: none"> kein Effekt 			

# 5 Koutsandréou et al., 2016	71 m/w	IG: n = 27 Ausdauer IG: n = 23 Koordination KG: n = 21 Hausaufgaben- betreuung	9-10 (9,35)	<ul style="list-style-type: none"> psychische und physische Beschwerden Einnahme von Medikamenten (z. B. Ritalin) 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinatives Training (z. B. bilaterale Koordinationsübungen, Gleichgewichtsschulung, Auge-Hand-Koordination, Bein-Arm-Koordination) Ausdauertraining (z. B. ausdauerndes Laufen in moderater oder hoher Intensität) 	10 Wochen	3	45	<ul style="list-style-type: none"> Zahlen-Buchstaben-Sortieraufgabe 	aktiv KG	nein	<ul style="list-style-type: none"> AG ● <p>nur für die Gruppe, die das koordinative Training durchführte</p>			
-------------------------------------	-----------	--	----------------	---	--	--------------	---	----	--	----------	------	---	--	--	--

# 6 Niet et al., 2016	105 m/w	IG: n = 47 KG: n = 52	8-12 (ca. 8,9)	-	<ul style="list-style-type: none"> unspezifisches Programm mit Hinzunahme von kognitiven Aufgaben wie z. B. Buchstabieren (moderate bis hohe Intensität bei Lauf- und Kraftkreisübungen; Fußball, Seilspringen usw.) 	22 Wochen	2	30	<ul style="list-style-type: none"> Zahlenspanne rückwärts Gedächtnisspanne für Bewegungen Stroop Test TMT Tol 	passiv	nein	<ul style="list-style-type: none"> AG (Zahlenspanne rw) ● Inhibition ● <p>(... für das Geschlecht kontrolliert)</p>			
--------------------------	------------	--------------------------	-------------------	---	---	--------------	---	----	--	--------	------	--	--	--	--

Autor/ Jahr	Umfang und Charakteristik Stichprobe				Charakteristik und Bedingungen der motorischen Intervention				Angewendete EF Tests				Kontrollgruppe	Schwierigkeitslevels? Anpassung des	Transfereffekte des motorischen Trainings auf EFs			
	Anzahl pro Gruppe	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Alter (mittleres Alter)	Art der Intervention	Dauer einer Einheit in Minuten	Umfang gesamt Einheiten pro Woche	AG	I	KF	HEF								

# 7* Schmidt et al., 2015	181 m/w	IG: n = 69 Mannschaft KG: n = 57 Koordination KG: n = 21 SU mit geringer physischer & kognitiver Belastung	10-12	-	<ul style="list-style-type: none"> Mannschaftsspiele (hohe physische und kognitive Beanspruchung; Basketball, Unihockey) Ausdauertraining (hohe physische aber geringe kognitive Beanspruchung; u. a. Klassenmarathon) 	6 Wochen	2	45	<ul style="list-style-type: none"> n-back Test Flanker Flanker Mix Kondition 	aktiv SU	nein	<ul style="list-style-type: none"> KF ● bis ● <p>nur für die Gruppe, die Mannschaftsspiele durchführte</p>
# 8* Alesi et al., 2016	44 m	IG: n = 24 KG: n = 20	8-9 (IG: 8,8) (KG: 9,3)	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungs- störungen 	<ul style="list-style-type: none"> Fußballtraining (koordinative Übungen, Kooperationsspiele, Techniktraining) 	6 Monate	2	75	<ul style="list-style-type: none"> CBT Zahlenspanne rw/vw visueller Diskriminationstest ToL 	passiv	ja	<ul style="list-style-type: none"> AG (CBT) ● Höhere EF ●
# 9* Gallotta et al., 2016	156 m/w	IG: n = 59 Koordination KG: n = 56 Traditionell KG: n = 41 alle Gruppen enthalten normal- und übergewichtige Kinder	8-11	<ul style="list-style-type: none"> Lernstörungen ADHS/ADS neurologische Erkrankungen Einnahme von Medikamenten Entwicklungs- störungen 	<ul style="list-style-type: none"> Koordinatives Training (4 Module à 5 Wochen z. B.: spezifische koordinative Fähigkeiten aus Sportspielen, rhythmischen Aktivitäten und der Gymnastik) Traditionelle Sparteinheit (z. B. Kraft, Ausdauer, Förderung sozialer und kommunikativer Fähigkeiten) 	5 Monate	2	60	<ul style="list-style-type: none"> D2-R-Test (u. a. 1. Anzahl korrekt – Anzahl falsch als Maß für Konzentration, 2. Fehler in Prozent als Maß für die Qualität) 	1. passiv 2. aktiv SU	ja	<p>IG: Koordination vs. passive Kontrollgruppe:</p> <ul style="list-style-type: none"> Inhibition (Konzentration) ● Inhibition (Qualität) ● <p>IG: Koordination vs. IG: aktiv SU:</p> <ul style="list-style-type: none"> Inhibition (Konzentration) ● Inhibition (Qualität) ● <p>keine unterschiedlichen Ergebnisse für normal- oder übergewichtige Kinder</p>

Autor/ Jahr	Umfang und Charakteristik Stichprobe				Charakteristik und Bedingungen der motorischen Intervention				Angewendete EF Tests				Kontrollgruppe	Schwierigkeitslevels? Anpassung des Schwierigkeitslevels?	Transfereffekte des motorischen Trainings auf EFs				
	Anzahl pro Gruppe	Anzahl gesamt & Geschlecht (m/w)	Alter (mittleres Alter)	Exklusions- kriterien	Art der Intervention	Umfang gesamt	Dauer einer Einheit in Minuten	Einheiten pro Woche	AG I KF HEF										

# 10* Gahahrami et al., 2016	40 m/w	Kinder mit geringer Impulsivität: IG: n = 10 KG: n = 10 Kinder mit hoher Impulsivität: IG: n = 10 KG: n = 10	9-12 (11,3)	• Kinder ohne Impulsstörungen	• unspezifisches Programm (z. B. Lauftechniken, Handball, Volleyball, Basketball, Fußball)	18 Wochen	3	60	• <i>Go/NoGo Test</i> (u. a. Gen./RT) • <i>CPT Test</i> (u. a. Gen./RT)	aktiv KG gewöhnliches Schul- programm	nein	Kinder mit geringer Impulsivität: • Inhibition (<i>Go/NoGo</i> (Gen. & RT)) ● • Inhibition (<i>CPT</i> (Gen.)) ● Kinder mit hoher Impulsivität: • Inhibition (<i>Go/NoGo</i> (Gen.)) ● • Inhibition (<i>Go/NoGo</i> (RT)) ●	
# 11 Ludyga et al., 2019	36 m/w	IG: n = 11 Ausdauer IG: n = 12 Koordination KG: n = 14 Hausaufgaben- betreuung	9-12	• Linkshändigkeit • unkorrigierte Sehschwäche • Pubertät • Einnahme von Medikamenten • psychische und physische Beschwerden	• Koordinatives Training (z. B. bilaterale Koordinationsübungen, Gleichgewichtsschulung, räumliche Orientierung, Reaktion auf bewegte Objekte) • Ausdauertraining (z. B. Laufspiele in moderater oder hoher Intensität)	10 Wochen	3	45	• <i>Flanker</i>	aktiv KG	nein	• kein Effekt	

Abkürzungen: **ADHS:** Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung; **ADS:** Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom; **AG:** Arbeitsgedächtnis; **BMT:** *Better Movers and Thinkers*; **bzw.:** beziehungsweise; **ca.:** circa; **CBT:** *Corsi Block-Tapping Test*; **CPT:** *Continues Performance Test* zur Erfassung von Inhibitionsergebnissen; **EFs:** Exekutive Funktionen; **Gen.:** Genauigkeit als abhängige Variable im Test; **HEF:** höhere exekutive Funktionen; **I:** Inhibition; **IG:** Interventionsgruppe; **KF:** kognitive Flexibilität; **KG:** Kontrollgruppe; **m:** männlich; **max. HF:** maximale Herzfrequenz; **n:** Anzahl der Probanden; **n.a.:** nicht angegeben; **RCS:** *Response to Challenge Scale* zur Erfassung der inhibitorischen Leistung; **RNG:** *random number generation* Test zur Erfassung der Arbeitsgedächtnis- und Inhibitionsergebnisse; **RT:** Reaktionszeit; **rw:** rückwärts; **SA:** selektive Aufmerksamkeit; **SU:** Sportunterricht; **TMT:** *Trail Making Test*; **Tol:** *Tower of London Test*; **u. a.:** unter anderem; **vw:** vorwärts; **w:** weiblich.

Unter dem Vorbehalt, dass einige Effektstärken selbst berechnet wurden, wird bei der Betrachtung der zusammengetragenen Interventionsstudien deutlich, dass in neun von elf Untersuchungen (82%) für zumindest eine der erhobenen EFs über einen signifikanten Anstieg der Leistung berichtet wurde. Dabei nimmt die Größe der Effektstärken das gesamte Spektrum von klein ($0.01 \leq \eta_p^2 < 0.06$) über moderat ($0.06 < \eta_p^2 \leq 0.14$) zu groß ($\eta_p^2 > 0.14$) ein (Cohen, 1988). Die Arbeitsgedächtniskapazität konnte in drei (Alesi et al., 2016; Koutsandréou et al., 2016; van der Niet et al., 2016) von sechs Studien (50%) signifikant gesteigert werden (Alesi et al., 2016; Crova et al., 2014; Dalziell et al., 2015; Koutsandréou et al., 2016; Schmidt et al., 2015; van der Niet et al., 2016). Unter den genannten Studien wies das Programm mit dem Fokus auf koordinativen Aufgaben bspw. Auge-Hand- und Bein-Arm-Koordination, den größeren Effekt auf die Arbeitsgedächtnisleistung auf (Koutsandréou et al., 2016). Bei der Betrachtung der Wirksamkeit eines koordinativen Trainings auf die Inhibitionsleistungen blieb die Studie von Chang, Tsai, Chen, & Hung (2013) aufgrund der fehlenden Kontrollgruppe unbeachtet. Acht weitere Studien inkludierten Tests zur Erfassung der inhibitorischen Kontrolle (Alesi et al., 2016; Crova et al., 2014; Gallotta et al., 2015; Ghahramani et al., 2016; Lakes & Hoyt, 2004; Ludyga et al., 2019; Schmidt et al., 2015; van der Niet et al., 2016). Von diesen kommen schließlich fünf (63%) zu deutlichen Leistungssteigerungen nach dem motorischen Training (Crova et al., 2014; Gallotta et al., 2015; Ghahramani et al., 2016; Lakes & Hoyt, 2004; van der Niet et al., 2016). Ein Überblick über die Studien in der Dichotomie zwischen Effekt vorhanden und Effekt nicht vorhanden findet sich in Tabelle 4. Der Vergleich der Untersuchungen, die zu keinem signifikanten Ergebnis kamen mit den Untersuchungen, die zu einem signifikanten Ergebnis kamen, lässt dabei keine Tendenz zu möglichen Moderatoren zu. So nutzten Alesi et al. (2016) und Schmidt et al. (2015) bspw. beide Mannschaftssportarten und konnten keinen Effekt nachweisen, während Ghahramani et al. (2016) ebenfalls Elemente aus Hand- und Fußball nutzten und damit mittlere bis große Effekte auf die Inhibitionsleistung aufzeigen konnten. Bei Crova et al. (2014) gibt es nur für die Untergruppe der übergewichtigen Kinder einen Performancezuwachs in der Inhibition. Bei Gallotta et al. (2015) dagegen hatte das Gewicht der Kinder keinen Einfluss auf die Trainingswirksamkeit. Auch die Dauer des Trainings scheint keinen Garanten für die Wirksamkeit darzustellen. Sowohl Alesi et al. (2016) als auch Ghahramani et al. (2016) trainierten über einen langen Zeitraum von fünf bis sechs Monaten, kommen aber zu völlig anderen Effektstärken. Der Effekt motorischer Trainingsprogramme auf die kognitive Flexibilität wurde lediglich in zwei Untersuchungen thematisiert (Schmidt et al., 2015; van der Niet et al., 2016) und schließlich in einer dieser Studien mit einem kleinen bis mittleren Effekt belegt (Schmidt et al., 2015).

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Interventionsstudien. Es wird die Anzahl an Studien ersichtlich, die versucht haben, durch motorisches Training einzelne EFs zu fördern, sowie die Anzahl der Untersuchungen, die dabei über signifikant positive Leistungszuwächse berichteten (sowie deren Übertrag in einen Prozentwert).

Arbeitsgedächtnis	Inhibition	Kognitive Flexibilität
3/6 (50%)	5/8 (63%)	1/2 (-)

Die drei Kern-EFs separat zu betrachten, ist aufgrund der unterschiedlichen und teilweise geringen Datenmenge schwierig. In der Altersspanne der 5- bis 18-Jährigen sprechen Vazou und Kollegen (2016) von wiederholt nachgewiesenen Effekten von motorischen Interventionen auf die Arbeitsgedächtnis- und Inhibitionsleistung. Dabei wurden jedoch alle möglichen Formen motorischen Trainings mit einbezogen. Dieselbe Aussage für die hier aufgeführten Studien zu treffen scheint unangemessen, auch wenn die Tendenz ähnlich scheint. Die Autoren um de Greeff (2017) schrieben den fünf Studien mit kognitiv-koordinativen Trainingsprogrammen, die sie in ihr Review aufnahmen, eine Effektstärke im mittleren Ausmaß zu (Hedges'g: 0.53), was sich mit den Ergebnissen der elf Studien, die in dieser Arbeit betrachtet wurden, deckt. Die Autoren fassen dabei verschiedene kognitive und exekutive Teilaspekte zusammen. Die in Tabelle 3 angegebenen Effektstärken beziehen sich zudem auf das Eta-Quadrat (η^2), welchem ein positiver Bias nachgesagt wird (Okada, 2013).

Die Darstellung der bisherigen Forschungslage in der vorliegenden Arbeit bestätigt und ergänzt die Schlussfolgerung anderer Überblicksartikel, die eine heterogene Befundlage aufgezeigt haben (de Greeff et al., 2017; Diamond & Ling, 2016; Vazou et al., 2016). Die sehr differenten und teilweise gegensätzlichen Ergebnisse weisen abermals, wie schon die Querschnittsstudien, auf die Spezifität des Domänenzusammenspiels hin. Wiederum wird die Kernaussage aus der Betrachtung der bisherigen Datenlage von Querschnittsstudien deutlich: das Zusammenspiel zwischen Motorik und Kognition scheint durch eine Vielzahl von Moderatoren beeinflussbar zu sein (Pesce, 2012). Dass einer der Moderatoren die Charakteristik des Trainingsprogramms betrifft, scheint mittlerweile gesichert (u. a. Diamond & Lee, 2011; Pesce, 2012; Pesce & Ben-Soussan, 2016). Vazou und Kollegen (2016) betonten in ihrem Review zudem, dass die Heterogenität der untersuchten Studien auch durch die Charakteristik und das Alter der Probanden erklärbar sein könnte. Die Arbeit der genannten Autoren verglich zudem die Effektstärken unterschiedlicher motorischer Interventionsmaßnahmen auf kognitive Parameter in Bezug auf die gewählte Kontrollgruppe. Studien mit passiven Kontrollgruppen erreichten Effektstärken im mittleren bis großen Ausmaß. Untersuchungen, in denen die Kontrollgruppe aktiv war und z. B. traditionelle Schulsportstunden absolvierte, konnten dagegen lediglich kleine oder gar keine Effekte berichten.

Insgesamt wird deutlich, dass ein motorisches Fertigkeitstraining und wahrscheinlich Bewegung im Allgemeinen vielversprechende Ergebnisse im Hinblick auf die Förderung exekutiver Funktionen

erzielen können. Gerade die erwähnte Heterogenität kann aber auch auf eine Vielzahl unentdeckter Moderatoren hinweisen, die neben der motorischen Betätigung, Einfluss auf die kognitive Stimulierung nehmen (Vazou et al., 2016). Vazou und Kollegen (2016) diskutieren dahingehend den hypothetischen Einfluss der Gewissenhaftigkeit, mit der ein Training durchgeführt wird, die Fähigkeiten und das Engagement des Übungsleiters, aber auch die sozialen Interaktionen der Teilnehmer untereinander. Diamond (2012) beschreibt dazu passend einen Ansatz, in dem sie postuliert, dass EFs sowohl auf direktem als auch auf indirektem Weg gefördert werden könnten (Abbildung 2).

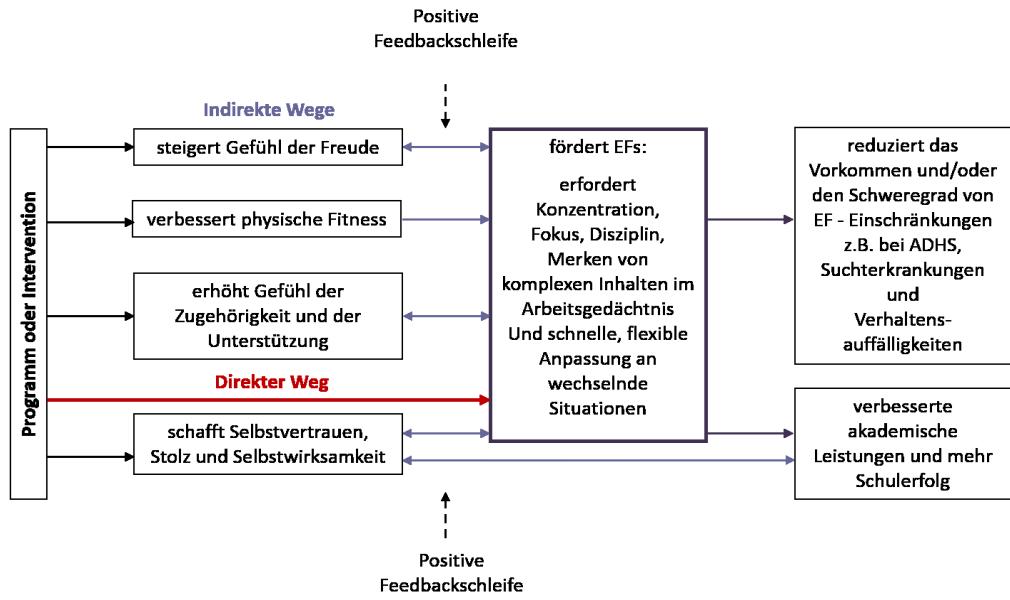


Abbildung 2: Mögliche Wege und damit potentielle Interventionsinhalte zur Förderung von EFs nach Diamond (2012) (übersetzt ins Deutsche).

Während der direkte Weg Übungen enthält, die exakt an den EFs ansetzen und demzufolge Konzentration (Inhibition), Arbeitsgedächtnis und flexibles Umschalten (kognitive Flexibilität) verlangen, fördert der indirekte Weg Gefühle von Freude, Zusammengehörigkeit, Stolz und Selbstwirksamkeit. Auch der Steigerung der physischen Fitness, wozu letztendlich auch die koordinativ anspruchsvollen Trainingsprogramme gehören könnten, spricht Diamond, über die indirekte Route, einen möglichen Effekt auf die kognitive Leistung zu. Der PFC ist einer der Bereiche im Gehirn, der bei der Ausführung von EF-Tests aktiv ist (u. a. Diamond, 2000) und gleichzeitig sensibel auf Stress und Traurigkeit reagiert (Arnsten, 1998; von Hecker & Meiser, 2005). Die indirekte Route bildet somit, laut Diamond, ebenso die Grundlage für die effiziente Ausbildung von EFs. Nicht überraschend ist die damit verbundene Forderung nach Förderprogrammen, die beide Routen bedienen (Diamond, 2012). Aufgrund der aufgezeigten Spezifität wird sich, die in dieser Arbeit geplante fertigkeitsorientierte motorische Intervention, an den Ergebnissen einer vorher stattfindenden Querschnittsanalyse orientieren. Zudem sollen möglichst viele Elemente aus der indirekten Route berücksichtigt werden, um eventuelle Moderatoren aus diesem Bereich abzudecken und das Programm so effektiv wie

möglich zu gestalten. Aus diesem Vorhaben leitet sich die vierte Hypothese der Arbeit ab, die an dieser Stelle noch recht unspezifisch ist:

4. **Kausalität:** *Ein mehrwöchiges und spezifisches Motoriktraining kann zur Verbesserung einer oder mehrerer spezifischer EFs führen (H4).*

Der Erfolg des motorischen Trainings setzt voraus, dass das Domänenzusammenspiel zwischen den exekutiven und motorischen Funktionen im Querschnitt besser verstanden wird. Dazu müssen die ersten drei Hypothesen (H1, H2, H3) verifiziert und der Einfluss möglicher Moderatoren beachtet werden. In den nächsten Kapiteln folgen dazu die drei Teil- bzw. Vorstudien, die zur Aufklärung der vier Hypothesen beitragen sollen. In der ersten Studie geht es vor allem, um die Beantwortung der ersten (H1: Spezifität) und zweiten (H2: Aufgabenschwierigkeit) Hypothese. Die zweite Teilstudie untersucht mit dem Einfluss des kalendarischen Alters bzw. des exekutiven und motorischen Fähigkeitslevels die dritte Hypothese (H3) und in der dritten Teilstudie sollen die Ergebnisse der ersten beiden Teilstudien schließlich dazu führen, die vierte Hypothese zu verifizieren oder abzulehnen (H4).

3 Spezifität und der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit (Studie 1)

Bisherige Querschnittsstudien zum Zusammenhang zwischen der motorischen und der exekutiven Domäne berichten heterogene Ergebnisse. Sowohl über die spezifischen Merkmale des Zusammenspiels als auch über dessen Stärke konnten bisher keine einheitlichen Aussagen getroffen werden (u. a. Livesey et al., 2006; Stöckel & Hughes, 2016; van der Fels et al., 2015). Die beschriebene Inkonsistenz der Datenlage in behavioristischen Untersuchungen weist u. a. auf nicht vollends verstandene Einflussfaktoren in den beiden Domänen hin (Haapala, 2013; van der Fels et al., 2015). Dies steht dem Erproben möglicher Interventionsformen kontraproduktiv gegenüber. Dass ein Teil der Studien ein enges Zusammenspiel zwischen kognitiven und motorischen Funktionen gezeigt hat, während ein anderer Teil nur geringe oder keine Zusammenhänge ausmachen konnte, könnte unter anderem daran liegen, dass der Link durch Aufgabenspezifität bedingt ist und zudem erst dann kenntlich wird, wenn die motorische Aufgabe ein gewisses Level an Komplexität, Schwierigkeit und Neuheit aufweist (Diamond, 2000; Livesey et al., 2006; Stöckel et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016). Ein aktuelles Review (van der Fels et al., 2015), das 21 Studien mit Kindern im Alter zwischen vier und sechzehn Jahren integrierte, berichtete über Zusammenhangsmaße zwischen motorischen und kognitiven Funktionen, welche die gesamte Bandbreite zwischen der Unabhängigkeit der beiden Domänen bis hin zu starken Wechselbeziehungen abdecken. Während motorische Aufgaben, die tendenziell der Grobmotorik zuzuordnen sind (z. B. Gleichgewicht, Gehen, Gewandtheit), eher schwach mit dem Abschneiden in kognitiven Aufgaben korrelierten, waren komplexere bzw. sensitivere Tests (z. B. Handgeschicklichkeit, präzises Zielen, Bewegungsplanung), teilweise stark mit spezifischen kognitiven Kontrollprozessen assoziiert. Die daraus geschlussfolgerete Aufgaben- oder Anforderungsspezifik des Zusammenspiels wird durch weitere Studienergebnisse gestützt. So korrelierten in vorangegangenen Arbeiten beispielsweise die Handgeschicklichkeitsleistungen mit den Tests zur Inhibition, Planung und Problemlösefähigkeit, aber nicht zum Arbeitsgedächtnis (Pangalinan et al., 2011; Rigoli et al., 2013). Die Fähigkeit zur motorischen Planung war hingegen mit den Ergebnissen in Arbeitsgedächtnistests assoziiert, nicht aber mit den Tests zur Erfassung der inhibitorischen Kontrolle (Logan & Fischman, 2015; Stöckel & Hughes, 2016; Weigelt et al., 2009). Zusätzlich bzw. ergänzend zur geschlussfolgerten Annahme der Spezifik weisen die Ergebnisse einer Anzahl an Studien auf den moderierenden Einfluss der Aufgabenschwierigkeit hin (Diamond, 2000, 2012; Espy et al., 2004; Poldrack et al., 2005). Während manche Situationen demnach eine automatisierte und gut gelernte Handlungsausführung erfordern, um zum Ziel zu kommen (z. B. auf gerader Strecke spazieren), verlangen motorische Aufgaben, welche die Konzentration auf ein bestimmtes Bewegungselement oder die ganze Sequenz voraussetzen (z. B. neue Aufgaben, die noch nicht gelernt wurden, Aufgaben in neuen oder anspruchsvollen Situationen oder schwierige/komplexe Aufgaben), die Hinzunahme kognitiver Kontrollprozesse (u. a. Diamond, 2000). Unterstützt werden diese Annahmen durch bildgebende Befunde, die zeigten, dass die Aktivierung des dorsolateralen

präfrontalen Kortexes (DLPFC) und das Ausführen von (ausschließlich) neuen und komplexen Bewegungsabfolgen positiv miteinander korrelieren, während automatisierte Handlungen und die Aktivierung des DLPFC negativ miteinander assoziiert sind (Chein & Schneider, 2005; Patel et al., 2013; Poldrack et al., 2005; Shadmehr & Holcomb, 1997). Interessanterweise sind also bei neuartigen und komplexen Bewegungen gerade die Bereiche im Gehirn aktiv (u. a. DLPFC und Neocerebellum), die sowohl für motorische als auch für exekutive Funktionen von Bedeutung sind (Diamond, 2000, 2013, Serrien et al., 2006, 2007). Verglichen mit Situationen, in denen exekutive Funktionen bzw. der DLPFC nicht erforderlich sind (z. B. einfache/automatisierte Aufgaben), weisen Bewegungen, die exekutive Kontrolle benötigen (z. B. hohes Anspruchsniveau/neu), eine hohe Ausführungsvariabilität (große Streuung in der Ausführung und im Ergebnis von Versuch zu Versuch) auf (Magill, 2001). Für die vorliegende Studie wurde deshalb angenommen, dass die Variabilität innerhalb der motorischen Aufgaben ein mitbestimmender Faktor im Motorik-Kognitions-Zusammenspiel ist und demnach determiniert, ob und zu welchem Anteil exekutive Kontrollprozesse bei der Ausführung einer motorischen Aufgabe involviert sind.

Um dieser Fragestellung nachzukommen wurde angestrebt, die spezifischen exekutiven Funktionen zu bestimmen, die mit der Leistung in zwei omnipräsenten, alltagsnahen motorischen Aufgaben (Gleichgewicht im Einbeinstand und Handgeschicklichkeit) assoziiert sind. Dazu wurden insgesamt 48 junge und gesunde Erwachsene gebeten, neben den zwei motorischen Aufgaben eine umfangreiche Testbatterie an exekutiven Funktionen, wie nach Diamond (2013) beschrieben (Arbeitsgedächtnis, inhibitorische Kontrolle, kognitive Flexibilität und Planung), zu durchlaufen. Während die meisten der vorangegangenen Studien in diesem Bereich ihren Fokus auf klinische Populationen, frühes Kindes- oder spätes Erwachsenenalter legten, wurde sich in der vorliegenden Studie für gesunde, junge Erwachsene entschieden, um zu prüfen, ob motorische und kognitive Funktionen generell miteinander assoziiert sind und dieses Zusammenspiel nicht lediglich ein Phänomen besonderer Untersuchungsgruppen widerspiegelt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Leistungsvariabilität (als Indikator für die Aufgabenkomplexität, -neuheit, -schwierigkeit) auf den Motorik-Kognitions-Link untersucht. Umgesetzt wurde dieses Vorhaben durch die Manipulation der Schwierigkeit in der Gleichgewichtsaufgabe des Einbeinstandes, da hier bereits in einer vorangegangenen Studie (Muehlbauer et al., 2014) Stufen festgelegt und validiert werden konnten und einzelne Schwierigkeitsstufen relativ leicht anpassbar waren (durch die Hinzunahme eines Balance-Pads oder der Durchführung mit geschlossenen Augen). Auf Grundlage der bestehenden Literatur wurde angenommen, dass die Leistungen in der Handgeschicklichkeit (Feinmotorik) positiv mit denen in der inhibitorischen Kontrolle korrelieren (Livesey et al., 2006; Rigoli et al., 2013). Bisherige Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der statischen posturalen Kontrolle bzw. Gleichgewichtsfähigkeit (Grobmotorik) und exekutiven Funktionen sind uneinheitlich, weshalb eine weitere Differenzierung spezifischer Annahmen hier nicht gerechtfertigt erscheint (Livesey et al.,

2006; Rigoli et al., 2013; Spedden et al., 2017). Begründet auf der Vorstellung, dass exekutive Funktionen vor allem dann involviert sind, wenn eine Aufgabe neu oder komplex ist (Diamond, 2000, 2012; Espy et al., 2004; Poldrack et al., 2005), wurde weiterhin angenommen, dass das Zusammenspiel zwischen motorischen und exekutiven Funktionen durch die Ausführungsvariabilität in der motorischen Aufgabe moderiert wird. Folglich wurde erwartet, dass der Einfluss exekutiver Kontrollprozesse auf die statische posturale Kontrolle bei Probanden mit geringer Performancevariabilität eher schwächer ausgeprägt und bei Probanden mit hoher Performancevariabilität eher stärker ausgeprägt ist. Die vorliegende Studie soll folglich zur Aufklärung zweier Hypothesen verhelfen, die im Folgenden spezifiziert formuliert werden:

1. **Spezifität:** (Auch) Im jungen Erwachsenenalter sind spezifische motorische Aufgaben mit spezifischen exekutiven Aufgaben assoziiert. Einen globalen Zusammenhang zwischen den Domänen gibt es nicht (H1).
2. **Aufgabenschwierigkeit:** Motorische Aufgaben mit höherer Schwierigkeit und ausreichender Sensitivität und Komplexität sind stärker mit EFs assoziiert als Aufgaben mit geringerer Schwierigkeit und Komplexität. Dabei stellt die Performancevariabilität ein geeignetes Maß zur Abbildung der individuellen Aufgabenschwierigkeit dar (H2).

Die Klärung dieser Hypothesen ist insofern auch für Vorschulkinder relevant, als dass Variabilitätsmaße, auch für dieses Alter zur Anwendung kommen könnten, um die individuelle Aufgabenschwierigkeit abzubilden. Im Moment liegen nach Kenntnis der Autorin, keine motorischen Tests vor, die die individuelle Aufgabenschwierigkeit (durch Variabilitätsmaße) im Vorschulalter berücksichtigen könnten. Gerade im jungen Kindesalter, konnte stetig ein Domänenzusammenhang ermittelt werden (vgl. Kapitel 2.3). Sollten Spezifität und Aufgabenschwierigkeit sich als zwei zu beachtende Einflussgrößen im jungen Erwachsenenalter herausstellen, ist anzunehmen, dass das Gleiche für das Vorschulalter zutrifft.

3.1 Material und Methoden

3.1.1 Probanden

Für die Studie wurden 48 junge Erwachsene (Altersspanne: 18-35 Jahre; mittleres Alter: $23,3 \pm 4,3$ Jahre; 32 Männer) rekrutiert. In einem Fragebogen zur Erfassung möglicher Einflussfaktoren gaben die Probanden an, durchschnittlich 6,7 ($\pm 3,5$) Stunden wöchentlich an sportlichen Aktivitäten zu partizipieren, circa 5,0 ($\pm 2,7$) Stunden elektronische Medien wie Computer, Laptop, Smartphone oder Tablets zu nutzen und 1,0 ($\pm 1,2$) Stunde/n des Tages für Videospiele aufzubringen. Testpersonen mit bekannten psychischen und/oder neurologischen Vorerkrankungen wurden von der Studie ausgeschlossen. Vor der Teilnahme unterschrieben alle Teilnehmer eine Einverständniserklärung.

3.1.2 Ablauf und Testauswahl der Untersuchung

Alle Probanden führten eine umfangreiche Batterie verschiedenster etablierter und standardisierter motorischer und kognitiver Tests durch. Zur Erfassung der kognitiven Parameter wurden die exekutiven Funktionen Arbeitsgedächtnis, inhibitorische Kontrolle und kognitive Flexibilität sowie Planungs- und Problemlösefähigkeit erhoben. Um auf etwaige Unterschiede in der Verarbeitungsgeschwindigkeit zu kontrollieren, die die Reaktionszeiten in den kognitiven Tests beeinflussen könnten, wurde zusätzlich ein Test zur Erfassung der einfachen Reaktionsgeschwindigkeit genutzt. Als motorische Kompetenzbereiche wurden die statische posturale Kontrolle im Einbeinstand und die Handgeschicklichkeit erhoben. Der zeitliche Umfang der Messungen betrug in etwa zwei Stunden. Dabei durchliefen alle Probanden einzeln und nacheinander vier Räume, die mit dem entsprechenden Testzubehör ausgestattet waren: (1) eine Kraftmessplatte zur Erfassung der statischen posturalen Kontrolle im Einbeinstand (GKS 1000, IMM, Mittweida, Deutschland); (2) das *Purdue Pegboard* zur Einschätzung der Handgeschicklichkeit (#32020, Lafayette Instruments, IN, USA); (3) computergestützte Tests auf einem 23" *Touchscreen* (Philips 231C5TJKFU/00) zur Erhebung von Verarbeitungsgeschwindigkeit und inhibitorischer Kontrolle (Presentation®, Neurobehavioral Systems Inc., Berkeley, USA); (4) computergestützte Tests zur Erfassung von Arbeitsgedächtnis, kognitiver Flexibilität und Planungs- und Problemlösefähigkeit (Psychology Experiment Building Language, PEBL). Die Reihenfolge, in der die Tests in den vier Räumen absolviert werden mussten, wurde blockrandomisiert, sodass jeweils vier Teilnehmer parallel die Tests absolvierten.

Tests zur Erfassung der motorischen Funktionen

Statische posturale Kontrolle. In Anlehnung an vorangegangene und bewährte Studienprotokolle (Berg & Norman, 1996; Kapteyn et al., 1983; Muehlbauer et al., 2014; Springer et al., 2007) wurde der Untersuchungsablauf für die Messung des statischen Gleichgewichts festgelegt (u. a. in Bezug auf Erwärmungsart und -dauer, Kniebeugungswinkel sowie Art und Anzahl der Test- und Familiarisierungsdurchgänge). Der Test, in dem die Probanden jeweils so ruhig wie möglich auf einem Bein stehen sollten, wurde in drei verschiedenen Bedingungen durchgeführt: (1) Augen offen auf festem Untergrund (Bedingung AuO), (2) Augen offen auf einem Balance-Pad (Airex, Aalen-Ebnat, Deutschland) (Bedingung PAD) und (3) Augen geschlossen auf festem Untergrund (Bedingung AuZ). Es wurde angenommen, dass die Bedingungen auf dem Balance-Pad und mit geschlossenen Augen zunehmend schwieriger sind, als die Bedingung mit geöffneten Augen und auf festem Untergrund stehend. Gestützt wird diese Annahme durch Befunde, die zeigen, dass sowohl die Veränderung sensorischen Inputs (vgl. Bedingung PAD) als auch die Eliminierung visueller Kontrolle (vgl. Bedingung AuZ) zur erhöhten Beanspruchung von Aufmerksamkeitsprozessen führen (Hytönen et al., 1993; Muehlbauer et al., 2012, 2014). Dementsprechend ist die kortikale Aktivierung in parietalen und zentralen Hirnarealen erhöht (Tse et al., 2013). Zudem konnten Hytönen und Kollegen (1993)

nachweisen, dass über viele Altersgruppen hinweg vor allem das visuelle System als Feedbacklieferant in der posturalen Kontrolle dient. Nach je drei Familarisierungsdurchgängen pro Bedingung wurden drei protokollierte Testdurchgänge á 30 Sekunden durchgeführt. Demzufolge führte jeder Teilnehmende insgesamt 18 Mal einen Einbeinstand mit dem dominanten Bein durch. Das dominante Bein wurde dabei mit der deutschen Version des *Lateral Preference Inventory*-Fragebogens ermittelt (Büsch et al., 2009; Coren, 1993). Die Reihenfolge der drei verschiedenen Konditionen folgte wiederum einer Blockrandomisierung, um auf Ermüdungseffekte und/oder Lerneffekte innerhalb der Testdauer zu kontrollieren.

Mit Hilfe einer Kraftmessplatte (GKS 1000, IMM, Mittweida, Deutschland) wurden Verlagerungen des Druckmittelpunkts (*center of pressure*; CoP) in die Richtungen medio-lateral (ML) und anterior-posterior (AP) mit einer Abtastrate von 40 Hz aufgezeichnet. Als abhängige Variablen zur Erfassung der Gleichgewichtsfähigkeit dienten dabei (1) die durchschnittliche Schwankung in Millimetern (mittlere Schwankung in mm), gemittelt für die drei Durchgänge in der jeweiligen Bedingung und über beide Richtungen (ML und AP) und (2) die Performancevariabilität (PV), die sich durch die Standardabweichung innerhalb eines Versuchs, gemittelt über alle Versuche einer Bedingung, ergab.

Handgeschicklichkeit. Die Handgeschicklichkeit wurde mittels *Purdue Pegboard Test* (#32020, Lafayette Instruments, IN, USA) erhoben. Bei diesem Test müssen die Probanden ein Steckbrett mit zwei vertikalen Reihen mit je 25 Löchern in einer vorgegebenen Zeit so schnell wie möglich mit Stäbchen, Scheiben und Manschetten füllen (Tiffin & Asher, 1948). Zur Erfassung der groben Handgeschicklichkeit wurden die Versuchspersonen angewiesen in jeweils drei Versuchen á 30 Sekunden so viele Stäbchen wie möglich, zunächst mit der dominanten Hand, dann mit der nicht-dominanten Hand und schließlich mit beiden Händen parallel in die Löcher zu stecken. Versuche innerhalb einer Bedingung (dominant, nicht-dominant, beide) wurden zu einem Mittelwert zusammengefasst und die Summe der drei Mittelwerte schließlich als abhängige Variable für die grobe Handgeschicklichkeit (HG grob) definiert. Zur Bestimmung der feinen Handgeschicklichkeit wurden die Probanden dazu instruiert in drei Versuchen á 60 Sekunden so viele Türmchen (bestehend aus einem Stäbchen, einer Scheibe, einer Manschette und einer zweiten Scheibe) wie möglich zu bauen. Dabei mussten beide Hände simultan genutzt werden. Der Mittelwert aller verbauten Teile (sowohl der kompletten als auch der inkompletten Türmchen) über die drei Versuche hinweg bildete schließlich die abhängige Variable für die feine Handgeschicklichkeit (HG fein).

Test zur Erfassung der EFs und der einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit

Bei der Auswahl der EF-Tests wurde sich am Modell von Diamond (2013) orientiert. Folglich wurde eine Reihe etablierter Tests genutzt, die sowohl die exekutiven Kernfunktionen als auch die darauf aufbauenden Komponenten der höheren EFs beanspruchten. Die Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis, der kognitiven Flexibilität und der Planungs- und Problemlösefähigkeit wurden mittels PEBL Software

v0.14 (Mueller & Piper, 2014; Piper et al., 2012) durchgeführt. Für die Tests zur einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit und der Inhibition wurde die *Presentations®* Software genutzt. Da letztere Tests mittels *Touchscreen* durchgeführt wurden, wurde zusätzlich eine Griffstange von 40 cm Länge konstruiert. An dieser behielten die Probanden während der Testung ihre Hände, sodass für alle Versuchspersonen die gleiche Distanz der Zeigefinger zu den Bildschirmtasten gegeben war.

Arbeitsgedächtnis: Der *Corsi Block-Tapping* Test (CBT; Corsi, 1972; Kessels, van Zandvoort, Postma, Kappelle, & de Haan, 2000) wurde als Instrument für das visuell räumliche Arbeitsgedächtnis genutzt (Baddeley, 2003). Nach einer schriftlichen Testinstruktion und drei Probedurchgängen erschienen auf dem Bildschirm neun blaue Quadrate auf schwarzem Untergrund. Diese blauen Quadrate leuchteten dann im Verlauf des Tests in einer vorgegebenen Sequenz gelb auf, wobei der Proband dazu angehalten wurde, sich die Reihenfolge zu merken und diese durch das Anklicken mittels Computermaus zu reproduzieren. Der Test startete mit einer Sequenzlänge von zwei Blöcken, die es sich zu merken galt. Nach erfolgreicher Reproduktion von mindestens einem von zwei Durchgängen pro Sequenzlänge erhöhte sich die Anzahl der aufleuchtenden Blöcke um eins. Die maximale Anzahl möglicher aufleuchtender Blöcke betrug dabei neun. Konnten beide Durchgänge einer Sequenzlänge nicht korrekt wiedergegeben werden, wurde der Test automatisch beendet. Als abhängige Variable diente die maximale erinnerte Sequenzlänge, die mindestens mit einem richtigen Versuch absolviert werden konnte (CBT_{Gspanne}).

Inhibitorische Kontrolle/Selbstregulation: Der Teilaspekt der inhibitorischen Kontrolle, die Selbstregulation, wurde mittels des *Hearts & Flowers* Tests (Diamond et al., 2007; Wright & Diamond, 2014) erhoben. Dazu saß der Proband, mit den Händen an der Griffstange, vor dem *Touchscreen*. Im ersten Testblock (kongruente Bedingung) wurden ausschließlich Herzen präsentiert, die entweder auf der rechten oder der linken Bildschirmseite erschienen. Die Aufgabe bestand darin, so schnell wie möglich die Taste zu drücken, die sich auf derselben Seite befindet wie das Herz. Im zweiten Block (inkongruente Bedingung) wurden Blumen präsentiert. Hier bestand die Aufgabe darin, die Taste zu drücken, die sich auf der gegenüberliegenden Seite der Blume befindet. Der Test erfasst die Fähigkeit zur Inhibition auf Verhaltensebene, da sowohl die vorherige Regel aus Block eins als auch die (präpotente) Tendenz die Taste auf der Seite des Stimulus zu drücken (*Simon Effekt*; Simon & Rudell, 1967), inhibiert werden müssen. In Block drei (mix Bedingung) wurden schließlich abwechselnd Blumen und Herzen präsentiert und der Proband war aufgefordert, sich zwischen dem Drücken auf derselben Seite (Herz) und dem Drücken auf der gegenüberliegenden Seite (Blume) des Stimulus zu entscheiden. Für alle Durchgänge wurden sowohl die Reaktionszeiten als auch die Genauigkeitsmaße ermittelt, wobei Durchgänge, die unter 250 ms beantwortet wurden oder zwei Standardabweichungen über dem individuellen Mittelwert lagen, in der Datenauswertung unberücksichtigt blieben (Wright & Diamond, 2014). Die mittlere Reaktionszeit aus dem dritten Block (schwierigste Bedingung), kontrolliert für die Reaktionszeit aus dem ersten Block (als Indikator für die

aufgabenspezifische Verarbeitungsgeschwindigkeit) und dem Genauigkeitsmaß (Anteil korrekter Reaktionen) aus dem dritten Block (Salthouse, 2010), diente als abhängige Variable für die Inhibition/Selbstregulation ($H\text{-}Rt_{\text{korrekt}}$).

Inhibitorische Kontrolle/selektive Aufmerksamkeit: Der Teilaspekt der inhibitorischen Kontrolle, die selektive Aufmerksamkeit, wurde mit einem *Flanker Test* mit Fischen als Stimuli (Zaitchik et al., 2014) ermittelt. Dieser Test wurde wiederum mittels *Touchscreen* und Griffstange durchgeführt und bestand aus drei Blöcken. Im ersten Block erschienen fünf blaue Fische auf dem Bildschirm. Der Proband wurde aufgefordert, so schnell wie möglich auf die Pfeiltaste zu drücken, die der Blickrichtung des mittleren Fisches entsprach. Die Blickrichtung der äußeren Fische musste dabei unterdrückt werden (klassische Bedingung). Im zweiten Block erschienen pinke Fische. Hier wurde, entsprechend der Blickrichtung der äußeren Fische, so schnell wie möglich mit der rechten oder linken Pfeiltaste geantwortet (umgekehrte Bedingung). Die Blickrichtung des mittleren Fisches musste folglich unterdrückt werden. Im dritten und letzten Block erschienen pinke und blaue Fische in einer randomisierten Reihenfolge und die Versuchspersonen reagierten schnellstmöglich auf die Blickrichtung des mittleren Fisches (wenn die Fische blau sind) oder auf die Blickrichtung der äußeren Fische (wenn die Fische pink sind) (mix-Bedingung). Jede der drei Bedingungen beinhaltete dabei kongruente Durchgänge (alle Fische gucken in die gleiche Richtung), inkongruente Durchgänge (Ziel- und Ablenkfische gucken in unterschiedliche Richtungen) und zwei Arten von neutralen Durchgängen (Ablenkfische gucken in eine irrelevante Richtung nach oben oder unten oder es gibt gänzlich keine Ablenkfische). Wiederum wurden für alle Durchgänge Reaktionszeiten und Genauigkeitsmaße erhoben und Versuche mit einer Antwortzeit von unter 250 ms oder zwei Standardabweichungen über dem individuellen Mittelwert exkludiert (Wright & Diamond, 2014). Als abhängige Variable diente letztendlich die mittlere Reaktionszeit aus der mix-Bedingung, die sowohl für die mittlere Reaktionszeit der kongruenten Versuche (als Indikator für die aufgabenspezifische Verarbeitungsgeschwindigkeit) als auch das Genauigkeitsmaß aus der mix-Bedingung (Salthouse, 2010) kontrolliert wurde ($F\text{-}Rt_{\text{korrekt}}$).

Kognitive Flexibilität/set shifting: Der *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST) (Grant & Berg, 1948) wurde genutzt, um die kognitive Flexibilität, genauer das *set Shifting* (Gläscher et al., 2012) der Probanden zu ermitteln. In diesem Test sollten 128 Karten korrekt auf je einen von vier Stapeln sortiert werden. Die drei möglichen Sortierregeln dabei waren Farbe, Form oder Anzahl. Über die aktuelle Sortierregel wurden die Teilnehmer nicht informiert, jedoch erhielten sie nach jedem Zug ein visuelles Feedback („richtig“ oder „falsch“). Nach zehn aufeinanderfolgenden korrekt sortierten Karten änderte sich die Sortierregel (z. B. von Farbe auf Form) und die Versuchsperson war gefordert diese schnellstmöglich herauszufinden, also nicht in der alten Regel zu verharren. Der Prozentsatz an Fehlern, in denen der Proband fälschlicherweise in der vorangegangenen Regel verharrete, diente als abhängige Variable für die *set shifting* Fähigkeit ($WCST_{\text{Fehler}}$).

Kognitive Flexibilität/response shifting: Zur Erfassung der kognitiven Flexibilität, genauer der *response shifting* Fähigkeiten (Gläscher et al., 2012; Sánchez-Cubillo et al., 2009), wurde der *Trail Making Test* (Bowie & Harvey, 2006; Reitan & Wolfson, 1995) genutzt. In diesem „Papier und Stift“-Test wurde dem Probanden im ersten Teil (A) ein A4 Blatt vorgelegt, bei dem es darum ging 25 Zahlen in aufsteigender Reihenfolge so schnell wie möglich mit dem Stift zu verbinden. Das vorgelegte Blatt im zweiten Teil (B) beinhaltete neben Zahlen auch Buchstaben. Hier sollten im Wechsel Zahlen (in aufsteigender Reihenfolge) und Buchstaben (in alphabetischer Reihenfolge) miteinander verbunden werden (z. B. 1-A-2-B-3-C etc.). Testinstruktionen und Reaktionen des Testleiters auf mögliche Fehler des Probanden orientierten sich an den Testanweisungen von Bowie und Harvey (2006). Als abhängige Variable diente die, mit einer Stoppuhr gemessene, Gesamtzeit, die zur Ausführung von Teil B benötigt wurde, kontrolliert für die Ausführungszeit von Teil A (als Indikator für die aufgabenspezifische Verarbeitungsgeschwindigkeit) (TMT-B_A).

Planungs- und Problemlösefähigkeiten: Der *Tower of London Test* (TOL; Anderson, Anderson, & Lajoie, 1996; Shallice, 1982) wurde als Indikator für die Planungs- und Problemlösefähigkeiten der Versuchspersonen herangezogen. Dies sind Fähigkeiten, die den höheren exekutiven Funktionen zuzusprechen sind (Diamond, 2013). In diesem Test erschienen auf dem Bildschirm drei Stäbe mit drei verschiedenen farbigen Scheiben. Der Proband wurde dazu angehalten, in so wenigen Schritten wie möglich, die Scheiben entsprechend der Zielkonfiguration (abgebildet im linken oberen Rand des Bildschirms) umzubauen. Dabei konnte immer nur eine Scheibe pro Zug bewegt und lediglich die oberste Scheibe auf einem Stapel mit mehreren Scheiben bewegt werden. Weiterhin war die Höhe der Stapel mit je einer, zwei oder drei möglichen Scheiben festgelegt. Insgesamt gab es zwölf Probleme (Shallice, 1982), die es zu lösen galt. Als abhängige Variable diente die mittlere Planungszeit in Sek., die bis zum ersten Zug innerhalb eines jeden Problems verstrich. Da die Effektivität der Planung jedoch nicht nur von der Schnelligkeit abhängig ist, wurde die mittlere Planungszeit zudem für den Prozentsatz erfolgreicher Lösungen kontrolliert (TOL_{t,korrekt}).

Einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit: Als Maß für die einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit eines Probanden wurde ein Test gewählt, bei welchem auf das Erscheinen eines festen Stimulus (roter Dinosaurier) (Kiselev et al., 2009) so schnell wie möglich mit dem Klicken der linken Maustaste reagiert werden musste. Insgesamt wurden 32 Stimuli präsentiert. Die Zeit, nach der der Stimulus nach einem schwarzen Fixationskreuz erschien, variierte zwischen 500 und 2500 ms. Die mittlere Reaktionszeit über alle 32 Versuche hinweg diente als abhängige Variable (E-VG).

3.1.3 Datenanalyse

Im ersten Schritt der Datenanalyse wurden zur Ermittlung aufgabenspezifischer Zusammenhänge zwischen exekutiven und motorischen Funktionen separate multiple Regressionen für die Handgeschicklichkeit (Mittelwert über beide Bedingungen HG_{fein} und HG_{groß} hinweg) und das statische

Gleichgewicht (mittlere Schwankung über die drei Bedingungen AuO, AuZ und PAD hinweg) gerechnet. Als mögliche Prädiktoren der beiden motorischen Komponenten wurden die folgenden Maße (kognitive Komponenten) z-standardisiert und in die Regressionsgleichung eingegeben: einfache VG, Gedächtnisspanne im *Corsi Block Tapping* Test, Reaktionszeit in der Mix Bedingung des *Hearts and Flowers* Tests [kontrolliert für das Genauigkeitsmaß und die Reaktionszeit in der kongruenten Bedingung], Reaktionszeit in der Mix Kondition des *Flanker* Tests [kontrolliert für das Genauigkeitsmaß und die Reaktionszeit der kongruenten Versuche innerhalb der Mix Bedingung], Prozentsatz der Perseverationsfehler im *Wisconsin Card Sorting* Test, Bearbeitungszeit von Teil B des *Trail Making* Tests [kontrolliert für die Bearbeitungszeit von Teil A] und die Planungszeit bis zum ersten Zug im *Tower of London* Test [kontrolliert für den Prozentsatz korrekter Durchgänge].

Im zweiten Schritt der Datenanalyse wurden für die EFs, die sich im ersten Schritt als Prädiktoren für das statische Gleichgewicht (mittlere Schwankung über die drei Bedingungen AuO, AuZ und Pad hinweg) identifizieren ließen, separate Mediationsanalysen durchgeführt. Dies hatte zum Ziel, die Rolle der Performancevariabilität (mittlere Standardabweichung innerhalb eines Versuchs als Indikator für die Aufgabenschwierigkeit) im Zusammenspiel zwischen Motorik und Kognition besser zu verstehen. In die Mediation gingen dementsprechend drei Werte ein: (1) die mittlere Schwankung in mm als abhängige Variable, (2) die in Schritt eins ermittelten EFs, welche signifikante Prädiktoren für das Gleichgewicht darstellten als unabhängige Variablen und (3) die mittlere Ausführungs- oder Performancevariabilität (PV gemittelt über alle drei Bedingungen AuO, PAD und AuZ) als potentieller Mediator. Der Sobel Z Test und ein Bias-korrigiertes 95% Konfidenzintervall (95% CI; bootstrapping, $m = 5000$) wurden genutzt, um den indirekten Einfluss exekutiver Funktionen, mediert durch die Aufgabenschwierigkeit, auf motorische Funktionen zu überprüfen. Die Analysen wurden mit Hilfe des Hayes' PROCESS Makros für SPSS durchgeführt.

Im dritten und letzten Schritt der Datenanalyse wurden direkte und indirekte Effekte für jede der drei Bedingungen einzeln (AuO, PAD und AuZ) berechnet. Damit sollte beleuchtet werden, ob im Falle einer höheren PV (als Indikator für komplexere oder schwierigere Aufgaben) auch der Zusammenhang zwischen motorischen und exekutiven Funktionen ansteigt.

Zur Beachtung der Problematik multipler Signifikanztestungen (z. B. Gesamt-Irrtumswahrscheinlichkeit) wurde das Benjamini-Hochberg Verfahren (Benjamini & Hochberg, 1995) genutzt.

3.2 Ergebnisse

Mittelwerte, Standardabweichungen und gegebenenfalls die PV für alle erhobenen Daten können Tabelle 5 entnommen werden. In die statistischen Analysen gingen 48 Versuchspersonen ein. Eine Ausnahme bildete der Einbeinstand zur Erfassung der statischen posturalen Kontrolle. Hier gingen lediglich die Daten von 46 Probanden ein, da zwei Teilnehmer in keiner der drei Konditionen gültige Versuche erbringen konnten. Eine weitere Ausnahme war der *Flanker* Test mit 47 Probanden (ein

Datensatz war unvollständig). Zunächst wurden die abhängigen Variablen der motorischen und kognitiven Parameter auf Normalität und Sphärizität (Mauchly Test) sowie univariate und multivariate Ausreißer hin geprüft. Hier wurden keine schwerwiegenden Verstöße festgestellt. Da die Leistungen der weiblichen Versuchspersonen die Leistungen der männlichen Probanden in beiden motorischen Aufgaben (MW Handgeschicklichkeit: $MW_{weiblich} = 42,03 \pm 3,61$, $MW_{männlich} = 37,81 \pm 3,42$, $F(1,47) = 15,64$, $p < 0,001$; mittlere Schwankung beim Einbeinstand: $MW_{weiblich} = 8,97 \pm 1,07$ mm, $MW_{männlich} = 10,44 \pm 2,20$ mm, $F(1,45) = 6,28$, $p = 0,02$) übertrafen, wurde das Geschlecht als Kovariate in die Analysen einbezogen. Für die erfassten Parameter Alter, sportliche Aktivität, Nutzung elektronischer Medien, Nutzung von Spielekonsolen und einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit konnte dagegen kein systematischer Einfluss festgestellt werden (alle $|r| < 0,17$, alle $p > 0,24$).

Aufgabenspezifische Korrelationen zwischen exekutiven und motorischen Funktionen

Um diejenigen exekutiven Funktionen zu identifizieren, die einen möglichen Einfluss auf die Gleichgewichtsfähigkeit (mittlere Schwankung im Einbeinstand) und die Handgeschicklichkeit (mittlere Anzahl an Items im *Pegboard*) haben, wurden separate multiple Regressionen gerechnet. Zudem sollte so die Stärke möglicher Zusammenhänge unter der Berücksichtigung weiterer Ko-Faktoren ermittelt werden. Das Gesamtmodell exekutiver Funktionen trägt zu einem signifikanten Anteil zur Varianzaufklärung der statischen posturalen Kontrolle im Einbeinstand bei ($R^2 = 0,49$, $F(7,37) = 5,12$, $p < 0,001$). Dabei erklärten Inhibition/Selbstregulation ($H-Rt_{korrekt}$; $\beta = -0,625$, $t(44) = -3,99$, $p < 0,001$), kognitive Flexibilität/*response shifting* (TMT-B_A; $\beta = 0,302$, $t(44) = 2,42$, $p = 0,02$) und kognitive Flexibilität/*set shifting* (WCST_{Fehler}; $\beta = 0,254$, $t(44) = 1,93$, $p = 0,06$) mit 39,1 %, 9,1 % und 6,5 % die größten Anteile der Varianz in der Gleichgewichtsfähigkeit. Bei der Varianzaufklärung der Leistungen im Handgeschicklichkeitstest verfehlte das Gesamtmodell exekutiver Funktionen die Schwelle zur statistischen Signifikanz ($R^2 = 0,26$, $F(7,39) = 1,98$, $p = 0,08$). Dennoch zeigt die Analyse, dass die Tests zur kognitiven Flexibilität/*set shifting* (WCST_{Fehler}; $\beta = -0,419$, $t(46) = -2,72$, $p = 0,01$), zur Planungsfähigkeit (TOL_{t/korrekt}; $\beta = -0,370$, $t(46) = -2,32$, $p = 0,03$) und zum Arbeitsgedächtnis (CBT_{GSpanne}; $\beta = -0,366$, $t(46) = -2,10$, $p = 0,04$) bedeutsame Anteile der Varianz in der Handgeschicklichkeit aufklären können.

Die Rolle der Performancevariabilität (PV) im Zusammenspiel zwischen exekutiven Funktionen und der Gleichgewichtsfähigkeit

Mittelwerte, Standardabweichungen und PV für alle relevanten Variablen können Tabelle 5 entnommen werden. Über alle Konditionen im Einbeinstand hinweg lag die mittlere Schwankung bei 9,93 mm. Die Varianzanalyse zeigte einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Bedingung, $F(2,88) = 8,04$, $p = 0,001$, $\eta_p^2 = 0,15$. Einfache Posthoc-Vergleiche weisen auf signifikant geringere Schwankungen in der AuO Bedingung im Vergleich zur AuZ Bedingung ($\Delta MW = 5,26$ mm, $p = 0,01$) und

zur PAD Bedingung ($\Delta MW = 1,63$ mm, $p = 0,001$) hin, sowie in der PAD Bedingung im Vergleich zur AuZ Bedingung ($\Delta MW = 3,63$, $p < 0,001$).

Tabelle 5: Deskriptive Statistik (Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD)) für alle relevanten Variablen und die individuelle Performancevariabilität (PV) gemittelt über alle Probanden für die Aufgabe zur statischen posturalen Kontrolle/Gleichgewicht.

		MW	SD	PV
Motorische Funktionen	statische posturale Kontrolle, mittlere Schwankung (mm)	9,93	2,00	7,35
	Augen offen (AuO)	7,63	2,28	5,40
	auf dem Balancepad stehend (PAD)	9,26	1,86	6,66
	Augen geschlossen (AuZ)	12,89	4,43	9,98
	Handgeschicklichkeit (HG), Purdue Pegboard (Anzahl Items)	39,22	3,99	
	HG grob	40,69	3,90	
	HG fein	37,74	5,01	
Exekutive Funktionen	Einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit, E-VG (ms)	255,11	23,58	
	Arbeitsgedächtnis, Corsi Block (Gspanne)	5,45	0,65	
	Inhibition/Selbstregulation, Hearts & Flowers			
	kongruente Kondition, Rt (ms)	321,07	45,00	
	Mix Kondition, Rt (ms)	548,26	77,30	
	Mix Kondition, Genauigkeit (%)	86,10	5,30	
	Inhibition/selektive Aufmerksamkeit, Flanker			
	Klassische Kondition, Rt (ms)	695,29	121,16	
	Mix Kondition, Rt (ms)	708,78	97,45	
	Mix Kondition, Genauigkeit (%)	88,74	4,38	
	<i>set shifting</i> – Fähigkeiten, Wisconsin Card Sorting, WCST _{Fehler} (%)	11,74	4,67	
	<i>response shifting</i> – Fähigkeiten, Trail Making Test			
	TMT-A (sek.)	16,66	5,17	
	TMT-B (sek.)	39,10	13,05	
	Planungs- und Problemlösefähigkeit, Tower of London			
	Planungszeit bis zum ersten Zug (Sek.)	15,41	7,48	
	Anteil korrekter Durchgänge (%)	75,17	14,94	

Der Haupteffekt für den Faktor Bedingung konnte ebenfalls für die Performancevariabilität PV (SD der mittleren Schwankung) festgestellt werden, $F(2,88) = 6,59$, $p = 0,002$, $\eta_p^2 = 0,13$. Post-hoc Analysen wiesen auf geringere PV Werte in der AuO Kondition im Vergleich zur PAD Kondition ($\Delta MW = 1,26$ mm, $p = 0,001$) und zur AuZ Kondition ($\Delta MW = 4,58$ mm, $p = 0,001$) und in der PAD Kondition im Vergleich zur AuZ Kondition ($\Delta MW = 3,32$ mm, $p = 0,001$) hin. Diese Ergebnisse bezüglich der Variabilität in der mittleren Schwankung deuten darauf hin, dass ein Gleichgewichtstest mittels Einbeinstand als sehr sensitiv in Bezug auf Veränderungen im Schwierigkeitsgrad (oder Komplexität) betrachtet werden kann.

Die Ergebnisse der Mediationsanalyse können Abbildung 3 entnommen werden. Der Sobel Z Test führte zu signifikanten indirekten Effekten von Inhibition/Selbstregulation (indirekter Effekt $\beta = -0,37$; $Z = -3,01$, $p = 0,003$; Abbildung 3A) und kognitiver Flexibilität/*set shifting* (indirekter Effekt $\beta = 0,50$; $Z = 4,13$, $p < 0,001$; Abbildung 3B) auf die Gleichgewichtsfähigkeit, mediert durch die Performancevariabilität. Diese Ergebnisse konnten durch das *bootstrapping* Verfahren (basierend auf einer Stichprobengröße $n = 5000$) für beide Parameter, Inhibition/Selbstregulation (95% CI: $-0,66$, $-0,07$) und kognitive Flexibilität/*set shifting* (95% CI: $0,05$, $0,85$), bestätigt werden. Die Ergebnisse für Inhibition/Selbstregulation waren dabei uneindeutig: während das *bootstrapping* Verfahren (basierend auf einer Stichprobengröße $n = 5000$) einen indirekten Effekt von Inhibition/Selbstregulation auf die Gleichgewichtskontrolle hervorbrachte, der durch die PV mediert wurde (95% CI: $0,01$, $0,45$), konnte dieses Ergebnis durch den Sobel Z Test nicht bestätigt werden (indirekter Effekt $\beta = 0,22$, $Z = 1,62$, $p = 0,11$). Zusammengefasst deuten die Ergebnisse jedoch darauf hin, dass das Zusammenspiel zwischen exekutiven und motorischen Funktionen (hier Gleichgewichtskontrolle im Einbeinstand) zumindest zu großen Teilen durch die individuelle Performancevariabilität eines Probanden in der motorischen Aufgabe mediert wird.

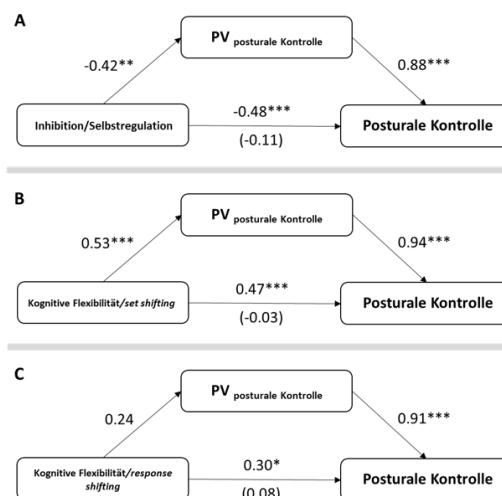


Abbildung 3: Standardisierte Regressionskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen spezifischen EFs (A) Inhibition/Selbstregulation, (B) Kognitive Flexibilität/*set shifting*, (C) Kognitive Flexibilität/*response shifting* und der Gleichgewichtsfähigkeit unter dem Einfluss der Performancevariabilität als mediierenden Faktor. Dargestellt sind die standardisierten Regressionskoeffizienten mit den adjustierten Benjamini-Hochberg p-Werten, $^{***}p < .001$, $^{**}p < .01$, $^*p < .05$, $^{\$}p < .10$, $N = 46$.

Wird jede Kondition separat betrachtet, so ergibt sich ein signifikanter indirekter Einfluss auf die Gleichgewichtsfähigkeit in der AuZ Kondition durch Inhibition/Selbstregulation ($\beta = -0,36$, $Z = -2,92$, $p = 0,04$) und kognitive Flexibilität/*set shifting* ($\beta = 0,53$, $Z = 4,47$, $p < 0,001$), in der AuO Kondition lediglich durch kognitive Flexibilität/*response shifting* ($\beta = 0,35$, $Z = -2,68$, $p = 0,007$). In der Kondition Pad hatte dagegen keiner der drei kognitiven Kontrollprozesse einen indirekten Effekt auf die Gleichgewichtsaufgabe. Dieses Ergebnis stützt die Resultate der Mediationsanalyse über alle drei

Bedingungen hinweg und deutet darauf hin, dass das Zusammenspiel zwischen der statischen posturalen Kontrolle und der kognitiven Flexibilität/*response shifting* nicht durch die Performance-variabilität (Aufgabenschwierigkeit) mediert wird.

Werden die Effekte in Summe betrachtet, d. h. direkte und indirekte Effekte von exekutiven Funktionen auf die Gleichgewichtsfähigkeit (Tabelle 6), so wird deutlich, dass die stärksten Zusammenhänge in der schwierigsten der drei Bedingungen, AuZ, auftreten und zwar für Inhibition/Selbstregulation (totaler Effekt $\beta = -0,48$, $p < 0,001$) und kognitiver Flexibilität/*set shifting* (totaler Effekt $\beta = 0,52$, $p < 0,001$).

Tabelle 6: Direkte Effekte (d. h. Effekt der EF auf Gleichgewichtsfähigkeit) und indirekte Effekte (d. h. Effekt der EF auf Gleichgewichtsfähigkeit indirekt erklärt durch den Mediator Performancevariabilität) zwischen der Gleichgewichtsfähigkeit und den kognitiven Kontrollprozessen Inhibition/Selbstregulation, Kognitive Flexibilität/*response shifting* und Kognitive Flexibilität/*set shifting*, gemittelt über alle drei Bedingungen und für jede Kondition isoliert (Augen geöffnet, Balance-Pad, Augen geschlossen). Dargestellt sind Sobel Test β -Werte. Anmerkung: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ wie durch den Sobel Z Test angezeigt.

	Gleichgewichts-kontrolle (Mittelwert)		Augen geöffnet		Balance-Pad		Augen geschlossen	
	direkt	indirekt	direkt	indirekt	direkt	indirekt	direkt	indirekt
Inhibition/ Selbstregulation	-0,11	-0,37**	-0,07	-0,24	0,06	-0,09	-0,13	-0,36**
Kognitive Flexibilität/ <i>response shifting</i>	0,08	0,21	-0,05	0,35**	0,02	0,08	0,07	0,13
Kognitive Flexibilität/ <i>set shifting</i>	-0,03	0,50***	-0,03	0,09	0,001	0,20	-0,002	0,53***

3.3 Diskussion

Das Ziel der Studie war es, die ersten zwei Hypothesen der vorliegenden Arbeit zu verifizieren oder abzulehnen. Es galt deshalb die Spezifik des Motorik-Kognitions-Zusammenhangs (H1) nachzuweisen. Dazu wurden mit der HG und dem Gleichgewicht zwei alltagsnahe Bewegungen genutzt. Die ausgewählten Tests beanspruchten dabei einmal vorwiegend kleine und einmal vorwiegend große Muskeln und Muskelgruppen – weshalb die Handgeschicklichkeitsaufgabe eher der Feinmotorik und die Gleichgewichtsaufgabe eher der Grobmotorik zuzuordnen ist (Payne & Isaacs, 2012). Das Ziel der Studie lag weiterhin in der Exploration des Einflusses der Performancevariabilität (als Indikator für die Schwierigkeit, Komplexität und Neuheit einer motorischen Aufgabe) auf das Zusammenspiel zwischen Kognition und Motorik (H2).

Vergleichbar mit vorangegangenen bildgebenden Studien (Diamond, 2000; Pangelinan et al., 2011; Serrien et al., 2006), die eine enge Verzahnung zwischen Motorik und Kognition auf neuronaler Ebene vermuten, unterstützen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die Idee (Diamond, 2000; Piaget, 1952; Serrien et al., 2007) auf behavioristischer Ebene. Die Resultate in den kognitiven Tests konnten signifikante Anteile zur Varianzaufklärung in der Gleichgewichtsperformance und zum Teil

auch in der Handgeschicklichkeit aufklären. Erhoben wurden die Daten mit Hilfe von gesunden, jungen und aktiven Erwachsenen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Existenz des Links zwischen den Domänen recht robust und folglich nicht auf das Kindes- oder ältere Erwachsenenalter beschränkt ist. Weiterhin lassen die Daten vermuten, dass (a) verschiedene motorische Funktionen spezifische kognitive Kontrollprozesse aktivieren (H1) und (b) der Einfluss dieser kognitiven Kontrollprozesse unter anderem durch die Performancevariabilität mediiert wird (i. S. v. wie schwierig ist die Aufgabe; wie hoch ist der Grad an Automatisierung) (H2). Letzteres könnte zudem einen Grund dafür sein, warum bislang vor allem in Populationen mit motorischen Beeinträchtigungen (Piek et al., 2007), Kindern (Livesey et al., 2006; Michel et al., 2019) oder älteren Erwachsenen (Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017) empirisch signifikante Belege für den Zusammenhang zwischen der motorischen und der kognitiven Domäne vorliegen.

Die EFs konnten jeweils 26% und 49% der Varianz in der Handgeschicklichkeit und der Balanceaufgabe aufklären. Gestützt werden die aktuellen Befunde durch vorangegangene Untersuchungen, in denen Handgeschicklichkeit ebenfalls mit Aufgaben zur Planung, zum Arbeitsgedächtnis und zur kognitiven Flexibilität/*set shifting* korrelierte (Rigoli et al., 2013; Stöckel et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016). Die Gleichgewichtsfähigkeit war dagegen mit den Aufgaben zur Selbstregulation und beiden erhobenen Aspekten zur kognitiven Flexibilität (*set shifting* und *response shifting*) assoziiert. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen (Livesey et al., 2006; Michel, Kauer, et al., 2011; Rigoli et al., 2013) konnten durch die kognitiven Kontrollprozesse generell (und inhibitorische Kontrolle im Speziellen) große Anteile der Varianz in der Gleichgewichtsfähigkeit erklärt werden. Eine Erklärung dafür liegt wahrscheinlich in der Testauswahl begründet. So wurde in den meisten der bisherigen Studien (Livesey et al., 2006; Michel, Kauer, et al., 2011; Rigoli et al., 2013) auf Balancetests aus Bewegungstestbatterien zurückgegriffen. Diese quantifizieren die Gleichgewichtsleistung meist im Zeitspektrum (z. B. wie lange kann der Proband auf einem Bein stehen). In der vorliegenden Untersuchung wurde als abhängige Variable jedoch die Ausprägung der mittleren Schwankung bestimmt, welche sehr sensitiv in Bezug auf minimale qualitative Veränderungen ist. Daraus ableitend wird geschlussfolgert, dass das sensitivere und validere Messinstrument in der aktuellen Studie dazu beigetragen hat, mit der Gleichgewichtsfähigkeit assoziierte kognitive Kontrollprozesse zu identifizieren. Das bedeutet, dass auch grobmotorische Aufgaben (wie bspw. das Gleichgewichthalten) exekutive Kontrolle erfordert und damit die Bewegungsart (z. B. grob vs. fein) allein nicht zwangsläufig darüber bestimmt, wie stark Motorik und Kognition in Wechselwirkung treten (van der Fels et al., 2015). Darüber hinaus waren sowohl die Leistungen in der Handgeschicklichkeit als auch in der Gleichgewichtsfähigkeit mit den Aufgaben zur kognitiven Flexibilität/*set shifting* assoziiert; wohingegen die Ergebnisse im Arbeitsgedächtnis und der Planung lediglich mit der Handgeschicklichkeit assoziiert waren und die Leistungen in den Tests zur Inhibition/Selbstregulation und der kognitiven Flexibilität/*response shifting* ausschließlich mit der statischen posturalen Kontrolle

korrelierten. Zusammengefasst liefern die vorliegenden Ergebnisse weitere Evidenz, dass verschiedene motorische Funktionen mit spezifischen kognitiven Kontrollprozessen/EFs assoziiert sind.

Hinsichtlich des Einflusses der Performancevariabilität (als Indikator für die Aufgabenschwierigkeit) auf den Link zwischen Motorik und Kognition weisen die vorliegenden Daten darauf hin, dass die Verzahnung von spezifischen kognitiven Prozessen und der Gleichgewichtsfähigkeit durch die Performancevariabilität mediert wird. Dieses Resultat fügt sich in neurobehaviorale Arbeiten ein, die darauf hinweisen, dass die Aktivität derjenigen Hirnareale, die mit EFs in Verbindung gebracht werden (Diamond, 2000, 2013, Serrien et al., 2006, 2007), positiv mit denjenigen Arealen korrelieren, die aktiviert werden, wenn eine Aufgabe neu und komplex ist (Chein & Schneider, 2005; Patel et al., 2013; Poldrack et al., 2005; Shadmehr & Holcomb, 1997) (d. h. Aufgabencharakteristika, die mit einer erhöhten Performancevariabilität einhergehen) (Magill, 2001). Interessanterweise wurden nicht alle EFs, die mit der Gleichgewichtsfähigkeit assoziiert waren, gleichermaßen von einer erhöhten PV (d. h. Aufgabenschwierigkeit) beeinflusst. Während der Einfluss der kognitiven Flexibilität/*set shifting* und (zu einem gewissen Teil) der Inhibition/Selbstregulation auf die Balance stark vom Einfluss der PV abhängig zu sein scheint, ist das Zusammenspiel zwischen der Balance und der Leistung in der kognitiven Flexibilität/*response shifting* nur zu einem geringen Anteil von der PV gelenkt. Vor allem der Mangel an Assoziationen zwischen den Leistungen im Gleichgewicht und der kognitiven Flexibilität/*response shifting* in der AuZ Bedingung (d. h. diejenige Bedingung mit der höchsten PV, gemittelt über alle Probanden) deutet auf eine globalere Beteiligung dieser EF auf die statische posturale Kontrolle hin. Basierend auf diesen Befunden wird geschlussfolgert, dass motorische Fertigkeiten spezifische kognitive Kontrollprozesse möglicherweise auf zwei Stufen aktivieren: (1) *elementare kognitive Kontrollprozesse*, die gezielt mit bestimmten motorischen Anforderungen in Verbindung gebracht werden können (z. B. statische Gleichgewichtsaufgaben fordern die Inhibition/Selbstregulation vs. Handgeschicklichkeits-aufgaben fordern das Arbeitsgedächtnis) und (2) *variabilitätsabhängige kognitive Kontrollprozesse*, die dann genutzt werden, wenn die PV einer motorischen Aufgabe hoch ist – wenn die motorische Fertigkeit also gerade erst gelernt wird oder aus schweren und komplexen Sequenzen besteht (z. B. um die herausforderndste Bedingung (AuZ) in der Gleichgewichtsaufgabe zu meistern, ist kognitive Flexibilität/*set shifting* erforderlich).

Die Beobachtung, dass die Gleichgewichtsfähigkeit während der PAD-Bedingung mit keiner der ermittelten EFs korrelierte, ist interessant. Das Stehen auf einem Balance-Pad verändert das Ausmaß des sensorischen Inputs für alle beteiligten Propriozeptoren (Perry et al., 2000; Wu & Chiang, 1997) und verursacht unerwartete Bewegungen, wenn Druckbelastungen einsetzen bzw. gelöst werden (Misiaszek & Van der Meulen, 2017). Weiterhin legen vorangegangene Befunde dar, dass das visuelle System das vorrangige Wahrnehmungssystem darstellt, das die aufrechte posturale Kontrolle ermöglicht (Poole, 2009; Shaffer & Harrison, 2007; Uchiyama & Demura, 2009). Das Stehen auf einer

weichen Unterlage führt womöglich dazu, dass sich vermehrt auf eben dieses System und/oder den vestibulären Input verlassen wird (Brandt, 1991; Rosengren et al., 2007), um die Haltung zu kontrollieren, die Muskelaktivität zu regulieren (Fransson et al., 2007) und die Ko-Kontraktion von Beinen und Oberkörper zu steuern (Kennedy et al., 2012). Folglich involvieren die kurzen Latenzzeiten posturaler Antworten, die beim Stehen auf einer instabilen Oberfläche auftreten, eher subkortikale Areale im Hirnstamm sowie Strukturen im Rückenmark (z. B. Dehnungsreflexe und Inhibitionsprozesse auf spinaler Ebene) (Brooks, 1986; Jacobs & Horak, 2007). Im Kontrast dazu beteiligt posturale Kontrolle, bei der der visuelle Input nicht zugänglich ist, eher Areale in der Großhirnrinde und assoziierte höhere kognitive Kontrollfunktionen (Jacobs & Horak, 2007). Demnach könnte spekuliert werden, dass das Stehen auf einem Balance-Pad mit geschlossenen Augen (d. h. sowohl der visuelle Input als auch die Beschaffenheit des Untergrunds werden manipuliert) beide posturale Kontrollprozesse aktiviert, sowohl den automatisierten als auch den kognitiven Prozess, was wiederum indirekte Effekte von Inhibition/Selbstregulation und kognitiver Flexibilität/*set shifting* auf das Gleichgewicht erklären könnte.

Die vorliegende Studie weist einige Limitationen auf. Erstens liegt der Untersuchung ein Querschnitts-Design zu Grunde, was einen Rückschluss auf kausale Zusammenhänge zwischen motorischen und kognitiven Funktionen nicht zulässt. Zukünftige Arbeiten sollten deshalb manipulative Designs nutzen (z. B. spezifische motorische vs. kognitive Trainingsinterventionen von unterschiedlicher Komplexität), um den Zusammenhang der beiden Domänen auf Kausalität hin zu überprüfen und um geeignete Übungs-/Trainingspläne zu identifizieren, die das Potential haben, die kognitive und/oder motorische Entwicklung zu fördern. Zweitens kann die Mediationsanalyse nur als ein Indikator für eine tatsächlich vorliegende Mediation betrachtet werden – zumindest solange bis die unabhängigen Variablen bzw. der Mediator systematisch manipuliert wurden. Zukünftigen Studien obliegt es deshalb Ansätze anzuwenden, die eine differenzierte Manipulation der Performancevariabilität zwischen Probanden und zwischen Versuchen/Aufgaben erlaubt. Weiterhin wäre es in Betrachtung der wenigen motorischen Fertigkeiten, die in der vorliegenden Studie miteinbezogen worden sind, sinnvoll eine mögliche Generalisierung der Ergebnisse auf andere motorische Funktionen zu untersuchen.

Ungeachtet der vorgenannten Limitationen liefert die vorliegende Untersuchung einen Wissenszuwachs hinsichtlich möglicher Prinzipien wirkungsvoller EF-Trainingsinterventionen (Diamond, 2012; Diamond & Lee, 2011). Die vorliegende Studie liefert zunächst weitere Unterstützung dahingehend, dass spezifische EFs mit spezifischen motorischen Funktionen assoziiert sind und damit ein Training gezielt auf die zu verbessernden EFs abzustimmen ist (d. h. limitierter Transfer). Dieses Ergebnis kann von Nutzen für Praktiker sein, deren Interesse es ist, kognitive Ressourcen durch motorische Maßnahmen zu stärken. Die Daten sprechen in diesem Fall dafür, die spezifischen motorischen Fähigkeiten zu identifizieren und zu nutzen, welche die relevante zu fördernde kognitive Funktion „direkt“ beeinflussen können. Gestützt auf den vorliegenden Ergebnissen, liegt die

Vermutung nahe, dass hohe Anforderungen an die Gleichgewichtsfähigkeit vor allem EF-Komponenten wie Inhibition/Selbstregulation und kognitive Flexibilität/*response shifting* ansprechen, während Aufgaben zur Handgeschicklichkeit eher diejenigen exekutiven Funktionen involviert, die dazu benötigt werden, relevante Informationen herauszufiltern und Handlungen vorauszuplanen (z. B. kognitive Flexibilität/*set shifting*, Arbeitsgedächtnis, Planung) (Stöckel et al., 2017). Zweitens sprechen die Ergebnisse der Studie dafür, dass motorisch anspruchsvolle und herausfordernde Aufgaben benötigt werden, um Verbesserungen in der kognitiven Domäne (d. h. den EFs zu evozieren). Nur wenn eine motorische Aufgabe hinreichend fordernd bzw. unbekannt und schwierig ist, hat die Intervention das Potential auf eine Vielzahl kognitiver Kontrollprozesse einzuwirken (z. B. wird kognitive Flexibilität/*set shifting* erst bei hohen Anforderungen an die Gleichgewichtsfähigkeit involviert). Für Praktiker bedeutet dies im Umkehrschluss, dass ein kontinuierliches Beobachten der Ausführungs- und Leistungsvariabilität hilfreich dabei sein kann, die motorischen Anforderungen zu jeder Zeit herausfordernd zu halten. Ist die Performancevariabilität gering spricht dies für eine gut gelernte und nahezu automatisierte Bewegung, in der exekutive Kontrollprozesse kaum bis gar nicht involviert sind – in diesem Fall sollten neue Aufgabeninhalte in die Übung integriert werden. Das Identifizieren und Beobachten von kognitiven Defiziten und Bedürfnissen eines Probanden ist unerlässlich, um effektive Trainingsinterventionen abzuleiten. Globale kognitive Verbesserungen können durch ein motorisches Interventionsprogramm folglich nicht erwartet werden.

Zusammengefasst unterstützen die vorliegenden Ergebnisse die Idee eines engen funktionalen Zusammenspiels motorischer und kognitiver Funktionen. Dieses Zusammenspiel scheint zudem recht robust zu sein, da sich in der aktuellen Studie bedeutsame Zusammenhänge der beiden Domänen bei recht alltagsnahen Bewegungen und zudem bei jungen, gesunden Erwachsenen zeigten. Weiterhin ergänzen die Daten die bisherige Literatur und die Eingangshypothesen dahingehend, dass verschiedene motorische Funktionsbereiche mit ganz spezifischen EFs assoziiert sind (H1) und dass das Ausmaß kognitiver Beteiligung dabei u. a. durch die PV d. h. durch die Schwierigkeit der motorischen Aufgabe, beeinflusst wird (H2). Es wird deshalb vermutet, dass motorische Anforderungen kognitive Kontrollprozesse auf zwei Ebenen ansprechen können: 1) *elementare kognitive Kontrollprozesse* die gezielt mit bestimmten motorischen Anforderungen in Verbindung gebracht werden können und 2) *variabilitätsabhängige kognitive Kontrollprozesse*, die dann genutzt werden, wenn die PV einer motorischen Aufgabe hoch ist. Praktiker sollten demnach spezifische und herausfordernde motorische Trainingsinterventionen nutzen, um kognitive Kontrollprozesse direkt anzuregen und eine möglichst große Anzahl exekutiver Funktionen im Trainingsprozess zu involvieren.

4 Unterschiedliche Nutzung exekutiver Funktionen bei Vorschulkindern und jungen Erwachsenen (Studie 2)

Die Ergebnisse von Studie 1 weisen hinsichtlich des Zusammenspiels der beiden genannten Entwicklungsbereiche u. a. auf einen Einfluss der Schwierigkeit der motorischen Aufgabe hin. Für die allgemeine Forschungsfrage nach der optimalen Förderung von EFs im Vorschulalter ist dies insofern bedeutsam, als das mögliche motorische Interventionen zum einen an den Entwicklungsstand des zu Fördernden angepasst werden müssen und zum anderen ständige Kontrolle und eventuelle Anpassung erfordern, um spezifische EFs anzusprechen. Die erste Untersuchung fand mit jungen Erwachsenen statt. In Bezug auf das frühe Kindesalter könnten die Ergebnisse darauf hindeuten, dass sich die beiden Altersgruppen hinsichtlich des Domänenzusammenspiels, schon allein deshalb unterscheiden, weil Kinder weniger Bewegungserfahrung besitzen und motorische Aufgaben generell als schwieriger und komplexer einstufen. Studie 1 wirft folglich die Frage nach der Vergleichbarkeit des Domänenzusammenspiels zwischen Kindern und Erwachsenen auf und ob, neben der Aufgabenschwierigkeit, Zusammenhänge zwischen den Funktionsbereichen womöglich auch noch durch Reifung und Entwicklung beeinflusst werden.

Die Leistung in EF-Tests kann in Beziehung zur Reife des PFCs und anderer assoziierter und nicht assoziierter Hirnregionen und -strukturen gebracht werden (z. B. parietale, temporale oder Hippocampus- Areale; Andrés, 2003; Diamond, 2000; Stuss & Benson, 1984), da das funktionale Auftreten exekutiver Kapazitäten und die strukturelle Reifung des Frontallappens eine parallele Entwicklung zeigen. Vergleichbar mit der Reifung des PFC (Casey et al., 2000; Thompson & Nelson, 2001) liegen die EFs in der Kindheit in einem unreifen Status vor und durchlaufen dann eine Phase ausgedehnter Entwicklungen bis ins junge Erwachsenenalter, bevor sie im älteren Erwachsenenalter wiederum eine Abnahme verzeichnen (De Luca et al., 2003; Diamond, 2013; Lyons-Warren, Lillie, & Hershey, 2004; Zelazo, Craik, & Booth, 2004). Die Reifung motorischer Kompetenzen folgt, analog zum Entwicklungsverlauf der EFs, ebenfalls einer verlängerten Reifung über die Lebensspanne (Clark & Metcalfe, 2002; Hamilton et al., 2015).

Die ähnlichen Entwicklungsverläufe von EFs und motorischen Fähigkeiten und Fertigkeiten legen die Vermutung einer gegenseitigen Wechselbeziehung zwischen den Domänen nahe. Arbeiten, die sich mit dem Nachweis dieser Wechselbeziehung auseinandersetzen, offenbarten jedoch eher uneinheitliche Ergebnisse, die im Folgenden noch einmal kurz für die relevanten Altersgruppen dargelegt werden sollen. Einige Studien fanden Hinweise auf systematische Assoziationen zwischen motorischen und kognitiven Funktionen (Livesey et al., 2006; Oberer et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016; Stöckel et al., 2017; Studie 1), während andere entweder von sehr schwachen oder nicht vorhandenen Korrelationen berichteten (Michel, Kauer, et al., 2011; Röthlisberger et al., 2010; van der Fels et al., 2015). So wurde beispielsweise ein Zusammenhang zwischen der Handgeschicklichkeit und dem Arbeitsgedächtnis und/oder der Inhibition bei 5- bis 6-jährigen Kindern beschrieben (Livesey et

al., 2006; Oberer et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016). Bei jüngeren (Stöckel et al., 2017; Studie 1) und älteren Erwachsenen (Stöckel et al., 2017) korrelierten die Leistungen in der Handgeschicklichkeit dagegen eher mit der Planungsfähigkeit und der kognitiven Flexibilität. Weiterhin korrelierten auch grobmotorische Fertigkeiten mit inhibitorischer Kontrolle und kognitiver Flexibilität bei 6- bis 7-jährigen Kindern (Oberer et al., 2017; Roebers & Kauer, 2009) und jungen Erwachsenen (Studie 1). Andere Studien zeigen, konträr zu den genannten Ergebnissen, entweder sehr geringe oder sogar keinerlei Zusammenhänge (Michel, Kauer, et al., 2011; Röthlisberger et al., 2010; van der Fels et al., 2015). Michel, Kauer und Kollegen (2011) berichteten für 7-Jährige, dass, kontrolliert für die Verarbeitungsgeschwindigkeit, weder Handgeschicklichkeit und inhibitorische Kontrolle miteinander korrelierten noch grobmotorische Fertigkeiten und Inhibition oder kognitive Flexibilität Wechselbeziehungen aufwiesen.

Unter Berücksichtigung vorangegangener Arbeiten scheint eine der Schlüsselkomponenten, die Einfluss auf die Beziehung zwischen den beiden Domänen nimmt, das individuelle Entwicklungsstadium zu sein. Insbesondere scheinen die Wechselwirkungen zwischen motorischen und kognitiven Funktionen im jungen Erwachsenenalter eher spezifisch (aber weniger ausgeprägt) zu sein, während sie an den äußeren Enden der Lebensspanne (u. a. wegen erhöhter Schwierigkeitsanforderungen) stärker und globaler verknüpft sind (Livesey et al., 2006; Oberer et al., 2017; Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016; Studie 1).

Folglich hatte die vorliegende Studie das Ziel, spezifische Zusammenhänge zwischen exekutiven und motorischen Funktionen im Vorschulalter zu erfassen und zu untersuchen, ob sich vorhandene Assoziationen zwischen Vorschul- und jungem Erwachsenenalter unterscheiden. Der Grund für den Einbezug der ausgewählten Altersgruppen sind Studienergebnisse, die zeigten, dass Wechselbeziehungen, die im Kindesalter beschrieben werden (u. a. Livesey et al., 2006; Michel et al., 2019), in Erwachsenenpopulationen nicht mehr oder kaum nachweisbar sind (Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017). Wahrscheinlich ist, dass die in den Studien ausgewählten motorischen und kognitiven Tests für Kinder eine größere Herausforderung darstellten als für junge Erwachsene und deshalb die Notwendigkeit der exekutiven Kontrolle bei Kindern evtl. zu einer erhöhten Aktivierung von Cerebellum und DLPFC führte (Diamond, 2000; Serrien et al., 2007). Zudem gibt es Hinweise von Entwicklungsstudien (Best et al., 2009; Shing et al., 2010), die argumentierten, dass die Fähigkeit zur Inhibition vollständig entwickelt und ausgereift sein muss, bevor es zur zweckmäßigen Nutzung der Arbeitsgedächtniskomponenten kommen kann. Shing und Kollegen (2010) sprachen beispielsweise davon, dass die Differenzierung der einzelnen EFs durch die Reifung der inhibitorischen Kontrolle reguliert und geleitet ist. Gemäß dieser Ansicht ist es möglich, dass junge Erwachsene und Vorschulkinder verschiedene EFs nutzen, um dieselbe motorische Aufgabe erfolgreich zu lösen – je nachdem, welche der EFs bereits ein funktionales Level erreicht haben. Bei der Frage danach, welche Relationen über die Entwicklung hinweg stabil sind (d. h. bleiben weitestgehend von der Kindheit bis

zum Erwachsenenalter bestehen) und welche Assoziationen möglicherweise ausschließlich in jungen Jahren auftreten (d. h. sind abhängig von der Schwierigkeit/Neuheit einer Aufgabe und der kognitiven Reife), kann der Einbezug der gewählten Alterskohorten demnach sehr aufschlussreich sein.

Auf dem Literaturstand basierend wird für die aktuelle Studie die Hypothese aufgestellt, dass exekutive Kontrollprozesse bei Vorschulkindern eine zentrale Rolle bei der erfolgreichen Ausführung motorischer Aufgaben einnehmen, da motorische Tests vermutlich für die überwiegende Mehrheit der Kinder herausfordernd und neu sind und somit kognitive Kontrolle erfordern (Diamond, 2000; Serrien et al., 2007). Da EFs im Vorschulalter noch nicht vollständig ausgereift und differenziert vorliegen (Lee et al., 2013; Monette et al., 2015; van der Ven et al., 2013), wurde weiterhin vermutet, dass lediglich Kern-EFs (z. B. Arbeitsgedächtnis und inhibitorische Kontrolle) mit einer erfolgreichen Bewegungsausführung assoziiert sind (Best et al., 2009; Livesey et al., 2006; Senn et al., 2004; Shing et al., 2010; Stöckel & Hughes, 2016). Im Kontrast dazu wurde bei den jungen Erwachsenen erwartet, dass die Zusammenhänge zwischen exekutiven und motorischen Funktionen deutlich geringer ausfallen als bei Vorschulkindern und hauptsächlich die EFs betreffen werden, die erst im Jugend- und frühen Erwachsenenalter vollständig ausgereift vorliegen (z. B. kognitive Flexibilität, Abwägen von Entscheidungen, Planung; Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017; Studie 1). Hinsichtlich der übergeordneten Forschungsfrage, wie sich EFs im Vorschulalter optimal fördern lassen, soll die vorliegende Studie zur Aufklärung bzw. Bestätigung zweier Hypothesen verhelfen (H1, H2), die im Folgenden, wenn möglich, für diese zweite Teilstudie spezifiziert werden:

1. **Spezifik:** Sowohl im Kindes- als auch im Erwachsenenalter sind spezifische exekutive Funktionen mit spezifischen motorischen Anforderungen assoziiert (H1).
2. **Einfluss des kalendarischen Alters bzw. des motorischen und exekutiven Fähigkeitslevels:** Im Kindesalter sind die Zusammenhänge deutlich und betreffen v. a. die sich früh entwickelnden EFs. Im Erwachsenenalter sind die Assoziationen dagegen geringer und betreffen EFs die erst später in der Entwicklung ausgereift vorliegen (H3).

4.1 Untersuchungsmethodik

4.1.1 Probanden

An dieser Studie nahmen 41 fünf- bis sechsjährige Vorschulkinder (Altersspanne = 65-83 Monate; mittleres Alter = $71,9 \pm 3,9$ Monate; 18 männlich) und 40 junge Erwachsene (Altersspanne = 18-31 Jahre; mittleres Alter = $22,1 \pm 3,5$ Jahre; 25 männlich) teil. Die Testungen der Kinder fanden circa ein halbes Jahr vor Schuleintritt in den jeweiligen Kindergärten statt. Um die Motivation der Kinder über alle Testtage hoch zu halten, wurden die Tests in eine „Schatzsuche“ eingebettet. Zu Beginn des Kennenlernens wurde den Kindern eine Schatzkarte gereicht, die nach Beendigung eines jeden Tests,

mit einem Stempel versehen wurde. Nach dem Sammeln aller Stempel und somit dem Ablegen aller motorischen und kognitiven Tests, konnten sich die Kinder ein kleines Geschenk aus einer Schatztruhe aussuchen. Zu Beginn der Studie gaben alle Eltern ihr schriftliches Einverständnis über die Teilnahme ihrer Kinder an der Studie. Trotzdem stand es den Kindern natürlich frei, die Tests zu absolvieren. Sie konnten zu jeder Zeit in ihre Gruppe zurückkehren. Die Gruppe der jungen Erwachsenen wurde von Universitätsstudenten gebildet. Um das Verständnis der Testinstruktionen zu gewährleisten, wurden ausschließlich Probanden inkludiert, die seit mindestens zwei Jahren regelmäßig mit der deutschen Sprache in Kontakt gekommen sind. Alle jungen Erwachsenen unterschrieben Vorab eine Einverständniserklärung und versicherten das Nichtvorhandensein neurologischer oder mentaler Erkrankungen (z. B. Depressionen, Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitätsstörung).

4.1.2 Ablauf und Testauswahl der Untersuchung

Die motorischen Fähigkeiten wurden getestet mit 1) dem *Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency* (BOT-2; Schnelligkeit und Geschicklichkeit, Kraft), 2) dem *Purdue Pegboard* Test zur Erfassung der Handgeschicklichkeit, und 3) dem *Star Excursion Balance Test* (SEBT) zur Erhebung der posturalen Kontrolle. Die kognitiven Tests umfassten 1) den *list-sorting* Test zur Beurteilung der Arbeitsgedächtniskapazität, 2) einen *simple reaction time* Test zur Erfassung der einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit, 3) den *Hearts & Flowers* Test, der Aussagen über die Inhibition/Selbstregulation liefert, 4) eine *Flanker* Aufgabe zur Erhebung der Inhibition/selektiven Aufmerksamkeit und 5) den *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST) als Maß für die kognitive Flexibilität. Vergleichbar zu Studie 1 wurden der *Flanker* -, der *Hearts & Flowers* -, und der *simple reaction time* Test mit Hilfe der Software *Presentation*® (Neurobehavioral Systems Inc., Berkeley, USA), einem 22" Touchscreen Monitor (Philips 231C5TJKFU/00) und einer Griffstange (40 cm Länge; 5 cm Abstand zum Monitor) durchgeführt. Letztere umfassten die Kinder während der Testungen mit ihren Händen, um die Distanz zum Bildschirm konstant zu halten. Zur Durchführung des WCST fand die *Psychology Experiment Building Language Software* (PEBL, v0.14; Mueller & Piper, 2014) auf einem 12" Tablet (Samsung Galaxy TabPro S) Anwendung.

Die Gruppe der jungen Erwachsenen wurde innerhalb einer zweistündigen Sitzung (in vier verschiedenen Räumen) getestet. Die Vorschulkinder durchliefen ihre Testungen dagegen an vier aufeinanderfolgenden Tagen, wobei die Dauer jeweils zwischen 20-30 Minuten betrug. Die Reihenfolge der Tests fand randomisiert statt.

Tests zur Erfassung der motorischen Fähigkeiten

Kraft: Fünf Subtests des *Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency* (BOT-2, Blank, Jenetzky, & Vincon, 2014; Bruininks, 2005) bildeten die abhängige Variable zur Erfassung der Kraftkomponente

(BOT_{Kraft}): Weitsprung aus dem Stand (Distanz in cm), vereinfachte Liegestütze und Sit-ups (Anzahl der korrekt ausgeführten Versuche), Hocksitz an der Wand und Strecken in Bauchlage (Haltedauer in Sek.).

Schnelligkeit und Geschicklichkeit: Zur Erfassung der abhängigen Variable BOT_{S&G} wurden ebenfalls fünf Subtests aus dem BOT-2 (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005) herangezogen: 30m Sprint (Zeit in Sek.), Nachstellschritt zur Seite, Hüpfen auf einem Bein, Hüpfen zur Seite - auf einem Bein, Hüpfen zur Seite - mit beiden Beinen (Anzahl korrekter Sprünge in 15 Sek.). Um je einen Faktor aus den jeweils fünf Subtests für Kraft (BOT_{Kraft}) und für Schnelligkeit und Geschicklichkeit (BOT_{S&G}) als abhängige Variablen bestimmen zu können, wurden explorative Faktorenanalysen durchgeführt.

Dynamische posturale Kontrolle: Mit einem modifizierten *Star Excursion Balance Test* (SEBT; Gray, 1995; Hertel, Braham, Hale, & Olmsted-Kramer, 2006) wurde das dynamische Gleichgewicht erfasst. Dazu standen die Probanden in der Mitte eines Y - förmigen Rasters auf einem Bein. Die Y - Stränge waren in die Richtungen anterior, posteromedial und posterolateral durch Klebeband markiert. In randomisierter Reihenfolge der Richtungen und des Standbeines wurden die Teilnehmer gebeten, ihr Gewicht bestmöglich auszubalancieren, sodass sie mit dem Ausstreckbein in möglichst weiter Distanz zum Standbein auf dem Klebeband leicht antippen konnten (ohne den gesamten Fuß aufzusetzen). In den Instruktionen wurde betont, dass das Gewicht zu keiner Zeit auf dem Ausstreckbein lasten sollte und dass das leichte Antippen, den Richtungen entsprechend, entlang des gezogenen Klebebandes erfolgen solle. In Fällen, in denen Teilnehmer entweder komplett das Gleichgewicht verloren oder das Ausstreckbein zur Stabilisation nutzten, wurde der Durchgang (maximal dreimal) wiederholt. Vor dem Start der Untersuchung wurden pro Bein und Richtung vier Probendurchgänge durchgeführt, um sowohl das Verständnis für die Aufgabe als auch die Testreliabilität zu gewährleisten (Munro & Herrington, 2010; Robinson & Gribble, 2008). Jede Richtung wurde dann mit dem rechten und dem linken Bein als Stand- und Ausstreckbein drei Mal durchgeführt. Als abhängige Variable für die dynamische posturale Kontrolle (SEBT) diente letztendlich die maximale Distanz, bei der das Ausstreckbein antippen konnte (in cm), gemittelt über alle Durchgänge und Konditionen und kontrolliert für die Beinlänge.

Handgeschicklichkeit: Die Handgeschicklichkeit wurde vergleichbar mit Studie 1 mit dem *Purdue Pegboard Test* (#32020, Lafayette Instruments, IN, USA) erhoben, bei dem die Probanden ein Steckbrett mit zwei vertikalen Reihen mit je 25 Löchern in einer vorgegebenen Zeit so schnell wie möglich mit Stäbchen füllen mussten (Tiffin & Asher, 1948). Dem Standard-Test-Protokoll folgend gab es drei Bedingungen á 30 Sekunden, die jeweils drei Mal durchgeführt wurden. Die Probanden nutzten zunächst die dominante Hand, um so viele Stäbchen wie möglich in den Löchern zu platzieren, dann die nicht-dominante Hand und letztendlich beide Hände simultan, um immer zwei Stäbchen zur gleichen Zeit in den parallelen Reihen zu platzieren. Versuche innerhalb einer Bedingung (dominant, nicht-dominant, beide) wurden zu einem Mittelwert zusammengefasst und die Summe der drei Mittelwerte schließlich als abhängige Variable für die Handgeschicklichkeit (PP_{groß}) definiert.

Test zur Erfassung der exekutiven Funktionen

Bei der Auswahl der Tests zur Erfassung der EFs wurde sich wie schon in Studie 1 am Modell von Diamond (2013) orientiert. Da in der aktuellen Studie jedoch auch Kinder als Teilnehmer eingeschlossen wurden, wurde auf teils varierte Variablen oder Testprocedere zurückgegriffen, die den unterschiedlichen Entwicklungsstand der Probandengruppen berücksichtigen, ohne jedoch überproportional vom Testinhalt abzuweichen. Die betroffenen Testverfahren werden deshalb erneut grob beschrieben. Sowohl der Test zur Erfassung der kognitiven Flexibilität/*set shifting* (WCST_{Fehler}) als auch jener zur Einschätzung der einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit (E-VG) sind jedoch in Ablauf und Variablenauswahl identisch zur Auswahl in Studie 1 (Gläscher et al., 2012; Grant & Berg, 1948; Greve, 2001; Heaton et al., 1993; Kiselev et al., 2009; Welsh et al., 1991) und werden deshalb hier nicht erneut vorgestellt. Es sei jedoch erwähnt, dass die Gruppe der Vorschulkinder eine Version des WCST mit 64 Karten sortieren sollte, während die Erwachsenen die gängige Version mit 128 Karten bearbeitete.

Arbeitsgedächtnis: Die Arbeitsgedächtniskapazität wurde mit dem modifizierten *Toolbox List Sorting Working Memory Test* (Tulsky et al., 2013, 2014) erfasst. In der 1-List Bedingung wurden den Probanden im Zwei-Sekunden-Takt Items einer einzigen Kategorie (entweder Nahrungsmittel oder Tiere) auf einem Computerbildschirm präsentiert. Die Präsentation der visuell dargestellten Bilder wurde durch die verbale Nennung des Items unterstützt. Die Probanden wurden dazu aufgefordert, sich alle Items eines Durchgangs zu merken und diese nach Abschluss der Präsentation in veränderter Reihenfolge (von klein nach groß) wiederzugeben. Der Test startete mit zwei Items. Nach jedem erfolgreichen Durchgang erhöhte sich die Itemanzahl um eins (bis höchstens sieben Items). Im Anschluss an die 1-List Bedingung folgte die 2-List Bedingung. Diese verfolgt das identische vorher beschriebene Vorgehen. Jedoch werden hier innerhalb eines jeden Durchgangs Items zweier verschiedener Kategorien (Nahrungsmittel und Tiere) präsentiert. Wiederum sollten die Teilnehmer nach Abschluss der Darstellung die Items der Größe nach sortiert wiedergeben, jedoch sollten erst alle Nahrungsmittel von klein nach groß benannt werden, bevor die Tiere in aufsteigender Reihenfolge folgten. Für jeden Durchgang, den der Proband im ersten Versuch erfolgreich beendete, erhielt dieser zwei Punkte. Für die korrekte Antwort im zweiten Versuch gab es noch einen Punkt. Die Summe der erreichten Punkte aus beiden Konditionen wurde als abhängige Variable für das Arbeitsgedächtnis herangezogen (LS).

Inhibitorische Kontrolle/Selbstregulation: Der Teilaspekt der Selbstregulation der inhibitorischen Kontrolle wurde ähnlich zu Studie 1 wiederum mittels *Hearts & Flowers Test* (Diamond et al., 2007; Wright & Diamond, 2014) erhoben. Jeder Versuch startete mit einem Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Nach einem Interstimulusintervall von 500 ms erschien der relevante Stimulus für 750 ms. Im ersten Block (kongruente Bedingung) mit insgesamt 12 Durchgängen wurden entweder auf der rechten oder der linken Bildschirmseite Herzen präsentiert. Der Proband wurde aufgefordert

schnellstmöglich die Taste auf derjenigen Seite zu drücken, auf der sich auch der Stimulus befand. Im zweiten Block (inkongruente Bedingung) erschienen Blumen statt Herzen. Hier sollte der Teilnehmer so schnell wie möglich mit dem Drücken der Taste reagieren, die sich auf der entgegengesetzten Seite des Stimulus befand. Für jede der beiden Bedingungen wurden die Genauigkeitsmaße (korrekte Durchgänge in Prozent) und die mittleren Reaktionszeiten der korrekten Durchgänge erhoben. Wie schon in Studie 1 wurden Durchgänge, die unter 250ms beantwortet wurden oder zwei Standardabweichungen über dem individuellen Mittelwert lagen, in der Datenauswertung nicht berücksichtigt (Wright & Diamond, 2014). Als abhängige Variable diente für die Gruppe der jungen Erwachsenen die Differenz der mittleren Reaktionszeit ($HF_{Rt-diff}$) und für die Vorschulkinder die Differenz der Genauigkeitsmaße ($HF_{korrekt-diff}$) zwischen kongruenter und inkongruenter Bedingung. Die Entscheidung für diese beiden unterschiedlichen Variablen wurde auf Grundlage vorangegangener Ergebnisse getroffen, in denen demonstriert werden konnte, dass das Genauigkeitsmaß ein sensitiveres Maß für die Leistung von Kindern darstellt, während die Reaktionszeit die Leistung von Erwachsenen besser repräsentiert (Davidson, Amso, Anderson, et al., 2006).

Inhibitorische Kontrolle/selektive Aufmerksamkeit: Der Teilaspekt der selektiven Aufmerksamkeit der inhibitorischen Kontrolle wurde, wiederum vergleichbar mit Studie 1, mit einem *Flanker* Test mit Fischen als Stimuli (Zaitchik et al., 2014) ermittelt. Mit einer Stimuluszeit von 1500 ms wurden pro Durchgang fünf in einer Reihe befindliche Fische präsentiert. In der *classic* Bedingung waren die Probanden, genau wie in Studie 1, dazu aufgefordert, je nach Blickrichtung des mittleren Fisches schnellstmöglich mit dem Drücken der rechten oder linken Pfeiltaste zu reagieren. Dabei gab es vier unterschiedliche Bedingungen. In der kongruenten Bedingung hatten der mittlere und die äußeren Fische die gleiche Blickrichtung inne, während sie in der inkongruenten Bedingung entgegengesetzte Blickrichtungen einnahmen. In der neutralen Bedingung nahmen die äußeren Fische irrelevante Blickrichtungen ein (oben oder unten) und in der Bedingung ohne Ablenker erschien der mittlere Fisch allein auf dem Bildschirm. Im Gesamten ergaben sich 65 Durchgänge, mit jeweils 13-17 Durchgängen pro Bedingung (per Zufallsgenerator ausgewählt). Durchgänge, die unter 250 ms beantwortet wurden oder zwei Standardabweichungen über dem individuellen Mittelwert lagen, blieben in der Datenauswertung unberücksichtigt (Wright & Diamond, 2014). Als abhängige Variable für die selektive Aufmerksamkeit ($FF_{korrekt}$) diente die Anzahl der korrekten Antworten (in Prozent) über alle Konditionen, da sich dies sowohl für die Gruppe der Vorschüler als auch für die jungen Erwachsenen als sensitives Maß erwies.

4.1.3 Datenanalyse

Die statistischen Analysen wurden mit den Daten von 81 Probanden durchgeführt. Ausnahmen bildeten der WCST (von vier Kindern fehlten valide Daten) und der *Hearts & Flowers* (die Daten eines Kindes, welches auch zu den vier ohne valide Daten im WCST gehörte, waren unvollständig). In den

Eingangsanalysen wurden exekutive und motorische Funktionen sowohl auf Normalverteilung und Sphärizität (Mauchly Test) als auch auf univariante und multivariate Ausreißer hin geprüft.

Um die vermuteten Unterschiede in den motorischen und exekutiven Funktionen zwischen Vorschulkindern und jungen Erwachsenen bestätigen zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA), mit GRUPPE als Zwischensubjektfaktor, für alle erhobenen motorischen und kognitiven Maße durchgeführt. Als Effektstärke wurde das partielle Eta-Quadrat (η^2) berechnet. Dabei galt $0.01 \leq \eta^2 < 0.06$ als schwacher Effekt, $0.06 \leq \eta^2 \leq 0.14$ als mittlerer Effekt und $\eta^2 > 0.14$ als großer Effekt (vgl. Cohen, 1988).

Separate hierarchische Regressionsanalysen fanden Anwendung, um die Ausmaße zu bestimmen, mit denen jede der EFs bei Kindern und Erwachsenen Einfluss auf die jeweiligen motorischen Domänen (Handgeschicklichkeit, Gleichgewicht, Schnelligkeit und Geschicklichkeit, Kraft) nimmt und, um deren relativen prädiktiven Wert zu bestimmen, wenn für mögliche andere Einflussfaktoren kontrolliert wird. In Model 1 gingen das Geschlecht, das Alter, der Body-Mass-Index (BMI) und die individuelle einfache Verarbeitungsgeschwindigkeit in die Regressionsgleichungen ein. Die vier abhängigen Variablen der EF-Tests (LS, HF_{korrekt-diff} [für Kinder] bzw. HF_{Rt-diff} [für Erwachsene], FF_{korrekt}, WCST_{Fehler}) wurden zunächst standardisiert und gingen dann in Model 2 ein. Demzufolge wurde analysiert, ob die EFs (eingegangen in Model 2) einen einzigartigen und signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung in den einzelnen motorischen Domänen leisten können, unabhängig der Varianz, die bereits durch andere Einflussfaktoren (eingegangen in Model 1) erklärt werden kann. Abschließend wurden Korrelationsanalysen (kontrolliert für Geschlecht, Alter, BMI, Verarbeitungsgeschwindigkeit (in Abhängigkeit davon, welcher Einflussfaktor sich in den Regressionsanalysen als relevant für die jeweilige motorische Domäne erwiesen hat) durchgeführt, um ein detailliertes Bild darüber zu erhalten, wie spezifische motorische und exekutive Funktionen miteinander in Beziehung stehen. Zur Beachtung der Problematik multipler Signifikanztestungen (z. B. Gesamt-Irrtumswahrscheinlichkeit) fand das Benjamini-Hochberg Verfahren Anwendung (Benjamini & Hochberg, 1995).

4.2 Ergebnisse

Altersabhängige Differenzen in der motorischen und kognitiven Leistung

Wie erwartet, zeigten die jungen Erwachsenen in allen getesteten motorischen und kognitiven Bereichen signifikant bessere Leistungen als die Vorschulkinder (Tabelle 7). Diese Unterschiede wurden vor allem in den motorischen Bereichen der Handgeschicklichkeit, Kraft und Schnelligkeit und Geschicklichkeit sowie in der kognitiven Domäne des Arbeitsgedächtnisses deutlich (mittleres $\eta^2 = 0,82$; Spanne = 0,79 – 0,84). Für die erhobenen Variablen der selektiven Aufmerksamkeit, Inhibition/Selbstregulation, kognitive Flexibilität und Gleichgewicht waren die Unterschiede zwischen den beiden Altersgruppen indessen nicht in dem gleichen großen Ausmaß vorhanden, repräsentierten aber dennoch teils mittlere bis große Effekte (mittleres $\eta^2 = 0,32$; Spanne = 0,06 – 0,49).

Tabelle 7: Demographische Daten und deskriptive Statistik (Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern)) aller motorischen und kognitiven Variablen von Vorschulkindern und jungen Erwachsenen, sowie die statistischen Kennzahlen der Prüfung von Unterschieden zwischen den Gruppen.

	Kinder (n = 41)	Erwachsene (n = 40)	p	F	η^2
männlich, n (%)	18 (43,9)	25 (62,5)	0,121	-	-
Alter, Jahre	5,99 (0,32)	22,10 (3,54)	<0,001	840,34	0,91
Gewicht, kg	21,62 (3,12)	72,35 (11,62)	<0,001	728,39	0,90
Größe, cm	118,33 (5,69)	178,43 (8,70)	<0,001	1360,30	0,95
BMI, kg/m ²	15,43 (1,92)	22,61 (2,41)	<0,001	220,46	0,74
Beinlänge, cm	60,11 (4,40)	96,25 (6,16)	<0,001	926,88	0,92
Verarbeitungsgeschwindigkeit (E-VG), ms	633,74 (184,99)	252,87 (29,61)	<0,001	165,32	0,68
Motorische Funktionen					
Handgeschicklichkeit (PP _{grob}), Anzahl der Stäbchen	25,97 (4,10)	44,23 (5,33)	<0,001	294,90	0,79
Gleichgewicht (SEBT), cm	0,67 (0,15)	0,84 (0,05)	<0,001	48,92	0,38
Schnelligkeit/Geschicklichkeit (BOT _{S&G}), Faktor	-0,90 (0,44)	0,92 (0,38)	<0,001	400,84	0,84
Kraft (BOT _{Kraft}), Faktor	-0,89 (0,35)	0,92 (0,48)	<0,001	377,87	0,83
Exekutive Funktionen					
Arbeitsgedächtnis (LS), Punkte	7,27 (2,50)	17,88 (2,21)	<0,001	408,58	0,84
Selbstregulation (HF)					
HF _{korrekt-diff} , Genauigkeit, %	17,29 (26,24)	1,46 (9,03)	0,001	13,02	0,14
HF _{Rt-diff} , Reaktionszeit, ms	97,28 (181,47)	30,45 (40,02)	0,026	5,17	0,06
Selektive Aufmerksamkeit (FF _{korrekt}), Genauigkeit, %	60,88 (21,50)	91,03 (4,42)	<0,001	75,45	0,49
Kognitive Flexibilität (WCST _{Fehler}), perseverative Fehler, %	24,37 (15,90)	11,78 (4,24)	<0,001	37,02	0,33

Altersabhängige Differenzen in den aufgabenspezifischen Relationen zwischen motorischen und exekutiven Funktionen

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen sind in Tabelle 8 dargelegt. In der Gruppe der jungen Erwachsenen führte die Aufnahme der EFs in die Regressionsgleichungen für die jeweiligen motorischen Fähigkeiten (d. h. Model 2 (M2)) zu keiner signifikanten Änderung der Varianzaufklärung. Das heißt, die Varianz der motorischen Leistungen konnte überwiegend durch die Einflussnahme der anderen charakteristischen Faktoren, die in Model 1 (M1) inkludiert wurden (Alter, Geschlecht, Verarbeitungsgeschwindigkeit, BMI), aufgeklärt werden. Für die Gruppe der Vorschulkinder zeichnete sich ein anderes Bild ab. Die Aufnahme der EFs in die Regressionsgleichungen (d. h. Model 2) führte zu einer signifikanten Steigerung der Varianzaufklärung (über die Varianz hinaus, die durch Model 1 aufgeklärt werden konnte) für die motorischen Bereiche Handgeschicklichkeit, Schnelligkeit und Geschicklichkeit und Kraft (ΔR^2 Spanne: 0,19 – 0,38, alle Δp 's < 0,03). Dabei konnte interessanterweise lediglich die Arbeitsgedächtnisleistung signifikante Varianzanteile in all den betroffenen motorischen Bereichen bei Vorschulkindern aufklären (Schnelligkeit und Geschicklichkeit = 23%, Kraft = 31%, Handgeschicklichkeit = 43%).

Tabelle 8: Ergebnisse der multiplen hierarchischen Regressionen bei Kindern und Erwachsenen zur Prädiktion von motorischen durch exekutive Funktionen. Die standardisierten kognitiven Variablen (LS, HF_{Fehler-diff} bzw. HF_{Rt-diff}, FF_{Fehler}, WCST_{Fehler}) wurden als separate Regressionen in Model 2 (M2) eingefügt, um die Varianzaufklärung für jede einzelne motorische Fähigkeit (jeweils bei Kindern und bei Erwachsenen) zu ermitteln. Geschlecht, Alter, Body-Mass-Index (BMI) und Verarbeitungsgeschwindigkeit (E-VG) gingen in Model 1 (M1) in die Regressionsgleichungen ein. Dargestellt sind die adjustierten R² – Werte (Varianzaufklärung in der jeweiligen motorischen Funktion durch alle Prädiktoren) basierend auf dem Model (Model 1 oder 2) das signifikant mehr Anteil an der Varianzaufklärung der motorischen Funktion hat und die Werte der Veränderungsstatistik (ΔR^2 , ΔF , df_1 , df_2 , Δp) von M1 und M2, d. h. wie viel erklärte Varianz kann zusätzlich durch die Berücksichtigung der EFs generiert werden, nachdem für die moderierenden Faktoren kontrolliert wurde. Faktoren/Variablen, die einen signifikanten Anteil in der Varianzaufklärung der motorischen Funktion einnehmen, sind in der letzten Spalte (Prädiktoren) aufgelistet.

	Gruppe	Model	adjustiertes R ²	ΔR^2	ΔF	Δdf_1	Δdf_2	Δp	Prädiktoren
Handgeschicklichkeit (PP_{grob})	Kinder	M2	0,641	0,377	7,083	4	27	<0,001	Arbeitsgedächtnis (LS), $\beta = 0,654$, $p < 0,001$
	Erwachsene	M1	0,334	0,092	1,417	4	31	0,252	BMI, $\beta = -0,328$, $p = 0,041$ Geschlecht, $\beta = 0,464$, $p = 0,002$
Gleichgewicht (SEBT)	Kinder	M1	0,173	0,085	0,920	4	28	0,466	BMI, $\beta = -0,377$, $p = 0,021$ Geschlecht, $\beta = 0,335$, $p = 0,040$
	Erwachsene	M1	0,213	0,056	0,664	4	31	0,622	Geschlecht, $\beta = -0,431$, $p = 0,008$
Schnelligkeit und Geschicklichkeit (BOT_{s&g})	Kinder	M2	0,458	0,190	3,046	4	28	0,029	Arbeitsgedächtnis (LS), $\beta = 0,481$, $p = 0,003$ BMI, $\beta = -0,510$, $p = 0,001$ Verarbeitungsgeschwindigkeit, $\beta = -0,282$, $p = 0,043$
	Erwachsene	M1	0,285	0,098	1,398	4	31	0,258	Verarbeitungsgeschwindigkeit, $\beta = -0,308$, $p = 0,031$ Geschlecht, $\beta = -0,545$, $p = 0,001$
Kraft (BOT_{Kraft})	Kinder	M2	0,387	0,313	4,589	4	28	0,006	Arbeitsgedächtnis (LS), $\beta = 0,559$, $p = 0,001$
	Erwachsene	M1	0,431	0,062	1,076	4	31	0,358	Verarbeitungsgeschwindigkeit, $\beta = -0,411$, $p = 0,002$ Geschlecht, $\beta = -0,608$, $p < 0,001$

Die im Anschluss durchgeführten follow-up Korrelationen (Abbildung 4) konnten ein detaillierteres Bild über die spezifischen Relationen von motorischen und exekutiven Funktionen bei Vorschulkindern und jungen Erwachsenen darstellen (d. h. über die Regressionsanalysen hinausgehend). Auch eine mögliche Veränderung des Domänenzusammenspiels kann so veranschaulicht werden. In der Gruppe der jungen Erwachsenen waren bessere Leistungen in der Handgeschicklichkeit signifikant mit besseren Performances in der Inhibition/Selbstregulation assoziiert ($r = -0,30$, $p = 0,03$), während ein höherer Wert für die Schnelligkeits- und Geschicklichkeitskomponente mit besseren Leistung in der kognitiven Flexibilität einherging ($r = -0,33$, $p = 0,02$). Die Gleichgewichtsleistungen korrelierten dagegen positiv mit der Arbeitsgedächtniskapazität ($r = 0,28$, $p = 0,046$). In der Gruppe der Vorschulkinder zeigte sich, dass die Arbeitsgedächtnisleistung mit fast allen (Gleichgewicht ausgenommen) motorischen Funktionen assoziiert war (Handgeschicklichkeit: $r = 0,75$, $p < 0,001$; Schnelligkeit & Geschicklichkeit: $r = 0,55$, $p < 0,001$; Kraft: $r = 0,47$, $p = 0,002$). Dies ist womöglich ein Indiz dafür, dass bessere Leistungen in allen drei genannten motorischen Bereichen mit einer höheren Arbeitsgedächtniskapazität verknüpft sind. Zusätzlich dazu, waren bei Kindern höhere Werte in der Handgeschicklichkeit signifikant mit einer besseren Inhibition/selektiven Aufmerksamkeit assoziiert ($r = 0,38$, $p = 0,01$) und höhere Kraftwerte mit signifikant besserer Inhibition/Selbstregulation ($r = -0,32$, $p = 0,03$) gekoppelt.

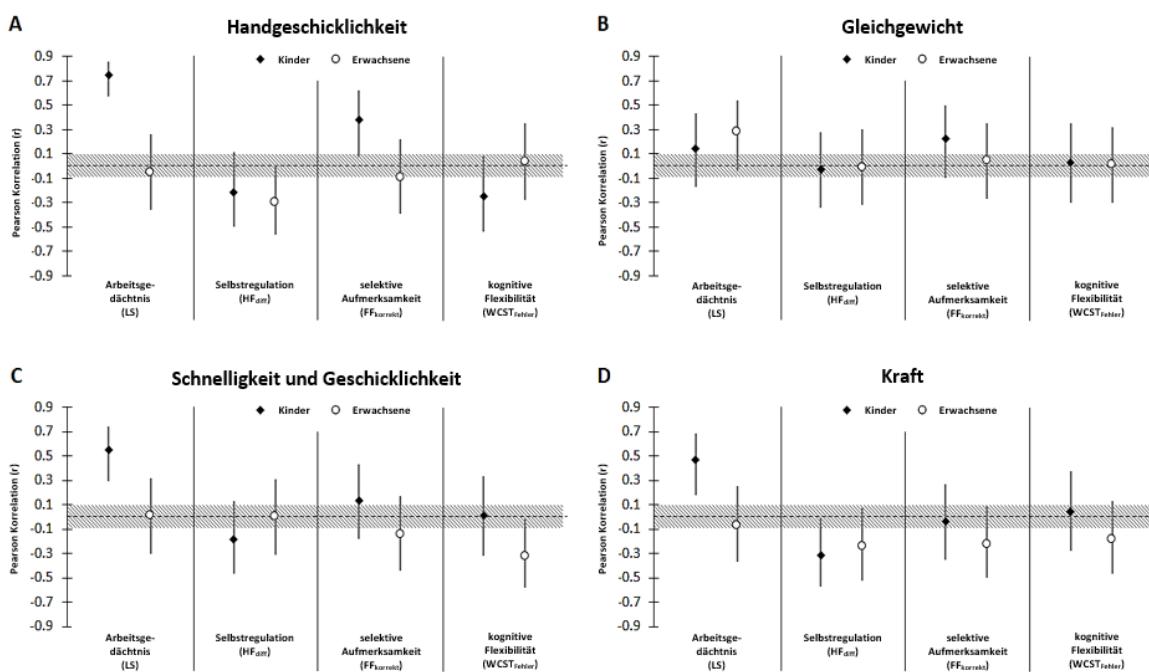


Abbildung 4: Partielle Korrelationen zwischen den motorischen Fähigkeiten (A) Handgeschicklichkeit, (B) Gleichgewicht, (C) Schnelligkeit und Geschicklichkeit und (D) Kraft, sowie den Tests zur Erfassung der exekutiven Funktionen (Arbeitsgedächtnis, Inhibition/Selbstregulation, Inhibition/selektive Aufmerksamkeit, kognitive Flexibilität) bei Vorschulkindern und jungen Erwachsenen. Die Fehlerbalken zeigen die 95% Konfidenzintervalle der Pearson Korrelationskoeffizienten an. Der grau schraffierte Bereich markiert die Zone ($-0,1 < r < 0,1$) ohne Effekt. Die jeweiligen Korrelationen wurden entsprechend dem Ergebnis der Regressionsanalyse, falls notwendig für Geschlecht, BMI und/oder Verarbeitungsgeschwindigkeit korrigiert.

4.3 Diskussion

Das Zusammenspiel zwischen motorischen und exekutiven Funktionen nimmt im Laufe der Entwicklung von der Kindheit bis zum frühen Erwachsenenalter vermutlich unterschiedliche Ausprägungen und Formen an. Das Ziel der Studie war es (1) die Spezifik des Zusammenspiels im Kindes- und Erwachsenenalter nachzuweisen (H1) und (2) detailliertere Aussagen über eine mögliche Veränderung vom Kindes- zum Erwachsenenalter treffen zu können (H3). In Übereinstimmung mit vorangegangenen Arbeiten (Casey et al., 2005; Deutsch & Newell, 2004; Payne & Isaacs, 2012) übertrafen die Leistungen der jungen Erwachsenen die der Vorschulkinder in allen getesteten motorischen und kognitiven Bereichen. Angesichts der enormen sowohl qualitativen (z. B. effizientere Bewegungsmuster; vgl. Motor Development Task Force, 1995) als auch quantitativen (verbesserte Gleichmäßigkeit, Zeit bis zur Maximalgeschwindigkeit, motorische Planung; vgl. Payne & Isaacs, 2012; Stöckel & Hughes, 2015) Steigerungen in der motorischen Entwicklung von der frühen Kindheit bis zum jungen Erwachsenen ist dieses Ergebnis nicht überraschend. Auch bezüglich der Entwicklung der EFs wurden bereits vorher bedeutsame Reifeentwicklungen von der frühen Kindheit, über die Pubertät hin zum Erwachsenenalter nachgewiesen (De Luca et al., 2003; Huizinga, Dolan, & van der Molen, 2006; Zelazo et al., 2004). Dabei wurde argumentiert, dass die Weiterentwicklungen höherer kognitiver Kontrollprozesse, die mit dem Älterwerden eines Kindes einhergehen, aus der Reifung des Frontallappens und anderer spezifischer Hirnregionen (parietal, temporal oder hippocampal; Andrés, 2003; Casey et al., 2005) und einem Anstieg der weißen und grauen kortikalen Substanz resultieren (Giedd et al., 1999; Gogtay et al., 2004).

Von besonderem Interesse sind jedoch die Ergebnisse der vorliegenden Studie, in welchen das Zusammenspiel exekutiver und motorischer Funktionen zwischen den beiden Altersgruppen vergleichend dargestellt wird. Hier zeigten sich grundlegende Unterschiede sowohl im Hinblick auf die Spezifik als auch die Stärke des Zusammenhangs. Die Arbeitsgedächtniskapazität konnte in der Gruppe der Vorschulkinder einen großen Anteil in der Varianz in der Handgeschicklichkeit (43%), der Kraft (31%) und der Schnelligkeit und Geschicklichkeit (23%) aufklären. Demnach war die Arbeitsgedächtnisleistung mit nahezu allen motorischen Anforderungen (mit Ausnahme des Gleichgewichts) positiv assoziiert. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen deuteten weiterhin darauf hin, dass 1) die Kinder mit einem besseren Arbeitsgedächtnis auch bessere Leistungen in der Handgeschicklichkeit, der Kraft und der Komponente Schnelligkeit und Geschicklichkeit verzeichneten, 2) die Kinder mit besserer Inhibition/selektiver Aufmerksamkeit auch eine höhere Handgeschicklichkeit aufzeigen konnten und 3) diejenigen Kinder mit höheren Werten in der Inhibition/Selbstregulation auch die besseren Kraftwerte hatten. Die Resultate folgen denen früherer Studien mit Vorschulkindern, die ebenfalls schwache bis moderate Zusammenhänge zwischen den motorischen Komponenten Handgeschicklichkeit/Auge-Hand-Koordination und grobmotorischen Fähigkeiten und den kognitiven Teilstrukturen Arbeitsgedächtnis und/oder inhibitorischer Kontrolle

berichten (Livesey et al., 2006; Oberer et al., 2017; Roebers et al., 2014; Röthlisberger et al., 2010; Stöckel & Hughes, 2016).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Vorschulkinder konnten die EFs bei den jungen Erwachsenen nicht bedeutsam zur Varianzaufklärung der motorischen Funktionsbereiche beitragen. Dies widerspricht den Ergebnissen der ersten Teilstudie und könnte darauf hindeuten, dass die genutzten Testmethoden in der vorangegangenen Studie sensitiver und/oder angemessen schwierig für die jungen Erwachsenen waren. Die *follow-up* Korrelationsanalysen offenbarten, hinsichtlich des Domänenzusammenspiels, trotzdem ein differenzierteres Bild als bei den Vorschulkindern. So waren die Leistungen in der Handgeschicklichkeit mit denen in der Inhibition/Selbstregulation assoziiert, die Performance in den Tests zur Schnelligkeit und Geschicklichkeit mit der in der kognitiven Flexibilität und die Gleichgewichtsfähigkeit korrelierte positiv mit der Arbeitsgedächtnisleistung. Obwohl nur wenige vorangegangene Studien das Domänenzusammenspiel (motorische und exekutive Funktionen) bei jungen Erwachsenen untersuchten (Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017; Studie 1), werden ihre Ergebnisse durch die vorliegende Arbeit gestützt. Die genannten Domänen scheinen im Erwachsenenalter (Stöckel et al., 2017; Studie 1) zu einem geringeren Ausmaß miteinander verzahnt (bzw. assoziiert) zu sein als das im Kindes- (z. B. Oberer et al., 2017) oder späteren Erwachsenenalter (Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017) der Fall ist.

Zusammengefasst weisen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung darauf hin, dass a) EFs im Vorschulalter ein größerer Einfluss auf die erfolgreiche Ausführung motorischer Anforderungen zugesprochen werden kann als im jungen Erwachsenenalter und dass b) bei jungen Erwachsenen verschiedene EFs mit spezifischen motorischen Funktionen assoziiert sind, während bei fünf- bis sechsjährigen Kindern das Arbeitsgedächtnis eine tragende Rolle einzunehmen scheint. Darüber hinaus wird durch die Resultate deutlich, dass generalisierte Aussagen über die Verzahnung motorischer und kognitiver Kompetenzen über unterschiedliche Altersgruppen bzw. Fähigkeitslevels und motorische Tests hinweg nicht möglich sind. Vielmehr scheint die Interaktion zwischen den Domänen im Laufe der Entwicklung dynamischen und strukturellen Veränderungen zu unterliegen, bevor sie im Erwachsenenalter durch die Ausreifung der EFs stabilere und vorhersagbarere Formen annimmt.

In der Literatur herrscht Einigkeit darüber, dass EFs im Laufe der Entwicklung einer Differenzierung (bzw. einer erneuten Dedifferenzierung im Altersgang) unterliegen (de Frias et al., 2007; Garon et al., 2008; Garrett, 1946; Li et al., 2004; Shing et al., 2010). Demnach sind in der frühen Kindheit für gewöhnlich lediglich ein oder zwei und im jungen Erwachsenenalter drei EFs voneinander abgrenzbar (Miyake et al., 2000; Sébastien Monette et al., 2015; Usai et al., 2014). Monette et al. (2015) und Usai et al. (2014) begründeten ihre Forschungsergebnisse beispielsweise mit dem Vorliegen eines 2-Faktoren-Modells bei Kindern, mit Inhibition auf der einen und dem Arbeitsgedächtnis und der kognitiven Flexibilität auf der anderen Seite. Shing et al. (2010) argumentieren unterdessen, dass

Inhibition und Arbeitsgedächtnis bis zu einem Alter von 9,5 Jahren nicht als separate Funktionen betrachtet werden können. Im Zusammenhang mit den Arbeiten zur Differenzierung (bzw. Dedifferenzierung) der EFs über die Lebensspanne hinweg wurde in Studien mehrfach demonstriert, dass sich die Wirkzusammenhänge der EFs untereinander im Laufe der Entwicklung verändern (Best et al., 2009; Chevalier et al., 2012; Senn et al., 2004).

Darüber hinaus werden den einzelnen EFs unterschiedliche Entwicklungsverläufe zugeschrieben (Best & Miller, 2010; De Luca & Leventer, 2008; Diamond, 2013). Das Arbeitsgedächtnis und die inhibitorische Kontrolle gelten in der Kindheit bspw. zwar als eng miteinander verknüpft (Davidson, Amso, Anderson, et al., 2006; Shing et al., 2010), dennoch wird der Verlauf des Arbeitsgedächtnisses von der Vorschulzeit bis zur Pubertät als linear beschrieben, während die Entwicklung der Inhibition nach einem rapiden Anstieg im Vorschulalter einen eher moderaten Zuwachs verzeichnen soll (Best & Miller, 2010). Diesem Argument folgend und unter Einbezug der vorliegenden Ergebnisse ist anzunehmen, dass das Arbeitsgedächtnis bei Vorschulkindern jene exekutive Funktion darstellt, welche im ausreichend entwickelten Zustand vorliegt (d. h. sinnvoll einsetzbar ist) (Dennis, 1989) und somit vorzugsweise genutzt wird, um neue, komplexe oder schwierige Situationen zu meistern. Diesem Ansatz folgend, wären nur jene EFs in der Lage motorische Aufgaben zu unterstützen, die bereits zu einem bestimmten, zuverlässig nutzbaren Level entwickelt bzw. ausgereift sind. Andernfalls werden vermutlich lediglich (Kern-) EFs genutzt, die bereits besser ausgereift sind, um den „Mangel“ an kognitiver Kontrolle auszugleichen. Alternativ könnte aber auch argumentiert werden, dass sich EFs, die zur Lösung komplexer Aufgaben herangezogen werden, im Laufe der Entwicklung ändern, da gut trainierte EFs von sich noch entwickelnden EFs abgelöst werden, um diese durch die vermehrte Nutzung zur Weiterentwicklung zu stimulieren (Best et al., 2009). Ungeachtet der zugrundeliegenden Mechanismen weisen sowohl die vorliegende als auch vorangegangene Studien (Livesey et al., 2006; Michel, Kauer, et al., 2011; Roebers & Kauer, 2009; Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016; Studie 1) darauf hin, dass kognitive Prozesse, die zur Ausführung motorischer Handlungen herangezogen werden, vermutlich abhängig von der untersuchten Altersgruppe (bzw. intraindividuellen Reifeprozessen) sind. Die Annahme einer konstanten und konsequenten Verzahnung zwischen motorischer und exekutiver Domäne über die Lebensspanne hinweg ist demnach nicht begründbar. Vielmehr scheint der Link zwischen den beiden Funktionsbereichen adaptiv und durch die Reifung der EFs und die individuell empfundene Schwierigkeit der Aufgabe beeinflusst zu sein.

Die Studie liefert somit weitere Evidenz für Zusammenhänge zwischen motorischen und exekutiven Funktionen, als auch Hinweise darauf, wie sich das Zusammenspiel vom Kindes- hin zum Erwachsenenalter verändert. Trotzdem gibt es einige Limitationen, die für weitere Untersuchungen in diesem Forschungsfeld von Relevanz sein könnten. Erstens wurde mit den Vorschulkindern lediglich eine einzige, sich noch in der Entwicklung befindende, Altersgruppe getestet. In Anbetracht der

rasanten kognitiven und motorischen Entwicklung in den Vorschul- und Grundschuljahren wäre ein nächster Schritt, Kinder über ein breiteres Entwicklungsspektrum hinweg zu untersuchen und die gleichen Kinder in unterschiedlichen Altersabschnitten zu untersuchen. Nur so könnte tatsächlich der Einfluss der Entwicklung auf das Domänenzusammenspiel untersucht werden. Zweitens reglementieren methodologische Unterschiede (z. B. Auswahl an Tests und Variablen - sowohl die Motorik als auch die Kognition betreffend) immer auch die Vergleichbarkeit zu vorangegangenen Studien. Insofern kann die vorliegende Untersuchung streng genommen nur mit empirischen Arbeiten mit identischer Test- und Variablenauswahl verglichen werden. Allerdings bietet die Vielfalt der Messmethoden auch einen weitgehend unbeachteten Benefit hinsichtlich einer möglichen Generalisierung von Ergebnissen bzw. dem Finden von testspezifischen Effekten. Für zukünftige Studien wäre es sicherlich lohnenswert, für die Quantifizierung der EFs, nicht nur mehrere Tests einzusetzen, sondern auch mehrere mögliche Variablen (Genauigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit) anzugeben, da ein solches Vorgehen die Vergleich- und Generalisierbarkeit erhöhen könnte. Drittens soll das *task-impurity* Problem erwähnt werden, dass viele EF-Studien betrifft. Der Fakt, dass EF-Tests niemals lediglich eine spezifische EF testen (und testen können), sondern immer ein Konglomerat von verschiedenen EFs und anderen nicht-exekutiven Faktoren integrieren, erschweren eindeutige Schlussfolgerungen. Das heißt, wird der Zusammenhang zwischen einem bestimmten EF-Test und einer spezifischen motorischen Handlung bekundet, geschieht dies in der Bezugnahme darauf, dass ein Großteil der Varianz dieses EF-Tests in vorangegangenen Untersuchungen mit einer bestimmten EF erklärt werden konnte. Dabei muss jedoch auch immer anerkannt werden, dass auch andere EF-Komponenten im Spiel sind (Denckla, 1994; Hughes & Graham, 2002; van der Sluis et al., 2007). Ungeachtet der genannten Limitierungen leisten die Ergebnisse der vorliegenden Studie einen wichtigen Beitrag zur bestehenden Literatur im Fachgebiet, da sie darauf hinweisen, dass die Verzahnung von Motorik und Kognition stark von Entwicklungs- und Reifeprozessen beeinflusst wird (H3). Die Daten der Vorschulkinder deuten darauf hin, dass EFs (und hier vor allem das Arbeitsgedächtnis) bei nahezu allen motorischen Anforderungen zu einem gewissen Grad beteiligt sind – was im klaren Gegensatz zu den Daten der jungen Erwachsenen steht. Aus einer angewandten Sichtweise heraus impliziert dies, dass eine Vielzahl motorischer Trainingsmaßnahmen (ungeachtet der spezifischen motorischen Aufgabe) das Potential zur generellen Förderung kognitiver Fähigkeiten in der Altersgruppe der Vorschüler besitzt (Diamond, 2012; Diamond & Ling, 2016; Lakes & Hoyt, 2004). Die spezifischen (und schwachen) Zusammenhänge, die in der Gruppe der jungen Erwachsenen beobachtet werden konnten, weisen im Gegensatz dazu, eher darauf hin, dass eine (allgemeine) Förderung kognitiver Ressourcen durch motorisches Training schwieriger bzw. spezifisch vom gewählten motorischen Aspekt abhängig ist (H1).

5 Untersuchung der Kausalität zwischen exekutiven Funktionen und der Handgeschicklichkeit bei fünf- bis sechsjährigen Kindern (Studie 3)

In Studie 2 konnte gezeigt werden, dass sich das Zusammenspiel zwischen motorischen und exekutiven Funktionen zwischen Kindern und jungen Erwachsenen unterscheidet (H3). Während bei Vorschulkindern ein relativ hoher Prozentsatz der Varianz der motorischen Aufgaben durch exekutive Funktionen erklärt werden konnte, fällt der Anteil der gegenseitigen Einflussnahme der Domänen bei jungen Erwachsenen deutlich geringer aus bzw. entfällt gänzlich. Dies ist insofern bedeutsam als das generelle Aussagen über die Interaktion der Domänen nicht möglich sind, da sie sich im Laufe der Entwicklung verändert bzw. abschwächt. Bei 5- bis 6-jährigen Vorschulkindern korrelierten insbesondere der motorische Aspekt der Handgeschicklichkeit und die kognitive Komponente des Arbeitsgedächtnisses miteinander (H1). Die Annahme, dass Visuomotorik und EFs (z. B. das Arbeitsgedächtnis) gerade im frühen Kindesalter eine gewisse Ko-Entwicklung durchlaufen, wird auch durch andere Korrelationsstudien und Übersichtsarbeiten gestützt (siehe Studie 2; McClelland & Cameron, 2019; Payne & Isaacs, 2012; Roebers et al., 2014; Stöckel & Hughes, 2016). Ungeklärt ist jedoch, ob der ermittelte Zusammenhang kausaler Natur ist oder ein indirektes Ursache-Wirkungsgefüge wiederspiegelt (Bewick et al., 2003).

Die übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit beschäftigt sich mit der optimalen Förderung von EFs im Vorschulalter. Damit die Handgeschicklichkeit als kausaler Faktor und damit als möglicher Interventionsinhalt zur Verbesserung der EFs bestimmt werden kann, muss ein direkter Zusammenhang zwischen beiden Bereichen identifiziert werden. Zur Beantwortung dieser Frage sind folglich Interventionsstudien, wie die vorliegende Teilstudie 3, die bspw. durch ein Handgeschicklichkeitstraining versuchen systematisch Einfluss auf die Arbeitsgedächtnisleistung zu nehmen, unerlässlich. Da immer wieder auf die Spezifität des Motorik-Kognitions-Zusammenhangs verwiesen wird (McClelland & Cameron, 2019; Studie 1), sollten zudem die verschiedenen Komponenten des Arbeitsgedächtniskonstrukt Beachtung finden. Gathercole, Pickering, Ambridge, & Wearing (2004) bestätigten in ihrer Studie das von Baddeley (1986) und Baddeley & Hitch (1974) postulierte Multikomponenten-Modell ab einem Alter von spätestens sechs Jahren. Demnach besteht das Arbeitsgedächtnis aus einer koordinierenden zentralen Exekutive sowie zwei unterstellten Subsystemen – das verbale (auch: phonologische Schleife) und das visuell-räumliche (auch: visuell-räumlicher Notizblock) Kurzzeitgedächtnis. Die drei Speichersysteme bilden, vergleichbar zu den exekutiven Funktionen, ein Konstrukt aus korrelierenden aber abgrenzbaren Komponenten (Gathercole, Pickering, Ambridge, et al., 2004). Entwicklungsbedingte Veränderungen im Beziehungsgeflecht, wie sie bei den EFs nachgewiesen wurden (Senn et al., 2004), sind jedoch nicht bekannt.

Interventionsstudien zur Aufklärung kausaler Zusammenhänge zwischen motorischen und kognitiven Funktionen gibt es mittlerweile in einem relativ großen Umfang (vgl. Tabelle 3). Deren methodische

Vorgehensweisen sind jedoch in etwa so heterogen wie die der Korrelationsstudien (vgl. Tabelle 1) und beziehen meist nicht mehrere Arbeitsgedächtniskomponenten oder/und die Handgeschicklichkeit mit ein (wohl aber koordinative Elemente). Lakes und Hoyt (2004) untersuchten beispielsweise die Auswirkungen eines dreimonatigen traditionellen Tae-Kwon-Do-Trainings auf EFs bei 5- bis 11-Jährigen. Nach dem Training verzeichnete die Interventionsgruppe signifikant bessere Inhibitionssleistungen. Auf die Leistungen des verbalen Kurzzeitgedächtnisses, erhoben durch eine Aufgabe zum Zählen nachsprechen (WISC-III; Wechsler, 1991), hatte das Training jedoch keinen Effekt. Koutsandréou et al. (2016) fokussierten sich auf die Wirksamkeit eines Ausdauer- und eines Koordinationstrainings auf die Arbeitsgedächtnisleistung bei 9- bis 10-Jährigen. Nach zehn Wochen profitierte vor allem die Gruppe vom Training, die koordinative Aufgaben, wie bspw. Balancieren und bilaterale Übungen, absolviert hatte. Sie erzielten signifikant bessere Leistungen in einer komplexen Merkaufgabe, die der zentralen Exekutive zuzuordnen ist, als die Kontrollgruppe. Alesi et al. (2016) führten mit 8- bis 9-Jährigen ein 6-monatiges Fußballtraining durch und betrachteten dabei verschiedene Komponenten des Arbeitsgedächtnisses sowie die Inhibition und die Planungsfähigkeit. Nach dem Training zeigten die Kinder der Interventionsgruppe nicht nur signifikant bessere Leistungen im motorischen Parameter der Gewandtheit, sondern vor allem im visuell-räumlichen Kurzzeitgedächtnis und in etwas geringerem Ausmaß in der zentralen Exekutive. Auch die Leistungen in der selektiven Aufmerksamkeit und der Planungsfähigkeit profitierten vom koordinativ angelegten Fußballtraining.

Die exemplarische Ergebnisdarstellung vorangegangener Interventionsstudien macht deutlich, dass motorisch-koordinativen Übungsprogrammen zur Schulung von exekutiven Funktionen zu Recht ein gewisses Potential nachgesagt wird. Aus zusammenfassenden Betrachtungen und neuropsychologischen Erkenntnissen bestätigen Diamond (2000, 2012) und Diamond und Ling (2016), dass Bewegungsprogramme ein vielversprechendes Interventionsmittel sein können, weil beide Domänen, d. h. Motorik und Kognition - durch dieselben Hirnareale gesteuert werden (u. a. Kleinhirn und PFC), wenn gewisse Rahmenbedingungen gegeben sind. Beispielsweise sind sowohl Teile des Cerebellums als auch des PFC aktiv, wenn eine Aufgabe, egal welcher Art, schwierig und neu ist, Konzentration und schnelle Reaktionen erfordert und wechselnden Bedingungen unterliegt, sodass der Abruf eines automatisierten Musters unmöglich ist. Weiterhin betonen die Autoren, dass eintöniges Lauf- und Krafttraining unter allen Trainingsformen diejenigen repräsentieren, die am wenigsten Einfluss auf die Entwicklung der EFs nehmen. Dass, dem entgegengesetzt, gerade bimanuelle, koordinative und visuomotorische Übungen, als die am spätesten ausgereiften bzw. komplexesten motorischen Fähigkeiten, das Potential besitzen, kognitive Funktionen anzusprechen, wird dagegen auch von anderen Autoren unterstrichen (Koziol et al., 2014; Leisman et al., 2014; McClelland & Cameron, 2019; Schmahmann, 1996; Serrien et al., 2007; van der Fels et al., 2015). Basierend auf dem Fakt, dass besonders diejenigen mangelnde EFs aufweisen, die Traurigkeit, Stress

oder Einsamkeit empfinden (u. a. Dopaminüberschuss im PFC; Cacioppo & Patrick, 2008; Campbell et al., 2006; Cerqueira, Mailliet, Almeida, Jay, & Sousa, 2007; Desseilles et al., 2009; Roth, Tam, Ida, Yang, & Deutch, 1988) betont Diamond (2012), dass vor allem diejenigen Ansätze das Potential besitzen EFs zu fördern, die neben der direkten auch die indirekte Trainingsroute bedienen (vgl. Abbildung 2). Förderprogramme sollten demnach auch Freude, soziales Miteinander und ein Gefühl von Stolz vermitteln, um EFs wirkungsvoll entwickeln zu können.

Die Bemühungen, EFs fördern zu wollen, sind nachvollziehbar. EFs und speziell das Arbeitsgedächtnis gelten gerade im Vorschulalter als ein besserer Prädiktor für den späteren Schulerfolg als der Intelligenzquotient (Alloway & Alloway, 2010; Cameron et al., 2015; Carlson et al., 2013; Michel et al., 2019). Alloway & Alloway (2010) sprechen dem Arbeitsgedächtnis dabei sogar die Funktion eines Flaschenhalses zu, der über das Leistungs- und Lernpotential eines Kindes entscheidend mitbestimmt. Studienergebnisse von Gathercole & Alloway (2008) untermauern ebenfalls die Relevanz und die Prävalenz von Arbeitsgedächtnisdefiziten beim Lernen. In einer Klasse mit 30 Schülern wird jeweils vier bis fünf Schülern eine mangelnde Arbeitsgedächtniskapazität, die sich in geringen Lernfortschritten widerspiegelt, zugeschrieben. Mit mathematischen Fähigkeiten wurden dabei vor allem die zentrale Exekutive und das visuell-räumliche Kurzzeitgedächtnis wiederholt in Verbindung gebracht (Bull et al., 2008; Kyttälä et al., 2003; McKenzie et al., 2003). Trotz enger Verzahnung von motorischer (z. B. Handgeschicklichkeit) und kognitiver Domäne (z. B. Arbeitsgedächtnis) im jungen Kindesalter (siehe Studie 2; McClelland & Cameron, 2019) und starker Relevanz für spätere Schulleistungen (Alloway & Temple, 2007; Cadoret et al., 2018; Michel et al., 2013; Michel, Roethlisberger, et al., 2011; Roebers et al., 2014; Vandenbroucke et al., 2017), ist speziell die Gruppe der 5- bis 6-jährigen Vorschüler in Interventionsstudien unterrepräsentiert. Zugleich beurteilten Vandenbroucke et al. (2017) jedoch gerade die Zeit vor dem Schuleintritt als prädestiniert für EF-Fördermaßnahmen.

Das primäre Ziel der vorliegenden Studie liegt deshalb in der Überprüfung der Wirksamkeit eines Handgeschicklichkeitstrainings auf die verschiedenen Arbeitsgedächtniskomponenten bei Vorschulkindern zwischen fünf und sechs Jahren. Der Nachweis möglicher Transferleistungen durch verbesserte Arbeitsgedächtnisfunktionen und/oder feinmotorische Fähigkeiten auf andere exekutive Funktionen (Inhibition, kognitive Flexibilität) und numerisch-rechnerische Fähigkeiten bildet das sekundäre Ziel.

Auf der Grundlage der bisherigen Literatur wird angenommen, dass ein vierwöchiges Handgeschicklichkeitstraining, welches zudem den Empfehlungen von Diamond (2012) folgt, die Arbeitsgedächtnisfunktionen von 5- bis 6-Jährigen fördern kann, da den Domänen ein Zusammenspiel in diesem Alter zugeschrieben wird. Sowohl die Feinmotorik als auch das Arbeitsgedächtnis befinden sich in diesem Lebensalter noch in der Entwicklung und stellen somit schwierige und komplexe Anforderungen an diese Altersgruppe (De Luca & Leventer, 2008; Moreau & Conway, 2013; Payne & Isaacs, 2012). Weiterhin wird vermutet, dass vor allem die zentrale Exekutive und das visuell-

räumliche KZG die Arbeitsgedächtniskomponenten darstellen, die am meisten von einem Feinmotoriktraining profitieren könnten, da diese sowohl in Korrelationsstudien (Studie 2; Oberer et al., 2017; Roebers et al., 2014; Stöckel & Hughes, 2016) als auch in Interventionsstudien (Alesi et al., 2016; Koutsandréou et al., 2016) mit Aspekten der Feinmotorik bzw. der Koordination in Verbindung gebracht wurden.

Hinsichtlich der Transfereffekte wird bisher davon ausgegangen, dass Trainings, die spezifische EFs ansprechen, nur wenig Übertrag auf andere EFs oder akademische Leistungen erbringen können (Diamond & Ling, 2016; Redick et al., 2015; Tomporowski et al., 2015). Der Übertrag motorischer Förderprogramme auf mathematische Kompetenzen ist jedoch einer der am besten belegtesten (Resaland et al., 2016; Singh et al., 2018; Telford et al., 2012). Zusammengefasst ist die Datenlage zwar inkonsistent, lässt aber vermuten, dass Verbesserungen im numerisch-mathematischen Bereich nach einem freud- und sozialbetonten Handgeschicklichkeitstraining möglich sind, wohingegen Transfereffekte auf Inhibition und kognitive Flexibilität kaum erwartet werden können. Hinsichtlich der allgemeinen Forschungsfrage, wie sich EFs im Vorschulalter optimal fördern lassen, soll die vorliegende Studie demnach zur Aufklärung bzw. Bestätigung der folgenden Hypothese (H4) verhelfen, die an dieser Stelle spezifiziert wird:

Kausalität: Ein vierwöchiges Handgeschicklichkeitstraining, welches zudem Freude und Miteinander vermittelt, führt zu Verbesserungen in spezifischen Komponenten der Arbeitsgedächtnisleistung bei 5-6-jährigen Kindern.

5.1 Untersuchungsmethodik

5.1.1 Probanden

An der Untersuchung nahmen insgesamt 50 Vorschulkinder im Alter zwischen 5 und 6 Jahren (Altersspanne = 62-79 Monate; mittleres Alter = $69,28 \pm 4,99$ Monate; 25 männlich) teil. Sowohl die Testungen als auch die Intervention fanden ca. 11 bis 8 Monate vor Schuleintritt in den jeweiligen Kindergärten der Kinder statt. Im Vorab wurde von allen Eltern das schriftliche Einverständnis eingeholt. Zudem füllten die Erziehungsberechtigten einen kleinen Fragebogen aus, in welchem Kontrollvariablen wie Alter, Geschlecht, Gewicht, Kitaaufenthalt in Monaten, therapeutische Maßnahmen, sportliche Aktivität pro Woche in Stunden und Fernseh- und Videospielverhalten erhoben wurden (Tabelle 9). Den Kindern stand es dennoch jederzeit frei, die Testsituation zu verweigern oder abzubrechen. An der Intervention (IG) zur Förderung der Handgeschicklichkeit nahmen 20 Kinder teil, in der Kontrollgruppe (KG) befanden sich 25 Kinder. Die Zuordnung zu den Gruppen erfolgte quasi-randomisiert je nach Kitazugehörigkeit. Eine Versuchsperson nahm urlaubsbedingt lediglich an zwei von 12 möglichen Tagen an der Intervention teil und blieb deshalb in den weiteren Analysen unberücksichtigt.

Tabelle 9: Demographische Daten und deskriptive Statistik (Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern)) aller erhobenen Kontrollvariablen für die Interventions- und Kontrollgruppe, sowie die Ergebnisse der F-Test Statistik zur Prüfung von Unterschieden zwischen den Gruppen.

	Interventionsgruppe (IG; n = 21)	Kontrollgruppe (KG; n= 25)	p	F	η^2
männlich, n (%)	10 (50)	10 (40)	0,502	-	-
Alter, Jahre	69,00 (4,22)	70,40 (5,33)	0,343	0,918	0,021
BMI, kg/m ²	14,73 (1,91)	14,93 (1,85)	0,747	0,105	0,003
Kitaaufenthalt, Monate	48,70 (12,46)	56,92 (5,60)	0,005	8,716	0,169
sportliche Aktivität, min in der Woche	202,25 (159,39)	88,20 (72,76)	0,003	10,192	0,192
Nutzung TV/Spielekonsolen, min am Tag	41,60 (31,03)	38,42 (20,08)	0,680	0,173	0,004

5.1.2 Ablauf und Testauswahl von Prä- und Posttest

5.1.2.1 Untersuchungsverlauf

Der Prätest, zur Erhebung des Ausgangsniveaus und der Posttest, zur Einschätzung des Einflusses einer Handgeschicklichkeitsintervention auf die EFs beinhalteten exakt die gleiche Testbatterie. Zur Erfassung der feinmotorischen Fertigkeiten kamen zwei Instrumente zur Anwendung: 1) das *Purdue Pegboard* zur Messung der Handgeschicklichkeit und 2) der Untertest Handgeschicklichkeit des *Bruininks-Oseretsky Tests of Motor Proficiency (BOT-2)*. Die kognitiven Tests umfassten für das Arbeitsgedächtnis 1) den *list-sorting* Test zur Beurteilung der zentralen Exekutive, 2) den *Corsi-Block-Tapping* Test zur Messung der visuell-räumlichen Komponente des Arbeitsgedächtnisses sowie 3) eine Aufgabe zur Erfassung der Gedächtnisspanne/phonologischen Schleife aus dem Sprachentwicklungs-test für drei- bis fünfjährige Kinder (SETK 3-5). Weiterhin wurden 4) eine *Flanker* Aufgabe zur Erhebung der Inhibition/selektiven Aufmerksamkeit, 5) zwei Komponenten des *Hearts & Flowers* Test zur Erfassung der Inhibition/Selbstregulation und der kognitiven Flexibilität, sowie 6) die Vorschulversion des TEDI-MATH zur Einschätzung mathematischer Vorkenntnisse und 7) einen *simple reaction time* Test zur Messung der einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit genutzt.

Der Test zur Erfassung der phonologischen Schleife/Gedächtnisspanne ist ein nicht computerisierter Test. Alle anderen kognitiven Parameter wurden, vergleichbar zu Studie 1 und 2, mittels *Presentation*® - (Neurobehavioral Systems Inc., Berkeley, USA) oder *PEBL Software (Psychology Experiment Building Language Software; PEBL, v0.14; Mueller & Piper, 2014)* durchgeführt.

Die Tests der Testbatterie sind schnell durchführbar und konnten somit in zwei bis drei Tagen in Sitzungen von jeweils 30-40 Minuten absolviert werden. Insgesamt wurden die Tests auf fünf Stationen aufgeteilt, welche in randomisierter Reihenfolge durchlaufen wurden. Zwischen Prä- und Posttest lagen dabei vier Wochen, in denen ein Handgeschicklichkeitstraining an drei Tagen in der Woche durchgeführt wurde (12 Einheiten). Die Posttestung fand an den gleichen Wochentagen und

der gleichen Tageszeit wie die Prätestung statt, um den Einfluss des Tagesrhythmus und nicht-kontrollierbarer Freizeitaktivitäten so gering wie möglich zu halten.

5.1.2.2 Testauswahl

Tests zur Erfassung der motorischen Fähigkeiten

Feinmotorik: Zur Einschätzung der Handgeschicklichkeit wurde das *Purdue Pegboard* (Tiffin & Asher, 1948) eingesetzt. Durchführung und Variablenauswahl ($PP_{\text{groß}}$) sind identisch zur Studie 2. Weiterhin kam der Untertest Handgeschicklichkeit des BOT-2 zur Anwendung (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005). Dieser besteht aus den fünf Aufgaben: Kreise punktieren, Münzen transportieren, Stifte einstecken, Karten sortieren und Würfel auffädeln. Für jede der Aufgaben hatten die Kinder 15 Sekunden Zeit, bevor die Anzahl der Items notiert wurde, die gesteckt, transportiert oder punktiert wurden. Als abhängige Variable (BOT_{HG}) diente die Einzelpunktwertsumme. Maximal konnten 45 Punkte erreicht werden.

Tests zur Erfassung der kognitiven Fähigkeiten

Bei der Auswahl der Tests zur Erfassung der EFs wurde sich erneut, wie schon in Studie 1 und 2 am Modell von Diamond (2013) orientiert. Da in der aktuellen Studie jedoch ausschließlich 5- bis 6-Jährige untersucht wurden, weichen Test- und Variablenauswahl teilweise ab. Die Tests zur Erfassung der zentralen Exekutive (LS) und der visuell räumlichen Komponente (CBT_{Summe}) des Arbeitsgedächtnisses als auch jener zur Einschätzung der einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit (E-VG) sind jedoch identisch zur Auswahl in Studie 1 und/oder 2 und werden deshalb hier nicht erneut beschrieben (Corsi, 1972; Kessels et al., 2000; Kiselev et al., 2009; Tulsky et al., 2013, 2014). Erwähnt werden muss, dass die Gesamtsumme der *Corsi Block-Tapping Test*-Leistung in die Berechnungen einging und nicht der Wert der maximal erreichten Gedächtnisspanne. Dieser Wert wurde für die Kinder genutzt, weil er durch eine höhere Sensitivität differenziertere Aussagen ermöglicht.

Arbeitsgedächtnis: Neben dem *Listsorting* (LS) und dem *Corsi Block-Tapping Test* (CBT_{Summe}) wurde mit der Erfassung der Wortspanne aus dem Sprachentwicklungstest für drei- bis fünfjährige Kinder (SETK 3-5; Grimm, Aktas, & Frevert, 2010) eine weitere Komponente des Arbeitsgedächtnisses erfasst – die phonologische Schleife (Baddeley, 2010). Der Untersucher präsentierte den Kindern im Abstand von ca. einer Sekunde hochfrequente kurze Wörter. Diese sollten im Anschluss aus dem Gedächtnis wiedergegeben werden. Der Test startete mit zwei Wörtern und wurde, sobald mindestens einer von jeweils zwei Versuchen korrekt war, um ein Wort (bis höchstens sechs Wörter) erhöht. Die Anzahl aller korrekt wiedergegebenen Versuche wurde durch zwei dividiert, bevor die Summe dieses Ergebnisses mit zwei gebildet wurde (Kessels et al., 2000). Die abhängige Variable (SETK) konnte somit einen maximalen Wert von 8,0 annehmen.

Inhibitorische Kontrolle/selektive Aufmerksamkeit: Äquivalent zu Studie 1 und 2 wurde auf einem Bildschirm mit Touchfunktion (Philips 231C5TJKFU/00) ein *Flanker Test* durchgeführt (Zaitchik et al., 2014; McDermott et al., 2007). Dabei wurden pro Durchgang fünf blaue, in einer Reihe befindliche, Fische dargeboten und die Probanden dazu aufgefordert, auf die Blickrichtung des mittleren Fisches schnellstmöglich mit dem Drücken der rechten oder linken Pfeiltaste zu reagieren. Abermals gab es vier Konditionen (neutral, kein Ablenkerfisch, kongruent, inkongruent), eine Griffstange zur Wahrung des Abstandes der Zeigefinger zum Bildschirm und eine Stimuluszeit von 1500 ms. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Studien wurde in der aktuellen Untersuchung allerding lediglich die *classic* Version mit den blauen Fischen eingesetzt, um ein für die Kinder spezifischeres Maß für die selektive Aufmerksamkeit zu erhalten. Um diese nutzen zu können, wurde die Anzahl der Durchgänge auf 51 (drei Durchgänge á 17 Versuche) erhöht. Als abhängige Variable (FF_{korrekt}) diente das Genauigkeitsmaß über alle Bedingungen hinweg, wobei nur die korrekten Versuche in die Analysen eingingen, die nicht unter 250 ms oder mit einer Zeit von zwei Standardabweichungen über dem individuellen Mittelwert (Wright & Diamond, 2014) beantwortet wurden.

Inhibitorische Kontrolle/Selbstregulation: Der Test zur Erfassung der selbstregulatorischen Fähigkeit auf Verhaltensebene war erneut der *Hearts & Flowers Test* (Diamond et al., 2007; Wright & Diamond, 2014). Das Testprocedere war identisch zu Studie 2. Da in der aktuellen Studie jedoch nur Vorschüler und keine Erwachsenen teilnahmen wurde die Stimuluszeit auf 1500 ms erhöht. Als abhängige Variable (HF_{korrekt-diff}) diente erneut die Differenz der korrekten Antworten aus dem zweiten inkongruenten Block (Blumen) im Vergleich zum ersten kongruenten Block (Herzen). Durchgänge die in unter 250 ms oder zwei Standardabweichungen über dem individuellen Mittelwert beantwortet wurden, blieben in den Analysen erneut unberücksichtigt (Wright & Diamond, 2014).

Kognitive Flexibilität: Als Einschätzung der kognitiven Flexibilität wurde der dritte Block (Mix Kondition) des *Hearts & Flowers Test* herangezogen. Im Unterschied zu Studie 1 betrug die Stimuluszeit 1500 ms (Studie 1: 750 ms). Das Procedere war jedoch identisch. Den Kindern wurden in randomisierter Reihenfolge Herzen und Blumen präsentiert, wobei auf das Erscheinen eines Herzen mit dem Drücken der Taste auf derselben Seite reagiert werden musste und bei Präsentation einer Blume mit der gegenüberliegenden Taste geantwortet werden sollte. Die Aufgabe erforderte einen ständigen Wechsel zwischen zwei Regeln und beinhaltet deshalb Aspekte der kognitiven Flexibilität (Diamond, 2013). Als abhängige Variable (HF_{korrekt-mix}) diente das Genauigkeitsmaß (Davidson, Amso, Anderson, et al., 2006).

Mathematische Vorkenntnisse: Mittels deutscher Version des TEDI-MATH (Kaufmann et al., 2009; Van Nieuwenhoven et al., 2001) wurden erste numerisch-rechnerische Fertigkeiten erhoben, um den Transfer möglicher Verbesserungen der exekutiven Funktionen auf akademische Leistungen zu evaluieren. Zur Vorschulversion im letzten Kindergartenjahr gehören die fünf Subtests: Zählprinzipien, Abzählen, Entscheidung arabische Zahl, Entscheidung Zahlwort und Rechnen mit Objektabbildungen.

Pro richtiger Antwort gab es in den einzelnen Subtests einen Punkt. Als abhängige Variable ($TEDI_{\text{Summe}}$) diente die Summe dieser Punkte über alle Tests hinweg. Maximal konnten 53 Punkte erreicht werden.

5.1.3 Intervention

Nach Diamond (2012) gibt es zwei Wege EFs zu trainieren: die direkte und die indirekte Route (vgl. Abbildung 2). Die direkte Route nimmt ohne Umwege Einfluss auf die EFs. Dies geschieht z. B. durch das Behalten von komplexen Informationen oder Bewegungsabfolgen im Gedächtnis, durch Aufgaben mit hohen Anforderungen an das Konzentrationsvermögen oder durch die Notwendigkeit eines schnellen Hin- und Herschaltens zwischen wechselnden Bedingungen. Die indirekte Route ist von ebenso hoher Relevanz. Sie wirkt vermutlich durch die Verringerung von Stress, Traurigkeit und Einsamkeit über den Weg der Dopaminreduktion im PFC auf die EFs ein (Cerqueira et al., 2007; Diamond, 2014; Roth et al., 1988). Sind negative Gefühle präsent, stehen sie demnach der Entwicklung von EFs ungünstig gegenüber (Diamond, 2012, 2014). Diamond (2012) schlussfolgerte deshalb, dass die Interventionsprogramme, die das größte Potential besitzen EFs zu fördern, diejenigen sind, die sowohl direkt an der Verbesserung der EFs arbeiten als auch durch das Schaffen von Freude, Stolz und sozialer Integration indirekt zur Verbesserung der EFs beitragen. In Anlehnung an das Modell von Diamond (2012, 2014) wurde deshalb für die vorliegende Studie ein Training der Feinmotorik konzipiert, bei dem durch die Beachtung von direkter und indirekter Route das Arbeitsgedächtnis gefördert werden sollte.

5.1.3.1 Ablauf der Intervention - indirekte Route

Freude, Stolz und ein soziales Zusammengehörigkeitsgefühl sollten durch die Rahmenbedingungen des Trainings geschaffen werden. Sinnstiftend wurde das Interventionsprogramm als „Piratentraining“ betitelt. Während das Ausfüllen einer Schatzkarte durch die Aufgaben im Prätest führte, stand am Ende des „Piratentrainings“ mit dem Posttest die offizielle Aufnahme ins „Piratenteam“ (Vergabe von Piratennamen und Verteilung von Augenklappen) bevor.

Das Training fand in Kleingruppen mit jeweils fünf Kindern statt, die trotz der selbstständig zu lösenden motorischen Aufgaben ein Team bildeten. Nach Beendigung einer Station erhielten die Kinder Legobausteine in ihren individuellen Farben. War die Leistung unter großer Anstrengung erfolgt und/oder besser als im vorherigen Versuch, gab es drei Bausteine. Konnte die Leistung konstant gehalten werden, gab es zwei Bausteine und bei Verschlechterung trotz Anstrengung gab es noch immer einen Baustein. Am Ende des Trainings fügte der Interventionsleitende die Bausteine der einzelnen Kinder zu einem Turm zusammen und besprach diesen mit ihnen, lobte und motivierte dabei und gab konstruktive Hinweise. So konnten die Kinder ihren Turm immer mit dem Turm der vorherigen Tage vergleichen, ihren Anteil daran erkennen und trotzdem das Gefühl haben, den Turm als Team zum Wachsen gebracht zu haben. Die Aufgaben und die Verteilung der Bausteine wurden so

gewählt, dass als Bezugsnorm immer die persönliche Leistung eines jeden Kindes gewertet wurde und dass bei Anstrengung immer ein höherer Turm zustande kommen konnte. Die Aufgaben in den fünf Stationen wurden je drei Mal für je eine Minute durchgeführt. Damit weder Langeweile noch Routine entstand, wurde die Übungsdauer somit recht kurz gehalten und zudem mit Piratenmusik begleitet. Das Einspielen der Piratenlieder wurde so zum positiven Signal für den Beginn der Konzentrationsphase.

5.1.3.2 Inhalte der Intervention - direkte Route

Durch die Literaturrecherche (u. a. Koutsandréou et al., 2016; Michel, Roethlisberger, et al., 2011; Oberer et al., 2017; Stöckel & Hughes, 2016; van der Niet et al., 2016) und den Ergebnissen aus Studie 2 wurde für die aktuelle Untersuchung angenommen, dass zwischen der Handgeschicklichkeit und den Arbeitsgedächtnisfähigkeiten ein kausaler Zusammenhang bestehen könnte. Das Training der genannten motorischen Fertigkeiten wurde dementsprechend in den Fokus der Intervention gerückt, um die Arbeitsgedächtniskapazität als EF womöglich direkt anzusprechen bzw. zu fördern. Nach den Empfehlungen von Diamond (2012) wurde bei der Erarbeitung darauf geachtet, dass andauernde und ausreichende Herausforderungen an die Kinder gestellt werden. Aufgrund dessen und der Ergebnisse von Studie 1 (Aufgabenschwierigkeit) wurde die Aufgabenkomplexität von Woche eins zu Woche drei erhöht. In der vierten Woche wurden die Aufgaben aus den vorangegangenen Wochen wiederholt. So wurden in der ersten Runde die Aufgaben aus der ersten Woche, in Runde zwei die Aufgaben der zweiten Woche und in Runde drei die Aufgaben der dritten Woche durchgeführt. Aufgabenbereiche, die in jeder Einheit durchgeführt wurden, werden im Folgenden als „konstante Stationen“ bezeichnet. Um auch etwas Variation innerhalb der Wochen bieten zu können, wurde in jeder Sitzung ein vorheriger Aufgabenbereich durch einen neuen ersetzt. Diese Stationen werden im Folgenden als „wechselnde Stationen“ bezeichnet.

Die Inhalte der einzelnen Stationen (Anhang A) orientierten sich am *Pegboard* (Tiffin & Asher, 1948) und den zwei Subskalen „Handgeschicklichkeit“ und „feinmotorische Genauigkeit“ des BOT (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005) und wurden davon ausgehend modifiziert, um ein angemessenes Schwierigkeitslevel über die Wochen hinweg zu halten. Insgesamt gab es fünf Stationen, die nacheinander dreimal jeweils eine Minute durchgeführt wurden. Zwischen den Durchgängen gab es eine Pause von ebenfalls einer Minute. Die Trainingseinheiten nahmen ca. 30 - 35 Minuten in Anspruch.

Station 1/konstant: An der ersten Station wurden Aufgaben am *Pegboard* (Tiffin & Asher, 1948) gelöst. Während in der ersten Woche ausschließlich mit der dominanten Hand so viele Stäbchen wie möglich in den Löchern platziert werden sollten, wurde in der zweiten Woche die nicht-dominante Hand genutzt und in der dritten Woche bimanuell gesteckt.

Station 2/wechselnd: Die zweite Station beinhaltete zwei Fertigkeiten. Zum einen das Auffädeln von Würfeln (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005), Holzkugeln und Steckperlen, zum anderen das Falten eines „Himmel und Hölle“-Spiels in sechs Schritten (Anhang B).

Station 3/wechselnd: Auch die dritte Station beinhaltete zwei immer komplexer werdende Übungsinhalte. Das Transportieren von Münzen aus dem Handgeschicklichkeitsteil des BOT (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005) wurde durch den Austausch der Münzen durch Steckperlen und Linsen in den Wochen zwei und drei modifiziert bzw. erschwert. Das Ausschneiden eines Kreises aus dem Test der feinmotorischen Genauigkeit des BOT (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005) wurden in der zweiten Woche durch einen Stern und in der dritten Woche durch einen Dinosaurier ersetzt.

Station 4/konstant: An der vierten Station ging es über alle Wochen hinweg um das Nachzeichnen von Spuren. Die Aufgaben (eckige und runde Spur) wurden in den ersten beiden Wochen dem Untertest „feinmotorische Genauigkeit“ aus dem BOT (BOT-2, Blank et al., 2014; Bruininks, 2005) entnommen. In der dritten Woche wurde eine kompliziertere Version in Form einer Schlange angeboten.

Station 5/konstant: An der fünften Station nutzen die Kinder ein Steckbrett und Steckperlen, um äquivalent zur ersten Station, in der ersten Woche nur mit der dominanten und in der zweiten Woche nur mit der nicht-dominanten Hand Steckperlen auf dem Brett zu platzieren, bevor in der dritten Woche beide Hände gleichzeitig genutzt werden sollten.

5.1.4 Datenanalyse

Die Daten von 45 Probanden bildeten die Grundlage der statistischen Berechnungen. Einleitend wurden alle erhobenen kognitiven und motorischen Variablen auf Normalverteilung und Varianzhomogenität hin geprüft. Daraufhin wurden im ersten Schritt separate Varianzanalysen (ANOVAs) mit Messwiederholung für die zwei motorischen Variablen (PP_{grob} , BOT_{HG}) gerechnet, um den direkten Effekt des feinmotorischen Trainings zu überprüfen. Dabei bildete die Gruppe (IG, KG) den Zwischensubjekt- und die Zeit (Prä-, Posttest) den Innersubjektfaktor. Als Effektstärke wurde das partielle Eta-Quadrat (η^2) berechnet. Dabei galt $0.01 \leq \eta^2 < 0.06$ als schwacher Effekt, $0.06 \leq \eta^2 \leq 0.14$ als mittlerer Effekt und $\eta^2 > 0.14$ als großer Effekt (vgl. Cohen, 1988). Im zweiten Schritt wurde die Wirkung des feinmotorischen Trainings auf die einzelnen Arbeitsgedächtniskomponenten berechnet, um zu sehen, ob trainingsinduzierte Veränderungen sich innerhalb des Arbeitsgedächtniskonstrukts unterscheiden (d. h. LS, CBT und SETK entsprechend als Maß für die zentrale Exekutive, das visuell räumliche KZG und das verbale KZG). Dazu wurde eine Arbeitsgedächtnisleistung (LS, CBT_{Summe} , SETK) x Zeit (Prä-, Posttest) x Gruppe (IG, KG) ANOVA gerechnet. Alle erhobenen Variablen, die als Maße für das Arbeitsgedächtnis dienten, wurden, bevor sie in die Analysen eingingen, z-standardisiert. Um Transfereffekte eines feinmotorischen Trainings auf andere EFs (naher Transfer) als das Arbeitsgedächtnis abschätzen zu können, wurden im dritten Schritt separate Zeit (Prä-, Posttest) x

Gruppe (IG, KG) ANOVAs für die Maße der Inhibition/Selbstregulierung, Inhibition/selektive Aufmerksamkeit und kognitiven Flexibilität durchgeführt. Zur Einschätzung des Effektes eines feinmotorischen Trainings auf numerisch-mathematische Kompetenzen (weiter Transfer) im Vorschulalter wurde ebenfalls eine Zeit (Prä-, Posttest) x Gruppe (IG, KG) ANOVA durchgeführt. Weiterhin wurden mit Hilfe von paarweisen Post-hoc-Vergleichen (Nutzung der Šidák-Adjustierung) signifikante Haupt- und Interaktionseffekte (kontrolliert für Alter, Geschlecht, Aufenthalt in der Kita, sportliche Aktivität, Nutzung elektronischer Geräte) abgeklärt.

5.2 Ergebnisse

Tabelle 10 zeigt die Rohwerte aller durchgeführten Tests für die Kontroll- und die Interventionsgruppe zum Prä- und zum Posttest.

Tabelle 10: Rohwerte (nicht adjustierte Mittelwerte und Standardabweichungen) für alle motorischen und exekutiven Funktionen, numerisch-mathematische Fähigkeiten und Verarbeitungsgeschwindigkeit zum Prä- und zum Posttest für die Interventions (IG)- und die Kontrollgruppe (KG).

	Prätest		Posttest	
	IG	KG	IG	KG
Arbeitsgedächtnis				
Zentrale Exekutive / List Sorting (LS)	9,20 (2,17)	10,12 (2,68)	10,95 (3,32)	10,60 (2,80)
Visuell-räumliches KZG / Corsi Block-Tapping (CBT _{Summe})	16,15 (6,84)	18,12 (12,01)	21,85 (11,38)	18,48 (9,04)
Verbales KZG / Merkspanne Wörter (SETK)	4,75 (0,60)	4,70 (0,68)	5,28 (0,68)	4,98 (0,57)
Motorische Funktionen				
Handgeschicklichkeit (PP _{grob})	28,72 (3,30)	27,49 (3,47)	32,97 (3,25)	28,88 (4,42)
Handgeschicklichkeit (BOT _{HG})	19,80 (2,97)	17,48 (3,55)	24,55 (4,38)	18,80 (3,37)
Weitere Exekutive Funktionen				
Selbstregulation (HF) HF _{korrekt-diff} , Genauigkeit, %	-8,33 (15,05)	-3,82 (21,84)	-4,58 (13,10)	-8,33 (10,13)
Selektive Aufmerksamkeit (FF) FF _{korrekt} , Genauigkeit, %	71,37 (12,08)	75,74 (15,27)	87,26 (7,27)	86,77 (10,12)
Kognitive Flexibilität (HF) HF _{korrekt-mix} , Genauigkeit, %	-0,60 (17,45)	-3,83 (17,40)	0,66 (8,55)	-2,17 (11,15)
Mathematische Kompetenzen und Verarbeitungsgeschwindigkeit				
Numerische-mathematische Fähigkeiten (TEDI _{Summe})	37,15 (7,42)	38,16 (6,04)	40,15 (4,90)	41,72 (4,20)
Verarbeitungsgeschwindigkeit E-VG, ms	492,49 (83,41)	487,83 (103,75)	450,04 (59,34)	452,53 (80,15)

Wirkung eines feinmotorischen Trainings auf die Handgeschicklichkeit

Die Datenanalyse zeigte signifikante Zeit x Gruppe-Interaktionen für die beiden Tests zur Erfassung der Handgeschicklichkeit (*Pegboard*: $F(1,38) = 15,63$, $p < .001$, $\eta^2 = .29$; BOT_{HG} : $F(1,38) = 11,32$, $p = .002$, $\eta^2 = .23$). Dabei legten die Post-hoc-Analysen offen, dass die Kinder in der Interventionsgruppe (*Pegboard*/mittlere Differenz = 4.66, $\text{BOT}/\text{Handgeschicklichkeit}$ /mittlere Differenz = 4.76, beide p 's $< .001$) signifikant höhere Leistungszuwächse vom Prä- zum Posttest zeigten als die Kinder der Kontrollgruppe (*Pegboard*: $MD = 1.06$, $\text{BOT}/\text{Handgeschicklichkeit}$: $MD = 1.31$, p 's $> .04$). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

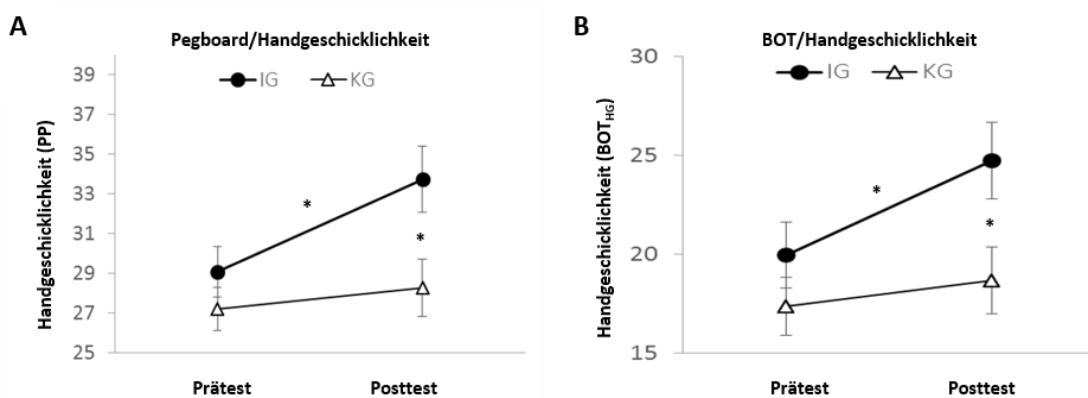


Abbildung 5: Leistungen der Kontroll- (KG) und der Interventionsgruppe (IG) in den Tests zur Handgeschicklichkeit (A: *Pegboard*, B: *BOT-2*) zum Zeitpunkt des Prätests und dem nach dem Handgeschicklichkeitstraining stattgefundenen Posttest. Das feinmotorische Training führte (im Vergleich zum Vorlesen) zu Verbesserungen in der Handgeschicklichkeit. Die Daten wurden für Alter, Geschlecht, Zeit in der Kita, sportliche Aktivität und Nutzung elektronischer Geräte kontrolliert. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall. * = $p \geq .05$.

Wirkung eines feinmotorischen Trainings auf die Arbeitsgedächtnisleistung

In der Analyse der Daten zeigte sich eine Zeit x Gruppe Interaktion für die Arbeitsgedächtnisleistung im Gesamten ($F(1,38) = 4,52$, $p = .04$, $\eta^2 = .11$). Dabei ergaben die Post-hoc- Vergleiche, dass sich Kontroll- und Interventionsgruppe im Posttest ($p = .03$), nicht aber im Prätest ($p = .99$) signifikant voneinander unterschieden (Abbildung 6). Die Veränderung vom Prä- zum Posttest in der Arbeitsgedächtnisleistung war dabei lediglich in der Interventionsgruppe ($p = .04$) von statistischer Relevanz.

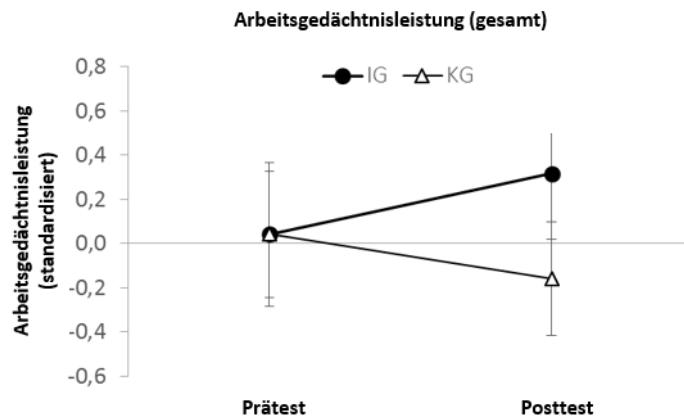


Abbildung 6: Standardisierte Arbeitsgedächtnisleistung für die Kontroll- (KG) und die Interventionsgruppe (IG), gemittelt über die drei Tests zur Erfassung der verschiedenen Arbeitsgedächtniskomponenten, zum Prä- und zum Posttest. Das feinmotorische Training resultierte (im Vergleich zum Vorlesen) in einer verbesserten Arbeitsgedächtnisleistung. Die Daten wurden für Alter, Geschlecht, Zeit in der Kita, sportliche Aktivität und Nutzung elektronischer Geräte kontrolliert. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall.

Bei Betrachtung der einzelnen Arbeitsgedächtniskomponenten (zentrale Exekutive, visuell-räumliches KZG, verbales KZG) ergaben die Berechnungen keine statistisch signifikanten Veränderungen vom Prä- zum Posttest (alle F 's $< 1,48$, alle p 's $> .23$), obgleich die Tendenz deutlich wird, dass vor allem die zentrale Exekutive und das visuell räumliche KZG von einem feinmotorischen Training profitieren können, während die phonologische Schleife unverändert bleibt. Die Leistungsunterschiede von Prä- zu Posttest, für die drei Arbeitsgedächtniskomponenten separat betrachtet, finden sich in Abbildung 7.

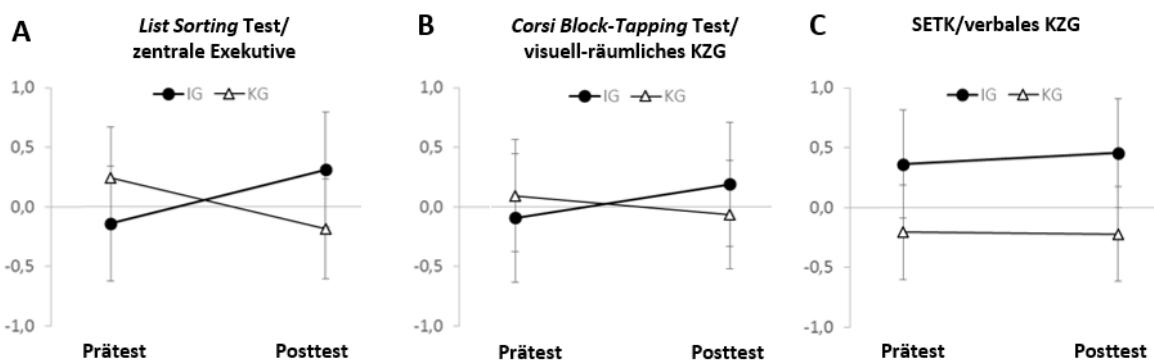


Abbildung 7: Die Leistungen von Kontroll- (KG) und Interventionsgruppe (IG) in den einzelnen Arbeitsgedächtnistests zur Erfassung (A) der zentralen Exekutive (List Sorting-Test), (B) dem visuell-räumlichen KZG (CBT) und (C) dem verbalen KZG (SETK/Merkspanne) zum Prä- und zum Posttest. Keine der Gruppe erzielt signifikante Leistungszuwächse. Die zentrale Exekutive und das visuell-räumliche KZG profitieren jedoch zu einem höheren Ausmaß als das verbale KZG von einem feinmotorischen Training (im Vergleich zum Vorlesen). Die Daten wurden für Alter, Geschlecht, Zeit in der Kita, sportliche Aktivität und Nutzung elektronischer Geräte kontrolliert. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall.

Wirkung eines feinmotorischen Trainings auf weitere exekutive Funktionen und numerisch-mathematische Kompetenzen

Die Analysen ergaben für keine der EFs, die neben dem Arbeitsgedächtnis erhoben wurden, Zeit x Gruppe-Interaktionen (alle F 's $< .05$, alle p 's $> .67$). Für die Inhibition/selektive Aufmerksamkeit lag ein statistisch signifikanter Haupteffekt für Zeit vor ($F(1,37) = 62,91, p < .001, \eta^2 = .63$), der darauf hinweist, dass beide Gruppen im Posttest (87,0 % korrekt) deutlich weniger Fehler als im Prätest (73,6% korrekt) machten. Auch die Leistung im Test zur Erfassung der einfachen Verarbeitungsgeschwindigkeit stieg in beiden Gruppen vom Prä- (490,01 ms) zum Posttest (450,69 ms) deutlich an ($F(1,37) = 11,18, p = .002, \eta^2 = .23$).

Für die Leistung im TEDI-Math zur Erfassung der numerisch-mathematischen Fähigkeiten gab es ebenfalls einen Haupteffekt für die Zeit ($F(1,38) = 28,35, p < .001, \eta^2 = .43$), der darauf schließen lässt, dass sowohl die Interventions- als auch die Kontrollgruppe sich vom Prä- (36,69) zum Posttest (40,93) deutlich steigern konnten. Weitere Haupt- oder Interaktionseffekte wurden nicht gefunden.

5.3 Diskussion

Das primäre Ziel der vorliegenden Studie war es, den in Studie 2 ermittelten Zusammenhang zwischen Handgeschicklichkeit und Arbeitsgedächtnis auf Kausalität hin zu prüfen (H4). Weiterhin sollte durch die Hinzunahme unterschiedlicher Arbeitsgedächtniskomponenten (zentrale Exekutive, visuell-räumliches KZG, verbales KZG) eruiert werden, ob es sich dabei um eine spezifische Verbindung zu einer bestimmten Arbeitsgedächtniskomponente handelt oder das Zusammenspiel globaler Natur ist (H1). Das sekundäre Ziel lag in der Identifizierung möglicher Transfereffekte. Dazu wurde untersucht, ob die durch ein Handgeschicklichkeitstraining womöglich verbesserten Arbeitsgedächtnisleistungen sich auch auf die Leistung anderer EFs oder numerisch-mathematischer Fähigkeiten auswirken.

Wirkung des Handgeschicklichkeitstrainings auf die Arbeitsgedächtnisfunktionen

Die vorliegende Untersuchung liefert erste Hinweise darauf, dass ein nur vierwöchiges Handgeschicklichkeitstraining bei normal entwickelten Vorschulkindern zu Verbesserungen der Arbeitsgedächtniskapazitäten führen kann. In der Interventionsgruppe folgte auf signifikante Verbesserungen im *Pegboard* (großer Effekt; $\eta^2 = .29$) und den Untertests zur Handgeschicklichkeit im BOT (BOT_{HG}: $\eta^2 = .23$) ein signifikanter Zuwachs der Arbeitsgedächtnisleistung ($\eta^2 = .11$). Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Entwicklung zwischen den einzelnen Arbeitsgedächtniskomponenten, obgleich das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis und die zentrale Exekutive im Vergleich zur phonologischen Schleife stärker von einem Handgeschicklichkeitstraining zu profitieren schienen.

Die Trainierbarkeit einzelner Arbeitsgedächtniskomponenten konnte bereits in anderen direkten (u. a. Henry, Messer, & Nash, 2014; Holmes, Gathercole, & Dunning, 2009; Thorell, Lindqvist, Bergman

Nutley, Bohlin, & Klingberg, 2009; Arbeitsgedächtnistraining) und indirekten (u. a. Alesi et al., 2016; Hsieh et al., 2017; Koutsandréou et al., 2016; motorisches Training) Interventionsstudien nachgewiesen werden. Indirekte Interventionsstudien, die sich dabei ebenfalls eines koordinativ anspruchsvollen motorischen Trainings bedienten, nutzten im Gegensatz zur vorliegenden Studie vorzugsweise grobmotorische Übungen und Kinder im Schulalter als Probanden, weshalb die Möglichkeit der Einordnung der vorliegenden Ergebnisse limitiert ist. Übereinstimmend mit der vorliegenden Untersuchung berichten die genannten Studien jedoch von Verbesserungen der Arbeitsgedächtnisleistung im Bereich der zentralen Exekutive (Koutsandréou et al., 2016) und des visuell-räumlichen Gedächtnisses (Alesi et al., 2016; Hsieh et al., 2017), nicht aber im verbalen Kurzzeitgedächtnis (Alesi et al., 2016).

Wirkmechanismen, die die ermittelte Interaktion erklären könnten, wurden vor allem in neurowissenschaftlichen Studien untersucht. So beschreiben beispielsweise Foyer-Lea und Matthews (2004), dass eine motorische Fähigkeit automatisiert abläuft, wenn sie wiederholend geübt wird und dass dies zu einer Reduktion an benötigten kognitiven Ressourcen führt. So sollen erste Berührungen mit einer motorischen Aufgabe vor allem auf Wechselwirkungen zwischen dem *DLPFC* und dem *nucleus caudatus* beruhen, während die fortlaufende Automatisierung einer Bewegung zu einer schwächer werdenden Aktivierung in diesen Bereichen führt. Diamond (2000) führt in diesem Zusammenhang an, dass Bereiche im Gehirn, die bei einer neuen, komplexen und schwierigen Aufgabe aktiv sind, für motorische und kognitive Herausforderungen die gleichen sind. So sind der *nucleus caudatus*, wie auch das *cerebellum* und der *DLPFC*, Teile des neuronalen Systems, das sowohl für motorische als auch für kognitive Prozesse von Bedeutung ist.

Neben neurowissenschaftlichen Studien, die Rückschlüsse auf Wirkmechanismen zulassen, konnte zudem in behavioristischen Untersuchungen die Mitwirkung visuell gesteuerter motorischer Aktivitäten an der Entwicklung exekutiver Funktionen im Kindesalter dargelegt werden (Studie 2; Becker, Miao, Duncan, & McClelland, 2014; Cameron et al., 2012, 2015; MacDonald et al., 2016). Dabei zeigten zum Beispiel MacDonald und Kollegen (2016), dass die bei drei- bis fünfjährigen Kindern im Herbst erhobenen Fähigkeiten der visuell motorischen Integration mit den im Frühling ermittelten EFs assoziiert waren. Zur Erklärung dieses Zusammenhangs mutmaßten die Autoren, dass visuell gesteuerte motorische Fähigkeiten, wie z. B. die Auge-Hand-Koordination die Grundlage für die Entwicklung von EFs bilden und berufen sich dabei u. a. auf die Arbeit von Adolph (2005). In ihrem „*learning to learn*“ - Ansatz schreibt die Autorin dem motorischen Lernen eine der Schlüsselrollen in der frühen Kindesentwicklung zu. Feinmotorische Handlungsausführungen könnten dabei einen Beitrag zu neuronalen Anpassungen leisten, die wiederum zur Bewältigung von kognitiven Aufgaben herangezogen werden können (Adolph, 2005). Der Befund der vorliegenden Studie, dass die Arbeitsgedächtnisleistung nach einem vierwöchigen Training in der Interventions-, nicht aber in der Kontrollgruppe gesteigert werden konnte, untermauert diese Theorie. Inwiefern ein Training des

Arbeitsgedächtnisses im Umkehrschluss Einfluss auf die Handgeschicklichkeit genommen hätte, kann zu diesem Zeitpunkt nicht beantwortet werden.

Traurigkeit, Stress und Einsamkeit können, durch Auswirkungen auf das Dopaminlevel im DLPFC ebenfalls zu schwächeren EFs führen (Cacioppo & Patrick, 2008; Cerqueira et al., 2007; Diamond, 2014; von Hecker & Meiser, 2005). Das Training in der vorliegenden Untersuchung sollte zur Erhöhung des Zusammengehörigkeitsgefühls beitragen und Gefühle wie Freude und Stolz hervorbringen. Insofern könnte das Interventionssetting auch auf der indirekten Route über das psychische Wohlbefinden (Diamond, 2012, 2014) zu den Verbesserungen der Arbeitsgedächtnisleistung beigetragen haben. Es bleibt jedoch offen, zu welchem Grad die positiven Entwicklungen der Interventionsgruppe durch das Handgeschicklichkeitstraining per se, das Interventionssetting oder beidem kombiniert hervorgerufen wurden, da die emotionalen Auswirkungen nicht explizit erfasst wurden.

Wirkung eines Handgeschicklichkeitstrainings auf weitere EFs und numerisch-mathematische Kompetenzen

Das sekundäre Ziel der Untersuchung lag in der Ermittlung von Transfereffekten auf andere exekutive Funktionen und mathematische Vorläuferfähigkeiten. Bezüglich der mathematischen Vorläuferfähigkeiten zeigte sich in den Voranalysen, vergleichbar mit anderen Untersuchungen (Bull et al., 2008; Kroesbergen et al., 2012; Kyttälä et al., 2003; McKenzie et al., 2003), ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem visuell-räumlichen Kurzzeitgedächtnis und den mathematisch-numerischen Kenntnissen im TEDI-MATH ($r = 0,274$, $p = 0,038$). Die bedeutsame Steigerung der Arbeitsgedächtniskapazität (mit Trends für das visuell-räumliche Kurzzeitgedächtnis und der zentralen Exekutive) in der Interventionsgruppe führte jedoch nicht zu Verbesserungen der numerisch-mathematischen Vorläuferfähigkeiten. Auch bei den weiteren EFs Inhibition und kognitive Flexibilität bewirkte das Training der Handgeschicklichkeit keine statistisch bedeutsamen Veränderungen.

Bei jungen Kindern wird eher von einem noch undifferenzierten Zustand der EFs ausgegangen (Garrett, 1946), bei welchem die einzelnen Komponenten des Konstruktions nicht klar voneinander abzugrenzen sind (Monette et al., 2015; Shing et al., 2010; Usai et al., 2014).

In vorangegangenen Studien wurde ebenfalls immer wieder deutlich, dass sich zwar die Arbeitsgedächtnisleistung durch ein Training steigern lässt, die (weiten) Transfereffekte auf mathematische Kompetenzen jedoch größtenteils ausblieben (Fälth et al., 2015; Henry et al., 2014). Redick et al. (2015) und Melby-Lervåg, Redick, & Hulme (2016) kamen deshalb in ihren Reviews der aktuellen Studienlage zu dem Schluss, dass ein Arbeitsgedächtnistraining nicht zu Verbesserungen im akademischen Kontext, wie z. B. arithmetischen Fähigkeiten, führt. Im Gegensatz dazu wiesen Kroesbergen et al. (2012) in ihrer Studie mit Vorschulkindern nach, dass vor allem ein

domainspezifisches, aber auch ein generelles Arbeitsgedächtnistraining zu Verbesserungen in Tests zur Erfassung mathematischer Vorläuferfähigkeiten führte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind mit denen der genannten Autoren nur bedingt vergleichbar, da das Arbeitsgedächtnis indirekt (durch ein Handgeschicklichkeitstraining) und nicht direkt mit Gedächtnisübungen geschult wurde. Es wird dennoch deutlich, dass Transfereffekte auf andere Fähigkeiten als der geschulten Kapazität eher selten nachgewiesen werden konnten und Trainings, die den weiten Transfer berichten, spezifische Trainingsmodi und/oder Inklusionskriterien wählten. Neben dem Fakt, dass in der aktuellen Studie eine motorische Intervention zur Förderung der Handgeschicklichkeit eingesetzt wurde, unterscheidet sie sich bspw. zu der Arbeit von Kroesbergen et al. (2012) auch in der Auswahl der Probanden. Während in der vorliegenden Untersuchung bezüglich der mathematischen Vorläuferfähigkeiten keine Vorauswahl getroffen wurde und die Kinder dementsprechend normalverteilte Leistungen aufwiesen, inkludierten Kroesbergen et al. (2012) lediglich Kinder, deren mathematische Vorkenntnisse im unteren Durchschnitt lagen (in der unteren Hälfte aller eingangs getesteten Kinder). Der genannte Sachverhalt und die Aussage von Diamond und Lee (2011), die betonen, dass vor allem die Kinder von einem Training profitieren, deren EFs schwach ausgeprägt sind, bieten möglicherweise eine Erklärung für die ausbleibenden Transfereffekte. Holmes et al. (2009) berichten zudem, dass das Arbeitsgedächtnistraining in ihrer Untersuchung erst sechs Monate nach Beendigung des Trainings zu Verbesserungen der mathematischen Fähigkeiten führte. Allerdings waren die Probanden in dieser Untersuchung mit zehn Jahren deutlich älter als in der vorliegenden Untersuchung und erhielten im Gegensatz zu der vorliegenden Untersuchung ein direktes Arbeitsgedächtnistraining. Diamond und Ling (2016) schlussfolgerten aus Ergebnissen wie diesen, dass positive Auswirkungen eines Trainings Zeit zur Verarbeitung benötigen und demnach direkt nach Beendigung einer Förderung nur in geringem Ausmaß oder gar nicht ersichtlich sind. Dies sei vor allem der Fall, wenn ein Training mehrere EFs anspricht (Bergman Nutley et al., 2011; Diamond & Ling, 2016). In einem Review von Singh und Kollegen (2018) kamen die Autoren ebenfalls zu dem Fazit, dass insbesondere mathematische Kompetenzen von physischer Aktivität profitieren können; nachgewiesene Effekte stammen jedoch ausnahmslos von Untersuchungen mit einer Mindestdauer von zwei Jahren (Donnelly et al., 2009; Ericsson, 2008; Telford et al., 2012).

Äquivalent zum Übertrag auf akademische Kompetenzen verhält es sich beim Übertrag auf andere EFs. Eine Studie mit Vier- bis Fünfjährigen von Thorell und Kollegen (2009) zeigte, dass ein Arbeitsgedächtnistraining sich weder positiv auf Inhibitionsleistungen noch auf höhere EFs (Diamond, 2013) wie bspw. Problemlösefähigkeiten auswirken konnte.

Braem und Hommel (2019) vermuten in dem Aspekt des fehlenden Transfers neben anderen Charakteristika, ein Indiz dafür, dass EFs kontextabhängige Prozesse darstellen, die auf assoziativen Lernmechanismen fußen. EFs wären dann nicht Teil eines genetisch fundierten kognitiven Starter-Kits,

sondern „*cognitive gadgets*“, die durch soziales Miteinander und kulturelles Lernen entwickelt werden (Braem & Hommel, 2019; Heyes, 2018). Damit ein Transfer in andere Domänen trotzdem möglich wird, empfehlen Tomporowski et al. (2015) die Integration metakognitiver Prozesse. Das bewusste Nachdenken über Strategien zur Lösung eines spezifischen (motorischen) Problems, könnte ein weiterer Ansatzpunkt sein, der darüber entscheidet, ob ein motorisches Training zu Transfereffekten auf akademische Leistungen führt oder nicht.

Ob ein Handgeschicklichkeitstraining zur Förderung der Arbeitsgedächtnisleistung nicht zu weiteren Transferleistungen führte, weil das Studiensample bereits normal entwickelte numerische und exekutive Funktionen besaß, der Interventionszeitraum zu kurz war, dass Setting keine metakognitiven Strategien vermittelte, erst die follow-up Untersuchung eine Verbesserung aufgedeckt hätte oder das Training motorischer Fähigkeiten generell keine weiten bzw. weiteren Transfereffekte hervorbringt, müssen weiterführende Studien klären. Methodische Fragen dieser Art sind bislang unzureichend geklärt, sollten aber bei der Suche nach effektiven Fördermaßnahmen weiterhin Beachtung finden (Diamond & Ling, 2016).

Die vorliegende Untersuchung liefert einen weiteren wichtigen Beitrag bei der Bestimmung wirkungsvoller Interventionsmaßnahmen zur Verbesserung der EFs. Die Inklusion normal entwickelter Vorschulkinder lässt in gewissem Maße eine Generalisierung der Ergebnisse zu. Allgemeingültige Aussagen sind dennoch unzulässig. Die *task-impurity Thematik* (Denckla, 1994; Hughes & Graham, 2002), der Einsatz von jeweils nur einem Test pro EF bzw. Arbeitsgedächtniskomponente und der relativ kleine Stichprobenumfang sind Faktoren, die das Ergebnis zu einem gewissen Anteil auf die spezifische Methodik und die spezifische Stichprobenauswahl begrenzen. Die vorliegenden Befunde machen jedoch deutlich, dass ein nur vier Wochen andauerndes Handgeschicklichkeitstraining das Potential besitzt, die Arbeitsgedächtnisleistung bei fünf- bis sechsjährigen normal entwickelten Vorschulkindern zu fördern. Dies ist insofern bedeutsam für die Praxis, als das gleich zwei, für das Lernen fundamentale, Prozesse angestoßen werden können (u. a. Cameron, 2018; McClelland & Cameron, 2019; Purpura, Schmitt, & Ganley, 2017).

6 Gesamtdiskussion und Ausblick

Das Vorliegen einer gewissen Interaktion zwischen motorischen und kognitiven Komponenten ist unbestritten (u. a. Diamond, 2000; Koziol et al., 2012; Leisman et al., 2016; von Hofsten, 2009). Auch alle drei Studien stützen diese Annahme, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung. Faktoren, die dieses Zusammenspiel modulieren und moderieren, sind bisher jedoch eher vage formuliert worden. Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurde deutlich, dass Arbeiten zum Zusammenhang zwischen motorischen und exekutiven Funktionen bisher lediglich diffuse und undifferenzierte Aussagen zum Domänenzusammenspiel liefern konnten. Ein Grund dafür ist mitunter die Heterogenität, mit der Studien in diesem Feld konzipiert werden. Die Heterogenität in z. B. der Auswahl der Probanden, der Tests und der Testvariablen ist selbstverständlich und erklärt sich durch die Komplexität und Inkonsistenz des Zusammenspiels.

Auf diese Lücke im Forschungsfeld soll in der nun abschließenden Betrachtung der Ergebnisse der drei Teilstudien Bezug genommen werden. Dazu werden die Befunde zunächst kurz skizziert und in den Kontext vorangegangener Studien eingeordnet. Die eingangs aufgestellten Hypothesen (H1, H2, H3, H4) werden kritisch hinterfragt und, wenn notwendig, präzisiert. Final wird dann versucht werden die Erkenntnisse zur Ableitung eines erweiterten theoretischen Rahmenkonzepts zur Planung und Durchführung von Interventionsstudien zu nutzen, um dem übergreifenden Ziel der Arbeit gerecht zu werden bzw. einem Schritt näher zu kommen.

6.1 Der Einfluss der Aufgabenspezifität auf das Domänenzusammenspiel

Mit der ersten Teilstudie sollte u. a. der Frage nachgegangen werden, in wieweit das Zusammenspiel zwischen motorischen und exekutiven Funktionen durch Aufgabenspezifität gekennzeichnet ist. Dazu wurde folgende Hypothese formuliert:

Aufgabenspezifität: Spezifische motorische Aufgaben sind mit spezifischen exekutiven Aufgaben assoziiert (H1).

Sowohl die Zusammenfassung der Korrelationsstudien zu Beginn der Arbeit (Tabelle 1) als auch die Ergebnisse aus Studie 1, die mit jungen Erwachsenen absolviert wurde (aber auch aus Studie 2 und 3 mit Vorschulkindern), stützen diese Hypothese (H1). Verschiedene motorische Funktionen sind mit spezifischen EFs assoziiert. Die zwei untersuchten motorischen Aufgaben unterschieden sich dabei nicht nur im Umfang der exekutiven Beteiligung, sondern auch in der Zusammensetzung exekutiver Teilprozesse. Während die genutzte Batterie an exekutiven Funktionen 26% der Varianzaufklärung in der Handgeschicklichkeitsperformanz aufklären konnte, waren es in der Balanceaufgabe mit 49% fast zweimal so viel. Die Performance in der Handgeschicklichkeitsaufgabe konnte dabei vor allem durch die Leistungen in den exekutiven Tests zur kognitiven Flexibilität/*set shifting*, dem Arbeitsgedächtnis

und der Planung aufgeklärt werden, wohingegen mit der Balanceaufgabe eher das Konglomerat aus kognitiver Flexibilität/*set shifting*, Inhibition/Selbstregulation und kognitiver Flexibilität/*response shifting* assoziiert war.

Der Vergleich bzw. die Einordnung dieser Ergebnisse in den aktuellen Studienpool ist schwierig, da junge Erwachsene kaum die Zielgruppe von Untersuchungen zum Domänenzusammenspiel bildeten. Eine Verbindung zwischen Inhibition/Selbstregulation und einem Gleichgewichtstest bestätigen jedoch auch Spedden et al. (2017) für das ältere Erwachsenenalter zwischen 61 und 86 Jahren. Im Gegensatz zur Teilstudie 1 der vorliegenden Arbeit konnten Spedden et al. (2017) die genannten Assoziationen für das junge Erwachsenenalter nicht finden. Der Grund für diese konträren Ergebnisse liegt womöglich in der Auswahl der Gleichgewichtstests, die sich in den Studien stark unterschied.

Dass das Zusammenspiel zwischen den Domänen nicht nur einer Aufgaben- sondern auch einer Testspezifität unterliegt, wird auch bei der erneuten Begutachtung vorangegangener Studien deutlich, die sich in ihrer Probandenauswahl ähneln, jedoch u. a. durch die Nutzung unterschiedlichen Testmaterials spezifische Befunde vorzuweisen haben (vgl. Tabelle 11). Die Untersuchungen von Livesey et al. (2006) und Stöckel und Hughes (2016) inkludierten beispielsweise jeweils Kinder im mittleren Alter von 6,3 bzw. 6,1 Jahren, nutzen zur Erfassung der Feinmotorik den M-ABC-Subtest „Handgeschicklichkeit“ (Henderson et al., 2007; Henderson & Sudgen, 1992) und setzten dessen Ergebnisse in Beziehung zu den Leistungen in Aufgaben zur inhibitorischen Kontrolle. Der wesentliche Unterschied der beiden Studien besteht demnach lediglich in der Auswahl der Inhibitionstests. Gleichwohl alle fünf eingesetzten Inhibitionstests bzw. -variablen speziell die Fähigkeit zur Selbstregulation/*response inhibition* (Diamond, 2013) abbilden sollen, wird lediglich in drei der Tests ein mittleres bis großes Zusammenhangsmaß zur Handgeschicklichkeit berichtet. In diesen drei Tests dienten einmal die Reaktionsschnelligkeit und zwei Mal das Genauigkeitsmaß als abhängige Variable. Bei den exekutiven Tests, bei denen kein signifikanter Zusammenhang zur feinmotorischen Komponente ausgemacht werden konnte, handelte es sich einmal um den *Animal Stroop* (Wright et al., 2003) und einmal um einen *stop-signal* (Carver et al., 2001; Livesey et al., 2006) Test. In beiden genannten Tests diente die Reaktionsgeschwindigkeit als abhängige Variable. Der interessante zusätzliche Fakt, dass in der Studie von Stöckel und Hughes (2016) zwar das Genauigkeitsmaß im *Animal Stroop*, nicht aber die Reaktionsgeschwindigkeit Assoziationen zur Handgeschicklichkeit zeigte, deutet auf das Vorliegen einer Variablenpezifität hin. Welche Variablen demnach in Untersuchungen ausgewählt werden, um die Leistung in einem Test abzubilden, hat entscheidenden Einfluss auf den Nachweis und die Stärke des Domänenzusammenspiels.

Ein weiteres Beispiel liefert der Vergleich der Studien von Roebers und Kauer (2009) und Michel et al. (2011). Auch hier sind die ausgewählten Probanden mit einem mittleren Alter von 7,6 bzw. 7,5 Jahren fast gleich alt. In beiden Studien wurden sowohl der Test „Farbspanne rückwärts“ für das Arbeitsgedächtnis als auch die Inhibitionstests „*Flanker*“ und „*Simon*“ genutzt. Die Untersuchungen

unterscheiden sich jedoch in ihrer Auswahl an fein- und grobmotorischen Tests. Folglich war bspw. die Aufgabe zur Feinmotorik bei Roebers und Kauer (2009) lediglich mit dem *Simon*-Test assoziiert, während Michel et al. (2011) für ihren Feinmotoriktest aus dem M-ABC Korrelationen zum *Simon*- und zum *Flanker*- Test berichteten. Assoziationen zwischen der Arbeitsgedächtnisleistung und den grobmotorischen Fähigkeiten gab es dagegen nur in der Untersuchung von Roebers und Kauer (2009).

Tabelle 11: Gegenüberstellung ausgewählter Studien sowie deren Ergebnisse zur Verdeutlichung einer vorliegenden Testspezifität. Grün: großer Effekt ($r \geq 0,50$), Orange: mittlerer Effekt ($r = 0,30$ bis $0,49$), Blau: kleiner Effekt ($r = 0,10$ bis $0,29$). Es sind lediglich die Komponenten und Tests dargestellt, die in den jeweils gegenübergestellten Studien vergleichbar sind.

	Livesey et al., 2006	Stöckel und Hughes, 2016	Roebers und Kauer, 2009	Michel et al., 2011b
Alter der Probanden (Jahre, Momate)	6,3	6,1	7,6	7,5
motorische Komponente	Feinmotorik			Fein- und Grobmotorik
motorische Tests	M-ABC-Subtest „Handgeschicklichkeit“			<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pegboard</i> (& Simon) • springen seitwärts (& Flanker & Simon) • schnelles Aufstehen (& Farbspanne rückwärts) • seitliches Umsetzen <p>M-ABC-Subtests</p> <ul style="list-style-type: none"> • Handgeschicklichkeit (& Flanker & Simon) • Balance (& Flanker & Simon) • Ballfertigkeit (& Simon)
exeektive Komponente	Inhibition			Arbeitsgedächtnis und Inhibition
EF Tests	<ul style="list-style-type: none"> • <i>day night Stroop</i> (Genauigkeit) • <i>stop-signal reaction time</i> (RT) • <i>go-signal reaction time</i> (RT) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Animal Stroop</i> (Genauigkeit) • <i>Animal Stroop</i> (RT) 	<p>Arbeitsgedächtnis: Farbspanne rückwärts</p> <p>Inhibition: Flanker (RT), Simon (RT)</p>	

Die Beispiele und auch die beschriebenen Ergebnisse aus den Teilstudien 1 und 2 verdeutlichen, dass der Auswahl der exekutiven und motorischen Aufgaben und Tests sowie deren Variablen, aufgrund vorliegender Spezifika, eine entscheidende Rolle im Nachweis bzw. in der Systematisierung des Domänenzusammenspiels zugeschrieben werden kann:

- **Aufgabenspezifk:** Unterschiedliche motorische Aufgaben aktivieren unterschiedliche exekutive Teilprozesse zu unterschiedlich großen Anteilen.
- **Testspezifk:** Unterschiedliche Tests innerhalb eines Subbereiches (z. B. Feinmotorik, Arbeitsgedächtnis, Inhibition) rufen unterschiedliche Assoziationen im Zusammenspiel hervor.
- **Variablen spezifk:** Die Auswahl der Testvariable (Reaktionsgeschwindigkeit, Genauigkeit) spielt eine entscheidende Rolle in der Aufklärung des Domänenzusammenspiels.

Hinter diesen Spezifika stehen wissenschaftliche Sachverhalte bzw. Entwicklungsprozesse, die bereits theoretisch sehr gut erklärt werden können, in der Konzeption von behavioristischen Studien (zum Domänenzusammenspiel) bisher aber nur schwer berücksichtigt werden können.

Die Aufgabenspezifk lässt sich u. a. durch die spezifische Organisation der motorischen und somatosensorischen Cortices (und benachbarter Strukturen wie bspw. dem supplementär-motorischen - und dem prämotorischen Cortex) erklären. Hier sind spezifische Neuronenverbände dafür verantwortlich, spezifische Muskeln zu aktivieren und ankommende sensorische Signale zu empfangen und zu priorisieren (Edwards, 2011). Muskeln und sensorische Bereiche, die benötigt werden, um sehr kleine und präzise Bewegungen zu realisieren (bspw. Hände, Finger, Zunge, Lippen, Zehen, Füße), werden dabei durch größere neuronale Areale in den Cortices repräsentiert als diejenigen für grobmotorische Bewegungen von bspw. dem Rumpf, den Armen und den Beinen (Edwards, 2011). Die genannten Größenunterschiede in der neuronalen Repräsentation spiegeln sich auch in den Bedürfnissen von Fein- vs. Grobmotorik wieder und könnten einen Grund dafür liefern, warum gerade die feinmotorischen Aufgaben, welche größere neuronale Areale rekrutieren, eher mit EF-Tests korrelieren als grobmotorische Aufgaben (van der Fels et al., 2015). Konträr zu dieser verallgemeinerten Aussage waren in Studie 1 die Leistungen in der Balanceaufgabe eher mit verschiedenen EF-Tests assoziiert als jene, die der Feinmotorik zuzuordnen sind. Hier sollte erwähnt werden, dass die Probanden die Aufgabe hatten, so still wie möglich auf einem Bein zu stehen und dies zudem u. a. mit geschlossenen Augen. Auf den ersten Blick würde man die Balanceaufgabe evtl. der Grobmotorik zuordnen. Um diese Aufgabe zur Körperstabilisierung zu meistern, müssen jedoch ebenfalls kleine Muskelgruppen in Zehen, Füßen und Fußknöcheln präzise und optimal zusammenarbeiten sowie sensorische Rückmeldungen verarbeitet werden, was ebenfalls durch große Areale in den genannten Cortices repräsentiert werden dürfte. Dass unterschiedliche exekutive Aufgaben unterschiedliche Assoziationen mit spezifischen motorischen Aufgaben hervorrufen, ist ebenfalls neurophysiologisch begründet. Die Ausprägung exekutiver Funktionen wird durch die Co-

Aktivierung unterschiedlichster Hirnstrukturen und dessen Verbindungen bestimmt. Eine übergeordnete Rolle spielen dabei vor allem der DLPFC und das Cerebellum, die immer dann aktiv sind, wenn eine Aufgabe neu und schwer ist und zudem eine schnelle Reaktion benötigt. Statt einer gut abgespeicherten und automatisierten Antwort ist folglich ein hoher Grad an Konzentration notwendig (Diamond, 2000). Weitere neuronale Areale, die mit der Ausführung exekutiver Funktionen in Verbindung gebracht werden, sind u. a. der parietale Cortex, die Basalganglien und der Thalamus (Casey et al., 2000; Collette et al., 2005; Cummings, 1993; Fuster, 2002; Monchi et al., 2006; Rubia et al., 2000). Auf behavioristischer Ebene kommen Miyake et al. (2000) durch den Einsatz einer konfirmatorischen Faktorenanalyse zu dem Schluss, dass exekutive Funktionen zwar miteinander assoziiert sind, jedoch auch klar voneinander abgrenzbare Aspekte besitzen. Auf der neurophysiologischen Ebene bestätigt dies eine Studie von Collette et al. (2005), in der die Autoren mit Hilfe der Positronen-Emissions-Tomographie spezifische präfrontale Areale den jeweiligen exekutiven Subkomponenten zuordnen konnten. Betrachtet man die spezifische Organisation des Gehirns, in der unterschiedliche neuronale Areale spezifischen motorischen und exekutiven Aufgaben zugeordnet werden können, ist die vorliegende Aufgabenspezifik des Domänenzusammenspiels eine logische Schlussfolgerung. Studien, die mehrere unterschiedliche Aufgaben zu einer Variable zusammenfassen, sind deshalb nur schwer für die Systematisierung des Domänenzusammenspiels nutzbar.

Ein der Testspezifik zugrundeliegendes Phänomen ist das *task impurity* Problem (Denckla, 1994; Rabbitt, 1997; van der Sluis et al., 2007). Dieses besagt, dass ein Test zur Erfassung einer spezifischen EF zumeist Anteile mehrerer exekutiver Subkomponenten enthält und zudem andere kognitive, nicht-exekutive Prozesse wie bspw. visuell-räumliche Wahrnehmungsprozesse, sprachliche Fähigkeiten oder/und die motorische Reaktionsgeschwindigkeit involviert. Folglich haben zwei Tests, die theoretisch bspw. die Inhibition/Selbstregulierung abbilden sollen, praktisch weniger gemeinsam als dass es zur Generalisierung von Ergebnissen über verschiedene Studien hinweg wünschenswert wäre. Der *Animal Stroop Test* aus der beschriebenen Studie von Stöckel und Hughes (2016) erfordert z. B. neben der Fähigkeit zur Selbstregulierung auch das Wissen und Abrufen verschiedenster Tiernamen. Hat ein Kind diese besser abgespeichert, kann es sie höchstwahrscheinlich auch besser abrufen. Im *stop-signal-Test*, den u. a. Livesey et al. (2006) nutzten, wird neben der Inhibition/Selbstregulation dagegen eher die auditive Wahrnehmung und Verarbeitung sowie die motorische Reaktionsgeschwindigkeit von Bedeutung sein. Zusammenhänge zwischen EF-Tests und motorischen Komponenten spiegeln dementsprechend immer auch nicht-exekutive Testkomponenten der verwendeten EF-Tests wieder, obgleich den Inhibitionsaufgaben im besonderen Maße ein Validitätsproblem nachgesagt wird (Hartung et al., 2020; Salthouse et al., 2003). Ähnlich vielschichtig ist das Erfassen von motorischen Fertigkeiten. Jede motorische Fertigkeit und damit auch jeder motorische Test enthält neben den spezifischen motorischen Anforderungen auch perzeptuelle und

kognitive Anteile (Barnett & Peters, 2004; Edwards, 2011). Welche Domäne mit welchen Anteilen beteiligt ist, kann dabei sehr individuell sein, denn motorische Fertigkeiten sind erlernbar und deshalb stark durch die motorischen Fähigkeiten, die ein Individuum mitbringt, sowie dessen Erfahrungen, Motivation und physische Eigenschaften beeinflussbar (Edwards, 2011). Ob und zu welchem Grad ein motorischer Test mit einem EF-Test assoziiert ist, ist vermutlich auch vom Lernstadium abhängig, in welchem sich das Individuum befindet (Diamond, 2000; Fitts & Posner, 1967). Hat ein Proband bisher wenig Erfahrung mit einer geforderten Bewegung gemacht, befindet er sich im *fast learning* Prozess, in der kognitiven und speziell EFs eher involviert sind als dies zu einem späteren Automatisierungsgrad der Bewegung der Fall ist (Diamond, 2000; Doyon, 1997; Doyon & Benali, 2005). Zukünftige Untersuchungen könnten diesem Sachverhalt durch die Inkludierung einer sehr homogenen Probandengruppe begegnen.

Die Variablenspezifität erklären Autoren (Davidson et al., 2006; Usher et al., 2002) mit Hilfe eines entwicklungspsychologischen Aspekts – der Veränderung des „*speed-accuracy tradeoff*“ in Abhängigkeit des Alters. Demnach verringern Erwachsene bei schweren exekutiven Aufgaben die Geschwindigkeit, um die Genauigkeit zu sichern. Das heißt, sie nehmen eine langsamere Reaktionszeit in Kauf, um richtig „antworten“ zu können. Kinder dagegen halten ihre Reaktionszeit eher konstant und machen in schwierigen Tests folglich mehr Fehler. Demnach kann das Genauigkeitsmaß in Studien mit Kindern eventuell eher zwischen Testleistungen der einzelnen Probanden differenzieren als die Reaktionsgeschwindigkeit. Bei Erwachsenen hingegen ist die Geschwindigkeitskomponente vorzuziehen, da das Genauigkeitsmaß keine große Varianz zwischen den Probanden offenlegt. Generelle Aussagen über verschiedene Tests sind jedoch auch hier nicht möglich. Davidson et al. (2006) zeigten, dass selbst Vier- bis Fünfjährige in der Lage waren ihre Reaktionsgeschwindigkeit zu Gunsten der Genauigkeit zu modulieren, wenn der zu bewältigende Test recht einfach war. Mit ca. sechs Jahren scheint das Alter erreicht, in dem die meisten Kinder die richtige Antwort der schnellen Antwort vorziehen (Davidson et al., 2006). In zukünftigen Studien sollte dieser Fakt durch die Auswahl bzw. die Kombination von Variablen Berücksichtigung finden.

6.2 Der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit und des kalendarischen Alters auf das Domänenzusammenspiel

Mit der ersten Teilstudie sollte weiterhin der Frage nachgegangen werden, inwieweit das Domänenzusammenspiel durch die Aufgabenschwierigkeit der motorischen Aufgaben beeinflusst wird. Diese Frage hat nicht nur starke Bezüge zur diskutierten Aufgaben- und Testspezifität (vgl. Kapitel 6.1), sondern auch zur Frage nach dem Einfluss des kalendarischen Alters/bzw. dem Fähigkeitslevel auf das Domänenzusammenspiel. Die zweite und dritte Hypothese der vorliegenden Arbeit sollen deshalb im nun folgenden Kapitel zusammen diskutiert werden:

Aufgabenschwierigkeit: Motorische Aufgaben mit höherer Schwierigkeit und Komplexität sind stärker mit exekutiven Funktionen assoziiert als Aufgaben mit geringerer Schwierigkeit und Komplexität (H2).

Einfluss des kalendarischen Alters bzw. des exekutiven und motorischen Fähigkeitslevels: Exekutive und motorische Funktionen sind im Kindesalter stärker miteinander assoziiert als im Erwachsenenalter (H3).

Die zweite Hypothese (H2) wird durch die Ergebnisse von Studie 1 gestützt. Die individuell empfundene motorische Aufgabenschwierigkeit bzw. die Performancevariabilität (PV) medierte den Einfluss exekutiver Funktionen im Domänenzusammenspiel. In drei Gleichgewichtsaufgaben (Einbeinstand) mit steigender Schwierigkeit (Augen offen, auf einem Balancepad stehend, Augen zu) wurde jeweils die Standardabweichung innerhalb eines Versuches erhoben und über alle drei Versuche der jeweiligen Bedingung gemittelt. Daraus ergab sich die PV als Maß für die individuell empfundene Aufgabenschwierigkeit (Magill, 2001). Signifikante indirekte Zusammenhänge zwischen der PV und spezifischen EFs gab es dabei vor allem in der schwierigsten der drei Bedingungen (Augen zu), was neurophysiologische Befunde untermauert, die beschreiben, dass die Aktivität derjenigen Hirnareale, die mit EFs in Verbindung gebracht werden (Diamond, 2000, 2013, Serrien et al., 2006, 2007), positiv mit denjenigen Arealen korreliert sind, die aktiviert werden, wenn eine Aufgabe neu und schwierig ist (Chein & Schneider, 2005; Patel et al., 2013; Poldrack et al., 2005; Shadmehr & Holcomb, 1997). In der vorliegenden Teilstudie 1 nahmen die kognitive Flexibilität/*response shifting* in der Bedingung mit geöffneten Augen und die Inhibition/Selbstregulation sowie die kognitive Flexibilität/*set shifting* in der schwereren Bedingung mit geschlossenen Augen Einfluss auf die Gleichgewichtsleistung. Obgleich über alle Konditionen hinweg das Gleichgewicht auf einem Bein gehalten werden sollte, wurden demnach unterschiedliche exekutive Funktionen involviert. Dies spricht erneut für das Vorhandensein einer Aufgabenspezifik (H1). Die zugrundeliegenden methodologischen Entscheidungen lassen eine klare Abgrenzung bzw. Interpretation nach Aufgabenschwierigkeit oder -spezifik nicht zu. In weiteren Untersuchungen zum Einfluss der Aufgabenschwierigkeit würde sich bspw. eine Fitts-Aufgabe anbieten (Fitts, 1954; Gueugneau et al., 2017). Bei diesen zielorientierten Aufgaben zur Armbewegung kann der exakte Schwierigkeitsindex berechnet und differenziert werden, obgleich die motorische Aufgabe dieselbe ist. Trotz der genannten methodischen Schwächen verweist die Zunahme der EF-Beteiligung bei der komplexesten der drei Konditionen auf einen möglichen Einfluss der Aufgabenschwierigkeit auf das Domänenzusammenspiel hin. Die Einordnung der Ergebnisse in die aktuelle Studienlage gestaltet sich jedoch schwierig. Nur wenige Autoren haben versucht die Komplexität der motorischen Aufgaben systematisch zu manipulieren (Maurer & Roebers, 2019; Spedden et al., 2017) und haben dabei teilweise ebenfalls auf verschiedene motorische Tests zurückgegriffen, wodurch Aufgabenspezifik und -schwierigkeit nicht abgegrenzt voneinander betrachtet werden können (Spedden et al., 2017).

Maurer & Roebers (2019) berichteten in ihrer Studie mit Fünf- bis Sechsjährigen von ähnlich großen Korrelationsmaßen zwischen Grob-/Feinmotorik und EFs, unabhängig von der Zuordnung in leichte und schwere motorische Aufgaben (vgl. Tabelle 1). Im Kontrast dazu inkludierten Spedden et al. (2017) u. a. Probanden im jungen- und mittleren Erwachsenenalter. Assoziationen zum genutzten Inhibitionstest gab es weder für den als leicht eingeschätzten *sit to stand* Test noch für den als schwer und komplex eingestuften Gleichgewichtstest. Um klare Aussagen hinsichtlich eines Einflusses der motorischen Aufgabenkomplexität auf das Domänenzusammenspiel treffen zu können, sind weitere Studien mit manipulativem Studiendesign notwendig. Neben dem manipulativen Design sollten die verwendeten motorischen Tests zudem ein gewisses Maß an Komplexität nicht unterschreiten. Betrachtet man die bisherige Auswahl motorischer Tests fällt auf, dass zur Erhebung der motorischen Fähigkeiten im Kindesalter überwiegend quantitative Werte (Barnett & Peters, 2004) aus Testbatterien wie bspw. der M-ABC-2 (*Movement Assessment Battery for Children*; Henderson et al., 2007) genutzt wurden (u. a. Aadland et al., 2017; Michel, Röthlisberger, et al., 2011; Rigoli et al., 2012; Röthlisberger et al., 2010). Motorische Testbatterien wurden jedoch entwickelt, um Kinder mit motorischen Entwicklungsstörungen zu identifizieren. Folglich sollen sie besonders gut im unteren Fähigkeitsbereich differenzieren (Barnett & Peters, 2004). Für den weit verbreiteten M-ABC bspw. sind jedoch für einige der enthaltenden Subtests Deckeneffekte nachgewiesen worden, obwohl die getesteten Kinder recht schwache motorische Fähigkeiten aufwiesen (Van Waelvelde et al., 2004). Die Prozentwerte an Kindern mit motorischen Entwicklungsstörungen, die mit dem M-ABC auch als solche identifiziert werden konnten, liegt zwischen 41% (Watter et al., 2008) und 59% (Smits-Engelsman et al., 1998). Im Umkehrschluss bedeuten diese Zahlen, dass ca. 40% der Kinder mit motorischer Entwicklungsstörung nicht als solche erkannt werden. In Studien zum Domänenzusammenspiel werden häufig normal entwickelte Kinder inkludiert und motorisch auffällige Probanden exkludiert (Fernandes et al., 2016; Michel et al., 2019; Rigoli et al., 2012; Roebers & Kauer, 2009). Sollte die Aufgabenschwierigkeit jedoch wie vermutet einen entscheidenden qualitativen und quantitativen Einfluss auf das Wechselspiel zwischen motorischen und exekutiven Fähigkeiten nehmen, verweisen die genannten Aspekte darauf, dass Subtests in motorischen Testbatterien teilweise zu einfach sind, um die Leistungen von normal entwickelten Kindern differenzierbar darzustellen. Motorische Tests, die zu einfach sind, benötigen vermutlich keine oder nur sehr wenig exekutive Kontrolle und eignen sich im Zuge dessen nicht für den Nachweis eines Domänenzusammenspiels (Diamond, 2000). Für die frühe Kindheit und das Schulalter konnten dagegen speziell Aufgaben, die mit hohen Anforderungen an die motorische Koordination einhergehen, mit EFs in Verbindung gebracht werden (Chang et al., 2013; Koutsandréou et al., 2016; Planinsec, 2002). In weiterführenden Studien sollten diese Punkte Berücksichtigung finden, indem die Wahl des motorischen Testmaterials genauso sorgsam abgewogen wird, wie jene für die Erfassung der EFs. So könnten bspw. neben quantitativen Faktoren, wie der Fehlerrate oder der Ausführungszeit, auch qualitative Aspekte, wie die Varianz in die Diagnostik

eingehen (Sternad, 2018), um ein genaueres/differenzierteres Bild der motorischen Fähigkeiten eines Kindes zu erhalten. Letztere wird als Streuung von Daten um einen Mittelwert herum definiert und könnte ein Kriterium zur Abbildung motorischen Lernens bzw. des individuellen motorischen Fähigkeitslevels sein.

Die Diskussion zur Einflussnahme der motorischen Aufgabenkomplexität auf das Domänenzusammenspiel kann an dieser Stelle kein eindeutiges Ergebnis hervorbringen, lässt aber die Vermutung zu, dass der Komplexität der motorischen Aufgabe, zumindest unter gewissen Umständen (richtiges Level an Komplexität) bzw. in Kombination mit anderen Faktoren (bspw. dem Alter), eine bedeutsame Rolle im Domänenzusammenspiel zukommen kann. Erwähnenswert scheint unter diesem Gesichtspunkt die Differenzierung zwischen nominaler und funktionaler Aufgabenschwierigkeit. Die nominale Schwierigkeit inkludiert ausschließlich Testcharakteristika. Demnach finden Faktoren wie Wahrnehmungs- und Bewegungsansprüche einer motorischen Aufgabe Beachtung. Wer den Test unter welchen Bedingungen ausführt, ist dabei unbedeutend (Guadagnoli & Lee, 2004; Swinnen et al., 1992). Neben der nominalen gilt es jedoch auch die funktionale Aufgabenschwierigkeit zu beachten. Diese beschreibt die Aufgabenschwierigkeit in Abhängigkeit vom Individuum (Anfänger, Profi usw.), welches die Aufgabe zu meistern versucht, sowie die Bedingungen (z. B. Wind, Zuschauer usw.), unter denen die Aufgabe ausgeführt wird (Guadagnoli & Lee, 2004). In diesem Zusammenhang sprechen Guadagnoli & Lee (2004) vom „*optimal challenge point*“ (S. 215). Dieser beschreibt den Punkt optimalen Lernens in Abhängigkeit von der funktionalen Aufgabenschwierigkeit und damit evtl. auch den Punkt, an dem EFs am ehesten aktiviert werden.

In der vorher erwähnten Untersuchung von Spedden et al. (2017) konnten zwar keine Assoziationen zwischen den Domänen in den Altersgruppen der jungen (19-40 Jahre) und mittleren (41-60 Jahre) Erwachsenen beschrieben werden, wohl aber in der Gruppe der älteren Erwachsenen (61-83 Jahre). Dieser Effekt konnte jedoch auch für die älteste Gruppe nur zwischen dem exekutiven Test und dem schwereren der beiden genutzten motorischen Tests - dem Gleichgewichtstest - beschrieben werden. Dieser Befund lässt die Vermutung zu, dass der Einfluss der Aufgabenkomplexität nicht losgelöst vom Alter bzw. Fähigkeitslevel der Stichprobe betrachtet werden kann, da diese Variablen die funktionale Aufgabenschwierigkeit mitbestimmen. Die eingangs aufgestellte Hypothese (H2) wird folglich präzisiert:

- **Einfluss der nominalen und funktionalen Aufgabenschwierigkeit:** Motorische Aufgaben, die ein gewisses Maß an nominaler Schwierigkeit besitzen und vom Getesteten als herausfordernd empfunden werden (funktionale Schwierigkeit), aktivieren EFs zu einem höheren Anteil als dies einfache motorische Tests tun.

Daran anknüpfend wurde in der dritten Hypothese (H3) der vorliegenden Arbeit die Vermutung aufgestellt, dass das Alter bzw. das Fähigkeitslevel eines Individuums Einfluss auf das Domänenzusammenspiel haben. Diese Hypothese wurde in der zweiten Teilstudie bearbeitet und wird durch

die Ergebnisse untermauert. In der zweiten Teilstudie wurden die Leistungen verschiedener motorischer und exekutiver Tests, sowie dessen Assoziationen unter- und miteinander in zwei Altersgruppen verglichen. Die Gruppe der sportlichen jungen Erwachsenen verkörperte dabei die obere Grenze der motorischen und exekutiven Leistungsfähigkeit. Die Gruppe der 5- bis 6-Jährigen repräsentierte

dagegen einen Altersabschnitt, in welchem die Domänen noch durch Leistungszuwachs und -optimierung charakterisiert sind (De Luca & Leventer, 2008; Diamond, 2000; Payne & Isaacs, 2012). Wie erwartet zeigten die Erwachsenen in allen erhobenen Tests signifikant bessere Leistungen als die Kinder. Zudem traten in beiden Gruppen zwar ähnliche Korrelationen innerhalb der motorischen Domäne auf, Korrelationen sowohl innerhalb der exekutiven Domäne als auch zwischen den Domänen konnten jedoch nur für die Gruppe der Vorschulkinder dokumentiert werden. Einen erheblichen Beitrag zu motorischen Kompetenzen der Vorschüler lieferte dabei vor allem die Arbeitsgedächtnisleistung. Folglich wird der Einfluss des Alters bzw. des Fähigkeitslevels (und damit verbunden wahrscheinlich auch die funktionale Aufgabenschwierigkeit) auf das Domänenzusammenspiel klar erkennbar. Da die Ergebnisse sowohl qualitative als auch quantitative Unterschiede des Zusammenspiels in den verschiedenen Altersgruppen zeigten, sollen im folgenden Abschnitt beide Merkmale separat diskutiert werden.

Die quantitativen Ergebnisse der zweiten Teilstudie finden Bestätigung in vorangegangenen Studien, die zwei (Stöckel et al., 2017) oder mehrere unterschiedliche Altersgruppen (Spedden et al., 2017) einbezogen. Zwar inkludierte keine der beiden Studien eine Kindergruppe, jedoch beschrieben sie für die zweite Lebenshälfte ähnliche Befunde wie jene, die aus Teilstudie 2 abgeleitet werden konnten. Die globale Betrachtung dieser Ergebnisse deutet darauf hin, dass die Entwicklung der Leistungsfähigkeit der motorischen und exekutiven Funktionen im Altersgang einer umgekehrten U-Funktionskurve folgt (De Luca et al., 2003; Leversen et al., 2012; Sigmundsson et al., 2016; Zelazo et al., 2004), während das quantitative Zusammenspiel der Domänen vor allem am Anfang und Ende der Lebensspanne zu beobachten ist. Im jungen und mittleren Erwachsenenalter (Studie 2; Spedden et al., 2017; Stöckel et al., 2017) und evtl. schon im Jugendalter (Fernandes et al., 2016) scheinen die Domänen deutlich geringer bis gar nicht miteinander assoziiert zu sein. Dies ist zumindest der Fall, wenn die funktionale Aufgabenschwierigkeit nicht dem Performancelevel des Individuums angepasst wird und folglich evtl. zu einfach ist, um EFs zu aktivieren (Studie 1).

Eine Gegenüberstellung der Befunde aus Teilstudie 2 und 3 liefert einen weiteren vertiefenden Aspekt zum Einfluss von Alter bzw. Fähigkeitslevel auf das Domänenzusammenspiel. In beiden Studien kamen der *list sorting* Test zur Erfassung der Arbeitsgedächtnisleistung und das *Purdue Pegboard* zur Einschätzung der Handgeschicklichkeit bei 5 - 6-Jährigen Kindern zur Anwendung. Obgleich davon ausgegangen wurde, dass mit identischem Testmaterial ähnliche Korrelationskoeffizienten in zwei

verschiedenen Gruppen gleichen Alters vorliegen sollten, war dies nicht der Fall. Während die Leistungen im Arbeitsgedächtnis- und Handgeschicklichkeitstest in der zweiten Studie stark miteinander assoziiert waren ($r = 0,75$, $p < 0,001$), konnte für die Probanden der dritten Studie nur eine schwache Korrelation ermittelt werden ($r = 0,265$, $p = 0,063$). Über die Gründe dafür kann an dieser Stelle nur spekuliert werden. Der Vergleich der Leistungen in beiden Tests lässt die Vermutung zu, dass die Probanden in der zweiten Studie vor allem in der exekutiven aber auch in der motorischen Aufgabe höheren individuellen Anforderungen gegenübergestellt waren (Abbildung 8), und folglich mehr kognitive/motorische Ressourcen notwendig waren, um die Aufgaben zu lösen (Diamond, 2000).

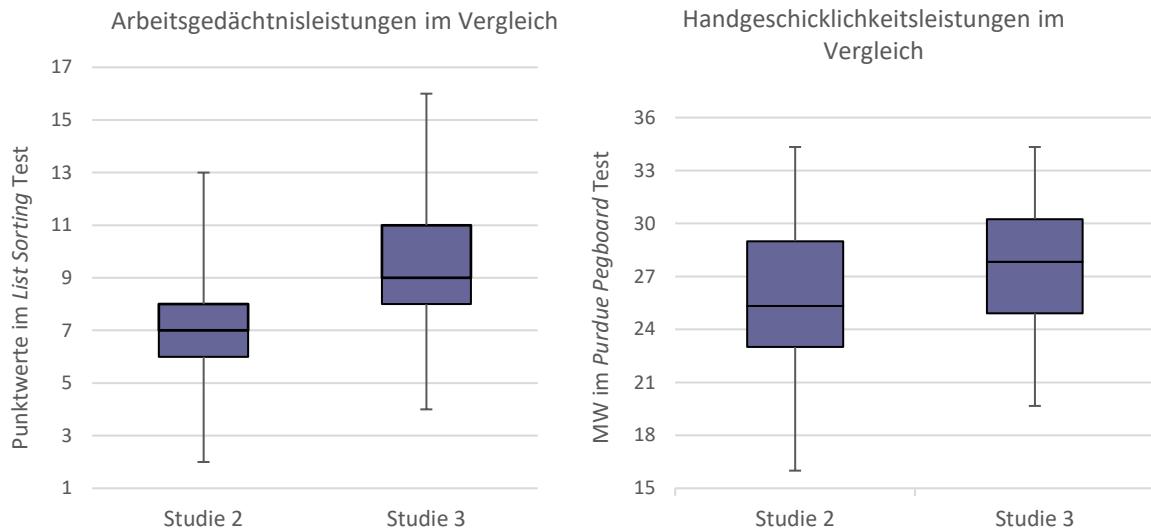


Abbildung 8: Vergleich der Leistungen zwischen den Probanden der zweiten und dritten Teilstudie im *List Sorting* Test (links) und *Purdue Pegboard* Test (rechts). Trotz gleichen Alters zeigen die Probanden aus Studie 2 im Durchschnitt schlechtere Leistungen (*List Sorting*: Median SD; *Pegboard*: Median SD) als die Probanden der Studie 3 (*List Sorting*: Median SD; *Pegboard*: Median SD).

Ein weiterer Aspekt, auf den die Ergebnisse hinweisen, ist das Zusammenspiel der EFs untereinander. Während es bei den jungen Erwachsenen keine Assoziationen zwischen den einzelnen EFs gab, korrelierten die EFs bei den Kindern in mittlerem bis großem Ausmaß. Im Kindesalter sind demnach nicht nur mehr Assoziationen zwischen den Domänen, sondern auch innerhalb der kognitiven Ebene beobachtbar. Zu dem genannten Aspekt ist wiederum der Vergleich der Fünf- bis Sechsjährigen aus Studie 2 und 3 interessant. Trotz gleichen Alters zeigen die jungen Probanden aus Studie 2 nicht nur deutlich schlechtere Leistungen in allen Tests zur Erfassung der EFs (Tabelle 12), sondern auch deutlich mehr Korrelationen innerhalb der exekutiven Domäne als die Kinder aus der dritten Studie (Tabelle 13).

Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichungen der exekutiven Tests für die 5- bis 6-jährigen Probanden aus Studie 2 (linke Spalte) und 3 (rechte Spalte).

	Mittelwert (SD)	Mittelwert (SD)
	Studie 2	Studie 3
Arbeitsgedächtnis (list sorting)	7,27 (2,5)	9,56 (2,5)
Inhibition/Selbstregulation (Hearts & Flowers Inc./Gen.)	0,60 (0,24)	0,79 (0,18)
Inhibition/selektive Aufmerksamkeit (Flanker/Gen.)	0,61 (0,22)	0,73 (0,14)
Kognitive Flexibilität (Hearts & Flowers Mix/Gen.)	0,44 (0,19)	0,76 (0,16)

Tabelle 13: Korrelationen innerhalb der exekutiven Funktionen für die 5- bis 6-jährigen Kinder aus Studie 2 (oberhalb der Diagonale) und Studie 3 (unterhalb der Diagonale). Signifikante Werte sind fett markiert.

	Arbeitsgedächtnis (list sorting)	Inhibition/ Selbstregulation (Hearts & Flowers Inc./Gen.)	Inhibition/selektive Aufmerksamkeit (Flanker/Gen.)	Kognitive Flexibilität (Hearts & Flowers Mix/Gen.)
Arbeitsgedächtnis (list sorting)		0,338*	0,304*	0,384*
Inhibition/Selbstregulation (Hearts & Flowers Inc./Gen.)	0,083		0,188	0,519**
Inhibition/selektive Aufmerksamkeit (Flanker/Gen.)	0,058	0,059		0,332*
Kognitive Flexibilität (Hearts & Flowers Mix/Gen.)	0,049	0,478**	0,342*	

Eine mögliche Erklärung für diese Ergebnisse liegt in der Theorie der interaktiven Spezialisierung begründet (Johnson, 2001, 2011). Nach dieser Theorie wird vermutet, dass Kinder bzw. ungeübte Personen sich bei neuen Aufgaben evtl. auf ein breiteres Netzwerk an beteiligten Hirnstrukturen im PFC stützen (Durston et al., 2006), als dies junge Erwachsene bzw. geübte Personen tun. Dies sei der Fall, weil einige kortikale Regionen sich im Laufe der Entwicklung durch wiederholte interregionale Interaktionen spezialisieren (und die Zahl an Synapsen abnimmt). Die erhöhte Anzahl an Assoziationen innerhalb und zwischen den Domänen in der Kindergruppe (im Speziellen aus Studie 2) wäre in diesem Fall schlicht ein Zeichen für weniger Erfahrung bzw. weniger Interaktionen zwischen bestimmten kortikalen Regionen und dessen Verbindungen. Weiterhin wird vermutet, dass für die optimale Ausreifung exekutiver Funktionen die richtige Balance aus positiven (u. a. neuronale Proliferation und Differenzierung der grauen Substanz) und negativen (u. a. Apoptose synaptischer Verbindungen) neuronalen Mechanismen entscheidend ist (De Luca & Leventer, 2008; Huttenlocher, 1979; Kuan et al., 2000). Die beschriebenen Reifungsvorgänge der frontalen Hirnareale werden dabei u. a. durch die Verbesserung kognitiver Fähigkeiten repräsentiert, die je nach EF mehr oder weniger stark stufenförmig erfolgt (Casey et al., 2000). An dieser Stelle könnte ebenso spekuliert werden, dass die erhöhte Anzahl an Assoziationen innerhalb der exekutiven Domäne Ausdruck eines gerade

ablaufenden Entwicklungsspurs ist, durch den die Kinder befähigt werden, ihre exekutiven Funktionen kontextspezifisch einzusetzen (Howard et al., 2015).

Die Ergebnisse aus der zweiten Teilstudie sowie der Vergleich der fünf- bis sechsjährigen Kinder aus Studie 2 und 3 lassen folglich vermuten, dass das Fähigkeitslevel bzw. die kognitive Reife einen weiteren Faktor darstellt, der das Domänenzusammenspiel (im Zusammenhang mit der Aufgabenschwierigkeit) beeinflusst. Dabei können selbst innerhalb eines engen Altersrahmens sowohl im Domänenzusammenspiel als auch innerhalb der exekutiven Domäne unterschiedliche Korrelationsmuster auftreten. Alter und Fähigkeitslevel bzw. kognitive Reife sollten demnach zwar als verzahnt, nicht aber als identische Variablen angesehen werden. Weitere Studien sind notwendig, um diese Vermutung zu stützen. Für die vorliegende Arbeit wird die dritte Hypothese (H3) wie folgt präzisiert:

- **Einfluss des Alters, des motorischen Fähigkeitslevels und der kognitiven Reife auf die Quantität des Zusammenspiels:** 5- bis 6-jährige Kinder bzw. Probanden mit geringerem Fähigkeitslevel auf der motorischen und/oder exekutiven Ebene zeigen in der Regel höhere Zusammenhangsmaße zwischen den Domänen und innerhalb der exekutiven Domäne als junge Erwachsene bzw. Probanden mit höherem Fähigkeitslevel.

Studie 2 offenbarte zudem die genannten qualitativen Unterschiede in der Komposition des Domänenzusammenspiels zwischen jungen Erwachsenen und Vorschulkindern. Bei den Kindern konnte die Arbeitsgedächtnisleistung signifikante Varianzanteile für alle getesteten motorischen Bereiche (Schnelligkeit und Geschicklichkeit = 23%, Kraft = 31%, Handgeschicklichkeit = 43%) aufklären. Bei den Erwachsenen gab es dagegen keine relevanten Zusammenhänge zwischen motorischen und exekutiven Funktionen. Dieser Befund steht im Kontrast zu den Ergebnissen in Studie 1, bei der mit einer sehr sensitiven Balanceaufgabe vor allem Assoziationen zur kognitiven Flexibilität gefunden wurden. Kinder und junge Erwachsene wurden in vorangegangenen Studien bisher nicht direkt verglichen (u. a. aufgrund der Testspezifität), weshalb an dieser Stelle nicht künstlich versucht werden soll, die Ergebnisse einzuordnen. Zur Erklärung des dominierenden Einflusses verschiedener EFs in unterschiedlichen Altersgruppen können Studien zum Entwicklungsverlauf der EFs herangezogen werden. Es ist mittlerweile gut belegt, dass das Konstrukt der EFs im Laufe der Entwicklung vom Kind zum älteren Erwachsenen Prozesse der Umstrukturierung durchläuft (de Fries et al., 2007; Garrett, 1946; Li et al., 2004; McKenna et al., 2017; Shing et al., 2010). Diese Umstrukturierung äußert sich bspw. in einem angenommenen Ein- bis Zwei-Faktor-Modell im Alter von fünf- bis sechs Jahren (Shing et al., 2010; Usai et al., 2014; Wiebe et al., 2008; Willoughby et al., 2012) und einem Drei-Faktor-Modell aus drei assoziierten aber abgrenzbaren EFs im mittleren Kindes- und Erwachsenenalter (Lehto et al., 2003; Miyake et al., 2000). Wann genau welche Strukturveränderungen vonstatten gehen und wann sich welche Komponenten genau voneinander

separieren, ist bis dato nicht eindeutig geklärt. Die Ergebnisse der behavioralen und neurophysiologischen Studien unterschieden sich je nach verwendetem Testmaterial und einbezogener Altersspanne deutlich voneinander (Howard et al., 2015; McKenna et al., 2017). Einigkeit besteht jedoch in dem Fakt, dass das Alter einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der EF-Struktur hat (Best & Miller, 2010). Generell wird davon ausgegangen, dass die Differenzierung exekutiver Funktionen im Laufe der Entwicklung bis ins junge/mittlere Erwachsenenalter immer weiter voranschreitet, bevor es in der zweiten Lebenshälfte wieder zu De-Differenzierungsprozessen kommt (de Frias et al., 2007; Li et al., 2004; Shing et al., 2010). In der Studie von Howard et al. (2015) wurden jedoch Kinder zwischen drei und vier Jahren untersucht und herausgestellt, dass die dreijährigen Kinder keine Assoziationen zwischen den EF-Tests zeigten, während es innerhalb der Gruppe der Vierjährigen deutliche Zusammenhänge zwischen allen EF-Tests gab. Die Autoren schlossen daraus, dass exekutive Funktionen initial evtl. Prozesse darstellen, die nicht in Relation zueinanderstehen, bevor sie eine Phase der Integration durchlaufen. Diese Phase der Integration, in der zwischen den einzelnen Tests zur Erfassung exekutiver Funktionen stärker werdende Bezüge auftreten, kann vermutlich bis in das frühe (Tsujimoto et al., 2007; 5 - 6 Jahre) oder sogar späte (Shing et al., 2010; 9,5 Jahre) Grundschulalter andauern. Im Unterschied zur Studie von Shing et al. (2010) wurden in der Studie von Tsujimoto et al. (2007) für das Alter zwischen acht und neun Jahren, keine Zusammenhänge von Arbeitsgedächtnis und Inhibition/Selbstregulation mehr berichtet. In mehreren Untersuchungen, die zur Aufklärung der EF-Struktur konfirmatorische Faktorenanalysen durchführten, konnten im Alter zwischen dreieinhalb und sechs Jahren zwei Faktoren ermittelt werden (Lee et al., 2013; Miller et al., 2012; Usai et al., 2014). Dabei luden die Arbeitsgedächtnis- und die Inhibitionskomponente in keiner der Studien auf denselben Faktor, was ein Indiz dafür sein könnte, dass sich diese beiden genannten Subkomponenten im Entwicklungsverlauf zuerst voneinander separieren, während die kognitive Flexibilität noch nicht als eigenständiger Faktor agiert. In einer aktuellen Studie von Hartung et al. (2020) wurde der Verlauf bzw. die Entwicklung der EF-Struktur zwischen dem siebten und fünfzehnten Lebensjahr untersucht. Die Autoren bestätigten entwicklungsbedingte Transformationsprozesse in der EF-Struktur. Während die Bedeutung des Inhibitionsfaktors innerhalb des EF-Konstrukts dabei jedoch an Bedeutung und Zentralität verlor, blieb die Bedeutung der Arbeitsgedächtniskomponente konsistent hoch. Dazu passend wird dem Arbeitsgedächtnis ein linearer Entwicklungsverlauf bescheinigt (Best et al., 2009; Gathercole et al., 2004), während die Inhibitionskomponente sich eher stufenförmig entwickeln soll (Best & Miller, 2010). Best et al. (2009) gehen zudem davon aus, dass Kinder von einer sich steigernden Arbeitsgedächtniskapazität profitieren können, sobald ein bestimmtes Level an Inhibition erreicht ist. In diesem Zusammenhang sprechen die Autoren davon, dass EF-Komponenten womöglich zu spezifischen Zeitpunkten in der Entwicklung „online“ (Best et al., 2009, S. 6) kommen. Kinder stecken in diese sich entwickelnde, spezifische EF, dann folglich mehr Anstrengung, um sie auszubilden bzw. zu

verbessern. Inhibition bzw. das „*common EF*“ (Miyake & Friedman, 2012, S. 3) wird häufig als diejenige EF-Komponente beschrieben, die sich zuerst ausbildet (Best et al., 2009; Hartung et al., 2020; Senn et al., 2004), bevor in der weiteren Entwicklung das Arbeitsgedächtnis ausreift und folglich auch größeren Einfluss bei der Ausübung komplexerer kognitiver Aufgaben erhält (Senn et al., 2004). Diesen Ergebnissen folgend, könnte die dominante Rolle des Arbeitsgedächtnisses im Domänenzusammenspiel der Kinder in Studie 2 (und teilweise in Studie 3) mit der Stellung des Arbeitsgedächtnisses im EF-Gesamtkonstrukt erklärt werden. Demnach sind im Alter zwischen fünf und sechs Jahren die EF-Subkomponenten des Arbeitsgedächtnisses und der Inhibition womöglich voneinander separiert und erstere exekutive Funktion nimmt in diesem spezifischem Lebens- bzw. Entwicklungsabschnitt eine zentralere Rolle im EF-Konstrukt ein. Die kognitive Flexibilität entwickelt sich dagegen aufbauend auf den ersten zwei EFs, bildet sich dementsprechend später aus und wird folglich womöglich erst in einem späteren Alter (hier: junges Erwachsenenalter) zur Lösung von Aufgaben nutzbar (Garon et al., 2008). Ob die zentrale Rolle bzw. die „*Onlinefunktion*“ einer EF innerhalb des EF-Konstrukt jedoch automatisch eine zentrale Rolle im Domänenzusammenspiel mit sich bringt, bleibt an dieser Stelle noch eine vage Vermutung. Längsschnittstudien (mit integrierten konfirmatorischen Faktorenanalysen), die das Domänenzusammenspiel in der gleichen Population über mehrere Jahre beobachten, wären hier hilfreich, um die Frage nach dem Einfluss der EF-Struktur zu klären.

Eine ergänzende Erklärung für die dominierende Rolle des Arbeitsgedächtnisses in der Kinderpopulation ist der Befund aus der Metaanalyse von McKenna et al. (2017). In dieser konnten die Arbeitsgedächtnisprozesse mit der Aktivität des Kleinhirns in Verbindung gebracht werden. Vergleichbares beschrieb auch Diamond (2000) für alle exekutiven Prozesse. Demnach werden sowohl für motorische als auch für exekutive Funktionen ähnliche Hirnareale genutzt. Die spezifischen Zusammenhänge zwischen den Domänen für das Kindes- und Erwachsenenalter könnten demnach mit der neuronalen Überlappung und folglich auch mit der Aufgabenspezifität erklärt werden. Dabei ist bspw. das Pontocerebellum, welches u. a. für die Feinabstimmung und den glatten Ablauf von willkürlichen Zielbewegungen verantwortlich ist (Trepel, 2015), in Verbindung mit dem DLPFC - als involvierte Struktur in EF-Tests - gebracht worden (Diamond, 2000). Diamond (2000) beschreibt eine Koaktivierung der beiden Areale, sobald eine Aufgabe zu lösen ist, die unbekannt, schwer und unstetig ist und folglich Konzentration abverlangt. Insofern könnten die Gleichgewichtsaufgabe bei den Erwachsenen und die Handgeschicklichkeitsaufgabe bei den Kindern jeweils spezifische Areale im Pontocerebellum und DLPFC aktiviert haben, die durch die entwicklungsbedingte Struktur des EF-Konstrukt bei den Kindern vornehmlich das Arbeitsgedächtnis und bei den Erwachsenen die ausgereift vorliegende Komponente der kognitiven Flexibilität betraf. Die Erklärungsansätze bedingen und ergänzen sich und können alleinstehend nicht die Dominanz der jeweiligen EFs im Domänenzusammenspiel in verschiedenen Altersgruppen begründen. Da die Dominanz des

Arbeitsgedächtnisses im Domänenzusammenspiel der Kinder aus Studie 3 deutlich geringer ausfiel als bei den Kindern der zweiten Studie, wird zudem der Einfluss von Entwicklung bzw. die Relevanz der Stichprobenbeschreibung für nachfolgende Untersuchungen deutlich. Hypothese 3 (H3) wird hinsichtlich der Qualität des Domänenzusammenspiels wie folgt ergänzt:

- **Einfluss der Entwicklung und der u. a. dadurch bedingten Struktur des EF-Konstrukts auf die Komposition des Domänenzusammenspiels:** 5- bis 6-jährige Kinder bzw. Probanden mit geringerem Fähigkeitslevel auf der exekutiven Ebene zeigen in der Regel stärkere Zusammenhänge zwischen schweren motorischen Aufgaben und den sich früh entwickelnden EFs (z. B. Arbeitsgedächtnis) als junge Erwachsene bzw. Probanden mit höherem Fähigkeitslevel auf der exekutiven Ebene. Letztere Gruppe involviert womöglich eher die sich später entwickelnden EFs, wie bspw. die kognitive Flexibilität.

6.3 Einfluss eines Handgeschicklichkeitstrainings auf die exekutiven Funktionen von fünf- bis sechsjährigen Kindern

Auf der Grundlage der Ergebnisse von Studie 2 wurde angenommen, dass bei fünf- bis sechsjährigen Kindern vor allem Arbeitsgedächtnisleistung und Handgeschicklichkeitsperformanz assoziiert sind. Daraufhin wurde in Anlehnung an den Ansatz von Diamond (2012), eine Intervention zur Verbesserung der Handgeschicklichkeit konzipiert, die über den indirekten Weg zur Steigerung der Arbeitsgedächtniskapazität führen sollte. Mit Teilstudie 3 wurde folglich versucht die eingangs formulierte Kausalitätshypothese (H4) zu überprüfen:

(H4) Kausalität: *Ein mehrwöchiges und spezifisches Motoriktraining kann bei 5- bis 6-jährigen Kindern zur Verbesserung einer oder mehrerer spezifischer EFs führen.*

Die Ergebnisse von Studie 3 stützen die Annahme, dass die Handgeschicklichkeit bei fünf- bis sechsjährigen Kindern kausal mit Teilaufgaben der Arbeitsgedächtnisleistung interagieren. Nach dem vierwöchigen Training mit insgesamt 12 Einheiten á 30 Minuten verbesserten die Kinder sowohl ihre Leistungen in den Handgeschicklichkeitsaufgaben (*Pegboard*: $\eta^2 = .29$; *BOT_{HG}*: $\eta^2 = .23$) als auch in der Arbeitsgedächtnisleistung (großer Effekt; $\eta^2 = .11$). Die erfassten mathematischen Vorläuferfähigkeiten konnten dagegen nicht vom durchgeführten Handgeschicklichkeitstraining profitieren. Damit reihen sich die Ergebnisse in vorangegangene Untersuchungen ein, die ebenfalls kleine bis große Effekte in der Arbeitsgedächtnisverbesserung dokumentierten (Alesi et al., 2016; Koutsandréou et al., 2016; van der Niet et al., 2016), nachdem ein motorisches Trainingsprogramm durchgeführt wurde. Dalziell et al., (2015) und Schmidt et al. (2015) fanden im Kontrast dazu keine stabilen positiven Auswirkungen auf die Merkfähigkeit von Kindern nach einem motorischen Training. Dazu muss gesagt werden, dass zwei der Studien, die einen Effekt fanden (Alesi et al., 2016; van der Niet et al., 2016), passive

Kontrollgruppen nutzen, während die genannten Untersuchungen ohne wirkliche signifikante Verbesserungen im Arbeitsgedächtnis aktive Kontrollgruppen als Vergleichsgruppen einbezogen. Dies kann die Ergebnisse laut Diamond und Ling (2020) deutlich beeinflusst haben. Insgesamt ist das Handgeschicklichkeitstraining der vorliegenden Teilstudie 3 nur unzureichend mit vorangegangenen Studien vergleichbar, da in keinem der Trainingsprogramme spezifische Anforderungen an die Feinmotorik gestellt wurden. Auf weitere Einordnungen soll deshalb an dieser Stelle verzichtet werden (vgl. Kapitel 5.3).

Interessant ist an dieser Stelle, dass das Handgeschicklichkeitstraining konzipiert wurde, nachdem die Ergebnisse von Studie 2 zeigten, dass die Korrelation zwischen dem Arbeitsgedächtnis- und dem Handgeschicklichkeitstest stark ausfielen ($r = 0,75, p < 0,001$). Die Daten des Prätests der Kinder aus Studie 3 hatten jedoch ein deutlich geringeres Korrelationsniveau ($r = 0,265, p = 0,063$). Trotz dieser schwachen Korrelation wirkte sich das Feinmotoriktraining positiv auf die Arbeitsgedächtnisleistungen aus. Die Daten lassen die Vermutung zu, dass das Feinmotoriktraining für die Population der zweiten Studie gar noch größere Effekte für das Arbeitsgedächtnis hätte bringen können, als dies für die Probanden aus Studie 3 der Fall war. Allgemeingültige Aussagen sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht zulässig, jedoch bestätigen die Resultate die Notwendigkeit einer genauen Diagnostik und einer davon abgeleiteten spezifischen Interventionsmaßnahme. Unterschiedliche Populationen gleichen Alters können dementsprechend unterschiedliche Assoziationen zwischen den Domänen zeigen (vermutlich wiederum in Abhängigkeit ihrer exekutiven und motorischen Reife) und folglich unterschiedliche Fördermaßnahmen benötigen.

Die Annahme von MacDonald et al. (2016), dass visuell gesteuerte motorische Fähigkeiten, wie z. B. die Auge-Hand-Koordination, die Grundlage für die Entwicklung von EFs bilden, kann durch die Befunde von Teilstudie 3 dennoch unterstützt werden. Trotz des geringen Zusammenhangs konnten deutliche Zuwächse in den Arbeitsgedächtniskomponenten nach dem Training gefunden werden. Zur Erklärung der Ergebnisse können zusätzlich die Ansätze von Adolph (2005) und Koziol et al. (2012) herangezogen werden. Adolph (2005) schreibt dem motorischen Lernen eine der Schlüsselrollen in der frühen Kindesentwicklung zu. Motorische Handlungsausführungen könnten dabei einen Beitrag zum Aufbau neuronaler Infrastrukturen leisten, die wiederum zur Bewältigung von kognitiven Aufgaben herangezogen werden können. Ähnliches beschreiben Koziol et al. (2012). Die Autoren sehen die EFs in einem Modell aus kontinuierlich ablaufenden sensorischen Interaktionen mit der Umwelt integriert. Dem Ansatz folgend werden Wahrnehmungskapazitäten und motorische Kompetenzen im Laufe der Entwicklung eines Menschen zuerst entwickelt. Dies geschieht durch sensomotorisches Lernen, welches immer wieder an die sich ändernde Umgebung angepasst werden muss. Abweichungen in der frühen motorischen Entwicklung werden als misslungene motorische Kontrolle betrachtet und diese wiederum als eine frühe Form der exekutiven Kontrolle. Die Aneignung routinierter Verhaltensweisen durch Interaktion mit der Umwelt (Adaption und Antizipation) bildet

demnach die Basis für die Entwicklung des kognitiven Kontrollsystems und weist daraufhin, dass beide Bereiche koexistent sind (Koziol, 2014). Diesen Ansätzen folgend könnte zumindest gemutmaßt werden, dass die Spezifität der Aufgabe (vgl. Kapitel 6.1) womöglich in der Aufgabenschwierigkeit (vgl. Kapitel 6.2) zu finden ist. Nicht die Aufgabe an sich würde dann zu Assoziationen im Domänenzusammenspiel führen, sondern u. a. das Fähigkeitslevel, mit dem die eine oder andere motorische oder exekutive Fähigkeit ausgeführt wird:

“However there is no „executive“ because ideas, choices, decisions, and thought manipulation are represented over large regions of the cerebral cortex [...] the locus of control is constantly changing on the basis of the level of task acquisition, reward probabilities, and environmental demands.” (Koziol, 2014, S. 68)

Die inkonsistenten Assoziationen in den vorangegangenen Studien und den eigenen könnten ihre Basis demnach in den individuellen Herausforderungen haben, die die kognitiven und motorischen Tests an das jeweilige Individuum stellen sowie daran angelehnte neuronale Strukturen. Tests wären nach dieser Argumentationslinie stärker assoziiert, wenn sie ähnliche Fähigkeitslevel bedienen bzw. ähnlich hohe Anforderungen an das Individuum stellen und zudem in einer homogenen Gruppe an Probanden durchgeführt werden würden. Die Handgeschicklichkeitsförderung in Studie 3 hätte die fünf- bis sechsjährigen Probanden demnach unabhängig von der Aufgabe der Feinmotorik vor eine ausreichend schwere sensomotorische Aufgabe gestellt, mit der sie ihre motorische Kontrolle und letztlich ihre exekutive Kontrolle schulen konnten. Dies würde die Auffassung von Moreau und Conway (2013) untermauern, die ausdrücken, dass viele verschiedene sensomotorisch angelegte Interventionsformen zu Steigerungen auf der kognitiven Ebene führen können, wenn sie Aspekte wie Neuheit, Vielfalt und Komplexität beinhalten und folglich angepasste Schwierigkeitslevel integrieren. Diamond und Ling (2016) ergänzen diese Annahme. Sie argumentieren damit, dass der Nutzen von Interventionsmaßnahmen umso größer sein kann, wenn emotionale, soziale und physische Bedürfnisse ebenso angesprochen und berücksichtigt werden. Warum gerade die Arbeitsgedächtnisfähigkeiten vom Handgeschicklichkeitstraining profitierten, kann an dieser Stelle nicht eindeutig beantwortet werden. Zwischen den beiden Bereichen liegt entweder eine grundlegende Kausalität vor oder der Zusammenhang liegt, wie in Kapitel 6.2 vermutet, in der spezifischen Struktur der EFs im spezifischen Alter zwischen fünf und sechs Jahren begründet. Die vierte Hypothese der Arbeit wird im Zuge der vorangegangenen Diskussion und den Ergebnissen aus Studie 3 wie folgt präzisiert:

- **Einfluss eines Handgeschicklichkeitstrainings auf die Arbeitsgedächtnisleistung bei 5- bis 6-jährigen Kindern:**
Ein ausreichend anspruchsvolles sensomotorisches Training (Neuheit, Vielfalt, Komplexität), z. B. ein Programm zur Förderung der Handgeschicklichkeit, welches zudem Inhalte zur Förderung der emotionalen und sozialen Ebene enthält, kann bei fünf- bis sechsjährigen Kindern bzw. bei Probanden mit ähnlichem Fähigkeitslevel auf der exekutiven/motorischen Ebene zu Verbesserungen in den Arbeitsgedächtnisleistungen führen.

6.4 Implikationen für zukünftige Untersuchungen zum Forschungsgegenstand

Die Schwierigkeit in der Interpretation vorangegangener Studien liegt zum einen in den bisher wenig beachteten bzw. unbekannten Einflussfaktoren und zum anderen in dem methodisch uneinheitlichen Vorgehen, welches die Vergleichbarkeit (u. a. aufgrund der Spezifik) enorm erschwert. In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb primär verschiedene potentielle Einflussfaktoren auf den Domänenlink zwischen motorischen und exekutiven Funktionen untersucht. In dem nun folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse Orientierung für kommende Untersuchungen geben, indem mögliche Schlussfolgerungen diskutiert werden.

Die Relation der Moderatorvariablen untereinander und die zentrale Rolle des Fähigkeitslevels

Unter dem Begriff „Fähigkeitslevel“, wie er in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, werden die EFs-Effizienz und der Grad der Ausreifung der EFs verstanden, aber auch der Stand der motorischen Entwicklung und die Fähigkeit zum motorischen Lernen per se. Der Begriff beinhaltet folglich qualitative und quantitative Merkmale der beiden Domänen. Das Fähigkeitslevel wird dabei als abhängig vom Lebensalter betrachtet (Studie 2), ist aber nicht ausschließlich durch dieses bedingt (Studie 2 und 3 im Vergleich).

Neben dem Fähigkeitslevel wurden weiterhin die Spezifik des Zusammenspiels sowie der Einfluss der Aufgabenschwierigkeit besprochen. Wie die in der vorliegenden Arbeit ermittelten bzw. bestätigten Einflussfaktoren nach Auffassung der Autorin miteinander in Beziehung stehen, verdeutlicht Abbildung 9.

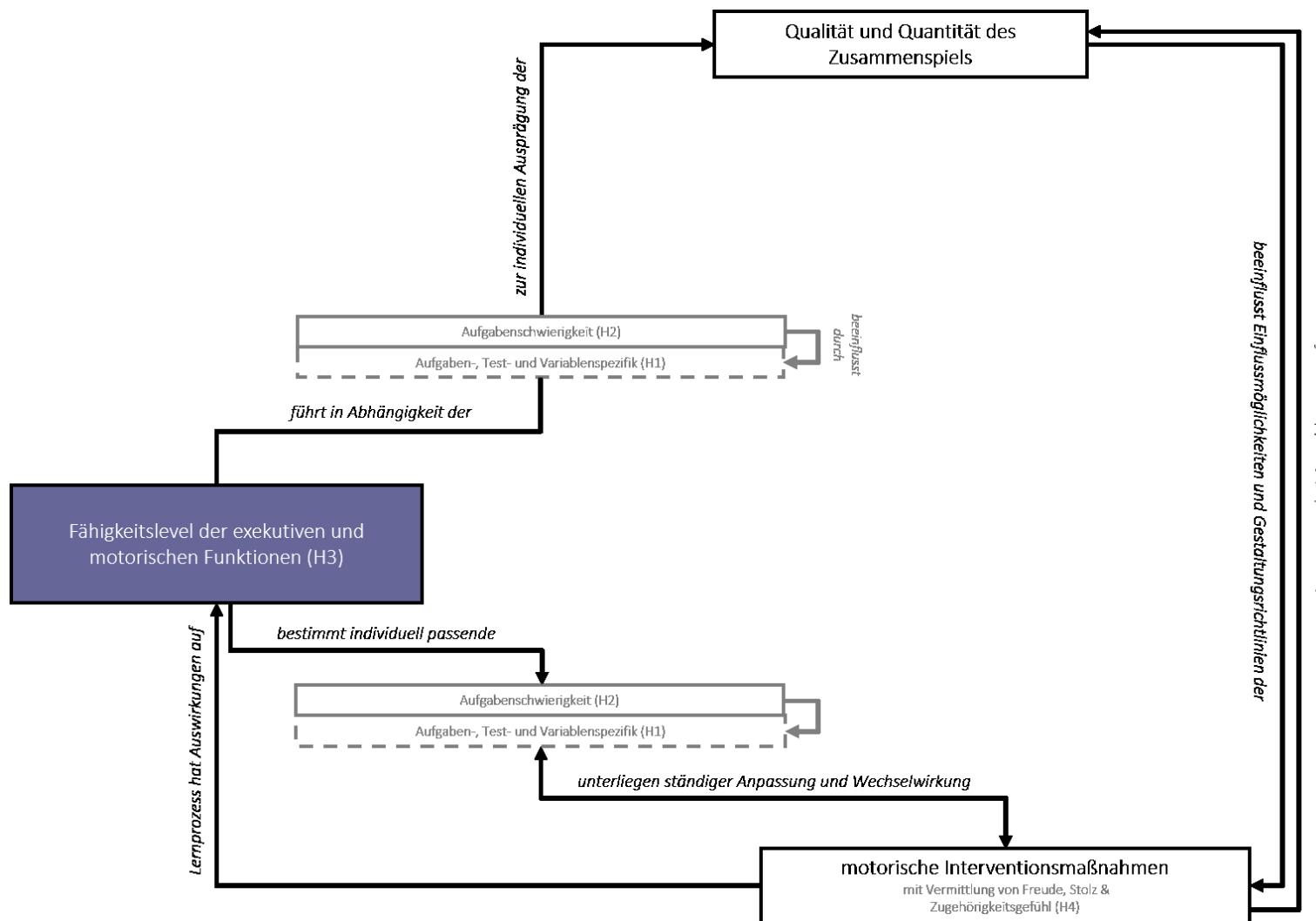


Abbildung 9: Ein hypothetisches Konzept das die möglichen Interaktionswege zwischen der exekutiven und motorischen Ebene darzustellen versucht: vermutete Relationen der ermittelten Einflussfaktoren (der vorliegenden Arbeit) zueinander bzw. in Abhängigkeit voneinander.

Der Inhalt der Abbildung 9 soll an einem Beispiel erläutert werden: Zwei Personen im gleichen Alter wird eine motorische und eine EF-Aufgabe vorgelegt, um den Domänenzusammenhang zu ermitteln. Person A besitzt sehr gute motorische Lernfähigkeiten, während Person B zwar nicht als motorisch auffällig eingestuft wird, aber ein deutlich langsameres motorisches Lerntempo hat als Person A und zudem bisher weniger Erfahrung in ähnlichen Aufgaben sammeln konnte (motorisches Fähigkeitslevel). Person A löst die vorgegebene motorische Aufgabe demnach ohne große Mühen, während Person B ein höheres Maß an kognitiven Ressourcen benötigt und trotzdem hinter der Leistung von Person A bleibt (funktionale Aufgabenschwierigkeit). Bei der EF-Aufgabe schneiden beide gleich ab, sie empfanden sie zudem als in etwa gleich herausfordernd (funktionale Aufgabenschwierigkeit). Allerdings liegen bei den beiden Personen evtl. unterschiedliche EF-Strukturen vor, da die kognitive Reife von Person A vor den meisten seiner Altersgenossen liegt, während jene von Person B mit anderen seiner Altersklasse vergleichbar ist (EFs Fähigkeitslevel). Die qualitativ und quantitativ unterschiedlichen motorischen und exekutiven Fähigkeitslevel von Person A und B führen schließlich, in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenschwierigkeit (wiederum in Abhängigkeit der Aufgaben-, Test- und Variablenauswahl), zu unterschiedlichen Ergebnissen im Domänenzusammenspiel (Qualität und Quantität des Zusammenspiels). Obgleich beide Personen relativ unterschiedliche Voraussetzungen mitbringen, wird in der Regel eine Fördermaßnahme für eine Gruppe konzipiert werden. Diese hat folglich nicht für alle Personen den gleichen positiven Effekt, da die individuell benötigte Aufgabenschwierigkeit und spezifische Zusammenhangsmaße (die sich u. a. aus dem Fähigkeitslevel ergeben) nicht konsequent berücksichtigt bzw. umgesetzt werden können. Die durch die Fördermaßnahme ausgelöste Entwicklung des motorischen und exekutiven Fähigkeitslevels wird letztendlich wiederum Einfluss auf die Qualität und Quantität des Domänenzusammenspiels nehmen und zur Notwendigkeit der Anpassung der Aufgabenschwierigkeit führen.

Es wird deutlich, dass dem Fähigkeitslevel eine zentrale Rolle zugeschrieben werden kann. In dem Konglomerat aus vielen potentiellen Einflussfaktoren wirkt das Fähigkeitslevel maßgeblich auf andere ein oder bedingt diese. In der Konsequenz ergeben sich für zukünftige Studien verschiedene Möglichkeiten, um die Moderator- und Filtervariable „Fähigkeitslevel“ zu bestätigen bzw. zu berücksichtigen und die Inkonsistenz zwischen den Studien zu verringern bzw. die Ergebnisse besser nutzbar zu machen:

1. Durchführung einer intensiven Diagnostik und Erarbeitung von *Tools*, die zur Einschätzung motorischer und exekutiver Fähigkeitslevel in der Diagnostik herangezogen werden können
2. Einbezug von Einzelfall-Interventionsstudien, um individuell auf die Gegebenheiten der Diagnostik eingehen - und den Interventionserfolg auf eine bestimmte Ausgangssituation zurückverfolgen zu können

Zu 1.: Durchführung einer intensiven Diagnostik und Erarbeitung von Tools die zur Einschätzung motorischer und exekutiver Fähigkeitslevel in der Diagnostik herangezogen werden können

Bisher wird bei der Testung der Domänen auf punktuelle fähigkeitsorientierte Tests aus Motorik- oder EF-Batterien zurückgegriffen. Diese bilden somit den aktuellen Stand in einer spezifischen Leistung ab, lassen jedoch zugrundeliegende Erwerbsmechanismen unberücksichtigt. Die Entwicklung eines Menschen, egal ob bezüglich kognitiver oder motorischer Parameter, wird jedoch als dynamisches System betrachtet (Blumberg et al., 2017; Golenia et al., 2017). Ein neu erlerntes Verhalten oder Denken entwickelt sich demnach aus der Interaktion zwischen der Person, der Umwelt und der Aufgabe. Folglich können Entwicklungsschritte ihre Basis potentiell in jedem der genannten Faktoren oder deren Zusammenwirken haben. Daraus resultierend versucht der System-dynamische Ansatz nicht kausale Faktoren für Entwicklungsprozesse aufzudecken, sondern jene darunterliegenden Prozesse zu enthüllen. Golenia et al. (2017) beschreiben weiterhin, dass dynamische Systeme dabei bevorzugte, aber nicht fixe Verhaltensweisen (Attraktoren) nutzen, um neue Entwicklungsschritte zu vollziehen:

„For development this means that when components of the system change, the interaction changes, which might influence the stability of the attractors in the attractor landscape. This changed attractor landscape can lead to different behavioral patterns becoming stable resulting in changes at the performance level, affecting development.“ (Golenia et al., 2017, S. 4)

Es wird deutlich, dass die normale Entwicklung ständigen Veränderungen und Interaktionen ausgesetzt ist. Folglich ist eine Perspektive auf den Domänenzusammenhang wichtig, welche nicht ausschließlich punktuell ablaufende Messungen momentaner Fähigkeiten berücksichtigt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das Fähigkeitslevel evtl. bevorzugt durch prozessorientierte Tests erfasst werden sollte, die Rückschlüsse auf Erwerbsmechanismen zulassen - Erwerbsmechanismen bzw. Verhaltensweisen mit denen Kinder und Erwachsene mit ihrer Umwelt in Beziehung treten, um Informationen und Regularien für ihre eigene Entwicklung zu generieren und die damit grundlegend für spätere Fähigkeiten sind (Romberg & Saffran, 2010). Dies könnten sogenannte Vorläuferfähigkeiten sein, durch welche die Ausbildung exekutiver Funktionen, motorischer Fähigkeiten und letztlich Routinen erst möglich wird.

Für die EF-Domäne beschreiben bspw. Munakata et al. (2012), dass die Entwicklung flexiblen Verhaltens auf drei Vorläuferfähigkeiten beruht. So entwickeln Kinder im ersten Schritt die Fähigkeit Signale aus der Umwelt für ihre kognitive Kontrolle zu nutzen und verlassen die Ebene der Gewohnheitshandlungen (siehe auch Chevalier, 2015). Im zweiten Schritt schaffen Kinder den Übergang von einer reaktiven zur proaktiven kognitiven Kontrolle, wodurch eine effektivere Regulation des eigenen Verhaltens möglich wird (siehe auch Gonthier et al., 2019; Lucenet & Blaye,

2014). Als dritte Errungenschaft bezeichnen die Autoren die Fähigkeit, die kognitive Kontrolle von Signalen aus der Umwelt mehr und mehr loszulösen und stattdessen selbstgesteuert zu agieren. Alle drei Aspekte ermöglichen damit das finale Vorliegen aktiver, robuster und abstrakter Ziel-Repräsentationen, welches im Umkehrschluss Voraussetzung für flexibles und vorausschauendes Handeln in neuen Situationen ist.

Die Effizienz und Ausprägung der drei genannten Entwicklungsprozesse könnte zur Bestimmung des kognitiven Fähigkeitslevels dienen. Nachfolgenden Studien obliegt es, Prozesse wie bspw. die Fähigkeit zur proaktiven oder selbstgesteuerten Kontrolle in ihr Studiendesign zu integrieren und zu prüfen, inwiefern jene das Zusammenspiel zwischen der motorischen und exekutiven Domäne beeinflussen. Sollten diese zugrundeliegenden Prozesse Einfluss auf das Domänenzusammenspiel haben, hätte ihre Erfassung das Potential Stichproben homogener zu gestalten bzw. Studienergebnisse besser vergleichen zu können. Die Praxis könnte insofern davon profitieren, als dass motorische Interventionen gefunden werden müssten, die so konzipiert sind, dass sie diese Prozesse bewusst ansteuern. Da es sich um zugrundeliegende Prozesse handelt, wären Transfereffekte in andere Domänen zudem wahrscheinlich.

Die Aktivierung kognitiver Ressourcen bzw. Prozesse bei motorischen Aufgaben hängt zudem ganz entscheidend vom Aneignungsstatus und den motorischen Fertigkeiten des Getesteten ab (Coyle, 2003; Larson & Alderton, 1990). Motorische Tests sollten deshalb evtl. eine größere Distanz zu Alltagsbewegungen herstellen und generell herausfordernd sein, um den Einfluss individuell unterschiedlicher Lernerfahrungen zu verringern. Zusätzlich könnten auch Variablen, wie bspw. der Verlauf der Variabilität über mehrere Durchgänge in ein Assessment einbezogen werden. Dies könnte neben dem Mittelwert zusätzliche Hinweise über die funktionale Aufgabenschwierigkeit liefern und so vermutlich ergänzende Aussagen zur Fähigkeit des motorischen Lernens per se treffen (Guadagnoli & Lee, 2004; Sternad, 2018).

Wie das Fähigkeitslevel innerhalb der Domänen oder domänenübergreifend am besten abgebildet werden sollte, kann letztendlich zum jetzigen Zeitpunkt nicht exakt beantwortet werden. Zukünftige und gut aufeinander abgestimmte Studien sind zur weiteren Aufklärung notwendig. Dennoch soll an dieser Stelle behauptet werden, dass die Anwendung der bisherigen Testmaterialien zwar wichtige Anstöße und Beiträge bei der Aufklärung des Domänenzusammenspiels liefern konnte, nun aber an ihre Grenzen stößt und folglich weiterentwickelt bzw. überdacht werden muss. Nachfolgenden Untersuchungen obliegt es, dem Diagnostikprozess, gerade in Entwicklungsstudien, mehr Beachtung zu schenken, um letztendlich auch in der Praxis Fortschritte erzielen zu können.

Zu 2.: Einbezug von Einzelfall-Interventionsstudien um individuell auf die Gegebenheiten der Diagnostik eingehen - und den Interventionserfolg auf eine bestimmte Ausgangssituation zurückverfolgen zu können

Der Vergleich der Teilstudien 2 und 3 hat deutlich gezeigt, dass das Alter allein nicht als differenzierendes Maß bzw. Moderatorvariable ausreicht. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen vermuten, dass das Fähigkeitsalter, welches durch das Lebensalter zwar mitbestimmt, jedoch nicht durch dieses bedingt ist, eine weitere tragende Rolle im Domänenzusammenspiel einnimmt. Die Unterschiede im individuellen Fähigkeitslevel der verschiedenen Probanden einer Stichprobe werden vermutlich nicht nur zu unterschiedlichen Ausprägungen in Korrelationsstudien führen, sondern auch zur unterschiedlichen Verwertbarkeit von angebotenen Fördermaßnahmen (heterogene Interventionswirkung). Diamond und Ling (2020) weisen auf verschiedene Punkte hin, welche bei der Konzeption von Interventionsstudien beachtet werden sollten, um die Interpretation der Ergebnisse klar auf zugrundeliegende Kausalitäten zurückführen zu können. Dabei betonen sie mehrmals, dass Interventions- und Kontrollgruppe ähnliche Leistungen im Prätest aufweisen sollten und die Aufteilung in verschiedene Gruppen folglich nicht zufällig erfolgen kann (maximal geschichtete Zufallsstichproben). Die Schwierigkeit dabei ist, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass ähnliche Testergebnisse noch keine homogene Gruppe ausmachen. Sollte das Fähigkeitslevel, welches u. a. auf prozessorientierte Erwerbsmechanismen zurückzuführen ist, die erwartete bedeutende Rolle in der Interaktion spielen, ist das Zusammenstellen homogener Gruppen eine der größten Schwierigkeiten in der Konzeption qualitativ hochwertiger Studien.

Eine Möglichkeit, um dieser Problematik zu begegnen, wäre das Durchführen von experimentellen Einzelfallanalysen (Jain & Spieß, 2012; Kazdin, 2011). In diesen könnten nicht nur individuelle und damit maßgeschneiderte Förderprogramme auf die Diagnostik folgen, sondern deren kausale Wirkung abgeleitet werden. Speziell für den vorliegenden Fall des Fähigkeitslevels als vermutete Moderatorvariable würde sich ein *Multiple-Baseline-Design* über Personen anbieten (Abbildung 10).

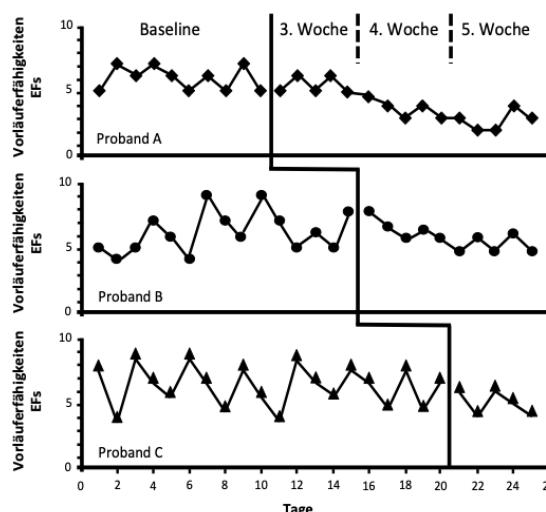


Abbildung 10: In Anlehnung an Jain und Spieß (2012): Ein mögliches *Multiple-Baseline-Design* für die Einzelfallanalysen zu Förderung der zugrundeliegenden Prozesse von EFs (z. B. der AX-CPT Test zur Erfassung der proaktiven kognitiven Kontrolle).

Dazu würde über einen ca. zweiwöchigen Zeitraum mindestens drei Mal ein prozessorientierter Test zur Bildung der *Baseline* zur Anwendung kommen (Kazdin, 2011). Innerhalb einer Gruppe von 5- bis 6-jährigen Kindern könnte bspw. der *AX-CPT* Test (Gonthier et al., 2019; Lucenet & Blaye, 2014) eingesetzt werden, da dieser die Fähigkeit zur proaktiven kognitiven Kontrolle erfasst und die Fähigkeit sich in der besagten Altersspanne entwickelt. Tests dieser Art würden vermutlich geringere Test-/Wiederholungseffekte verursachen als bspw. fertigkeitsorientierte Diagnostikinstrumente. Anhand der Diagnostik kann die Intervention sich in einer Einzelfallanalyse am individuellen motorischen Könnensstand orientieren und die Interventionsinhalte daran anpassen. Um zwischenzeitliche Geschehnisse und Reifung möglichst als Alternativerklärung für den Interventionserfolg auszuschließen, wird empfohlen, die Fördermaßnahmen für die verschiedenen Teilnehmenden zeitlich versetzt zu beginnen (Jain & Spieß, 2012; Kazdin, 2011). Sollten sich die Ergebnisse der prozessorientierten Tests innerhalb des Interventionszeitraumes im Trend verbessern, ist davon auszugehen, dass die Fördermaßnahme das Potential besitzt auf diese zugrundeliegenden Prozesse einzuwirken. Sollte dieser Trend nicht bei allen Teilnehmenden zu beobachten sein, kann vermutet werden, dass bestimmte Merkmale bzw. das spezifische Fähigkeitslevel des profitierenden Teilnehmers für den Erfolg der Intervention verantwortlich sind. Die Unterschiede zwischen den Probanden, die zu den heterogenen Interventionserfolgen geführt haben, können evtl. sogar ermittelt oder zumindest eingegrenzt werden. Bei der Förderung von EFs bzw. deren Erwerbsmechanismen wird vermutlich kein abrupter Interventionserfolg sichtbar sein, sondern eher ein Trend über viele Wochen hinweg („*slam bang*“ Effekt, vgl. Kazdin, 2011, S. 287). Die Generalisierbarkeit der Ergebnisse muss im Nachgang in Anschlussstudien untersucht werden. Dazu wird das Einzelfallexperiment wiederholt und darauf geachtet, dass die Versuchspersonen sich in ihren Merkmalen bzw. dem Fähigkeitslevel möglichst ähneln (direkte Replikation). Sollte die Intervention schlussendlich bei ähnlichen Personen in ähnlichen Settings ähnliche Ergebnisse zeigen, ist es wahrscheinlich, dass das Ergebnis sich für diesen Personenkreis generalisieren lässt (Jain & Spieß, 2012). Der Nachteil von Einzelfallanalysen zur Förderung von EFs bzw. deren Vorläuferfähigkeiten liegt womöglich im Zeitaufwand und den fehlenden gängigen statistischen Möglichkeiten zur Berechnung von Effektstärken. Es wird zudem deutlich, dass zielgerichtete und kooperativ aufeinander abgestimmte Forschungsaktivitäten notwendig sind, um die zahlreichen notwendigen Untersuchungsschritte aufeinander aufzubauen und vergleichen zu können. Aufgrund der vielfältigen möglichen Einflussfaktoren und Fähigkeitslevels ist dieses Vorgehen jedoch womöglich unumgänglich, um die bisherige Inkonsistenz zu verringern und die Ableitung evidenzbasierter Trainingsprogramme zu ermöglichen. Diese könnten dann auch wieder größere Probandengruppen einschließen.

7 Fazit

Die Ausbildung exekutiver Funktionen und der Erwerb motorischer Fertigkeiten sind zu einem gewissen Anteil miteinander verzahnt. Zu diesem Ergebnis kamen bereits viele vorangegangene Studien (u. a. Koutsandréou et al., 2016; Livesey et al., 2006; Michel, Röthlisberger, et al., 2011; Stöckel & Hughes, 2016) und auch die gesammelten Daten der vorliegenden Arbeit weisen in diese Richtung. Bisherige Forschungsergebnisse zeigen zwar Einigkeit darüber, dass diese Verbindung im Kindesalter existent ist, die Ansichten über Qualität und Quantität des Domänenzusammenspiels sind jedoch inkonsistent und heterogen. Ziel der Arbeit war es deshalb, Einflussgrößen zu identifizieren bzw. zu bestätigen, die auf das Zusammenspiel wirken, folglich ein vertieftes Verständnis zu akquirieren und langfristig Fördermaßnahmen ableiten zu können.

Als einen der zentralen Moderatoren im Zusammenspiel bringt die vorliegende Arbeit das individuelle Fähigkeitslevel ins Spiel. Dieses wird womöglich nicht nur durch den aktuellen Könnensstand eines Individuums abgebildet, sondern vermutlich auch durch zugrundeliegende Erwerbsmechanismen. Dieses Resultat ist nicht neu, wenn man bedenkt, dass schon seit längerem die Aufgabenschwierigkeit als dominante Einflussvariable diskutiert wird. Der Aspekt des Fähigkeitslevels setzt lediglich verstärkt am Individuum an und hat dementsprechend Konsequenzen für die Konzeption zukünftiger Untersuchungen:

1. Vermehrter Fokus auf den Anamnese- und Diagnostikprozess sowie Durchführung prozessorientierter Tests.
2. Erarbeitung bzw. Nutzung von validen und verlässlichen *Tools* zur Erfassung des kognitiven und/oder motorischen Fähigkeitslevels bzw. der zugrundeliegenden Erwerbsmechanismen.
3. Durchführung von Einzelfallanalysen, um die Interpretierbarkeit von Interventionsstudien zu erhöhen.

Es wird deutlich, dass die Ableitung von zielgerichteten Fördermaßnahmen an dieser Stelle nach wie vor verfrüht und die praktische Relevanz eingeschränkt ist. So lange die Teilnehmergruppen in Studien heterogen sind und deren Merkmale bzw. Fähigkeitslevel nicht erfasst und beschrieben werden, werden heterogene Interventionserfolge innerhalb der Stichproben erzielt - und inkonsistente Daten zwischen den Studien übermittelt.

Die vielen notwendigen Forschungsaktivitäten, die sich aus dem Einfluss des Fähigkeitslevels und der Forderung nach Einzelfallanalysen ergeben, sollten evtl. durch ein Rahmenkonzept strukturiert aufeinander abgestimmt werden. Forschungsfragen wären vor diesem Hintergrund vermutlich exakter und zielgerichteter, Studienergebnisse folglich konsistenter. Unterschiedliche Resultate aus verschiedenen Untersuchungen könnten somit wahrscheinlich besser miteinander verglichen werden bzw. aufeinander aufbauen.

Die Arbeit trug insgesamt dazu bei, das Verständnis über spezifische Einflussfaktoren auf das Zusammenspiel zwischen EFs und motorischen Fertigkeiten zu intensivieren und die kausale Interaktion zwischen der Handgeschicklichkeit und dem Arbeitsgedächtnis im Vorschulalter aufzuzeigen. Neben diesen Erkenntnissen leistet die vorliegende Schrift jedoch einen Beitrag, der seinen Schwerpunkt vor allem in der zukünftigen Konzipierung von Studien hat. Betrachtet man die enorme Relevanz von EFs in Schule, Beruf und Alltag (Blair & Razza, 2007; Mann et al., 2017; Morrison et al., 2010; Pellicano et al., 2017), scheint der nun in Aussicht gestellte Mehraufwand in Hinblick auf die beschriebenen Diagnostikprozesse und Einzelfallanalysen jedoch gerechtfertigt zu sein.

Literaturverzeichnis

- Aadland, K. N., Moe, V. F., Aadland, E., Anderssen, S. A., Resaland, G. K., & Ommundsen, Y. (2017). Relationships between physical activity, sedentary time, aerobic fitness, motor skills and executive function and academic performance in children. *Mental Health and Physical Activity*, 12, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.mhpa.2017.01.001>
- Adolph, K. E. (2005). Learning to learn in the development of action. In J. J. Rieser, J. J. Lockman, & C. A. Nelson (Eds.), *Minnesota Symposia on Child Psychology; Action as an Organizer of Learning and Development* (Vol. 33, pp. 91–122). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Adolph, K. E., & Berger, S. E. (2006). Motor development. In D. Kuhn, R. S. Siegler, W. Damon, & R. M. Lerner (Eds.), *Handbook of child psychology: Cognition, perception, and language* (pp. 161–213). John Wiley & Sons Inc.
- Alesi, M., Bianco, A., Luppina, G., Palma, A., & Pepi, A. (2016). Improving children's coordinative skills and executive functions: The effects of a football exercise program. *Perceptual and Motor Skills*, 122(1), 27–46. <https://doi.org/10.1177/0031512515627527>
- Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Willis, C., & Adams, A. (2004). *A structural analysis of working memory and related cognitive skills in young children*. 87, 85–106. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2003.10.002>
- Alloway, T. P., Rajendran, G., & Archibald, L. M. D. (2009). Working memory in children with developmental disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 42(4), 372–382. <https://doi.org/10.1177/0022219409335214>
- Alloway, T. P., & Temple, K. J. (2007). A comparison of working memory skills and learning in children with developmental coordination disorder and moderate learning difficulties. *Applied Cognitive Psychology*, 21(4), 473–487. <https://doi.org/10.1002/acp.1284>
- Anderson, P. (2002). Assessment and development of executive function (EF) during childhood. *Child Neuropsychology*, 8(2), 71–82. <https://doi.org/10.1076/chin.8.2.71.8724>
- Anderson, P., Anderson, V., & Lajoie, G. (1996). The Tower of London Test: Validation and standardization for pediatric populations. *Clinical Neuropsychologist*, 10(1), 54–65. <https://doi.org/10.1080/13854049608406663>
- Anderson, P. J. (2008). Towards a developmental model of executive function. In V. Anderson, R. Jacobs, & P. J. Anderson (Eds.), *Executive Functions and the frontal lobes: A lifespan perspective* (pp. 3–21). Taylor & Francis Group.

- Andrés, P. (2003). Frontal cortex as the central executive of Working Memory: Time to revise our view. *Cortex*, 39(4–5), 871–895. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70868-2](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70868-2)
- Archibald, S. J., & Kerns, K. A. (1999). Identification and description of new tests of executive functioning in children. *Child Neuropsychology*, 5(2), 115–129. <https://doi.org/10.1076/chin.5.2.115.3167>
- Arnsten, A. F. T. (1998). Catecholamine modulation of prefrontal cortical cognitive function. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(11), 436–447. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01240-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01240-6)
- Asato, M. R., Sweeney, J. A., & Luna, B. (2006). Cognitive processes in the development of TOL performance. *Neuropsychologia*, 44(12), 2259–2269. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.05.010>
- Asonitou, K., Koutsouki, D., Kourtessis, T., & Charitou, S. (2012). Motor and cognitive performance differences between children with and without developmental coordination disorder (DCD). *Research in Developmental Disabilities*, 33(4), 996–1005. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.01.008>
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556–559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(10), 829–839. <https://doi.org/10.1038/nrn1201>
- Baddeley, A. (2010). Working memory. *Current Biology*, 20(4), 136–140. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.014>
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford University Press.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (8th ed., pp. 47–90). Academic Press.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, 8(4), 485–493. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.8.4.485>
- Barnett, A., & Peters, J. (2004). Motor proficiency assessment batteries. In D. Dewey & D. E. Tupper (Eds.), *Developmental Motor Disorders. A Neuropsychological Perspective* (pp. 66–112). The Guilford Press.
- Becker, D. R., Miao, A., Duncan, R., & McClelland, M. (2014). Behavioral self-regulation and executive function both predict visuomotor skills and early academic achievement. *Early Childhood Research Quarterly*, 29(4), 411–424. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2014.04.014>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.2307/2346101>

- Berg, K., & Norman, K. E. (1996). Functional assessment of balance & gait. *Clinics in Geriatric Medicine*, 12(4), 705–723. [https://doi.org/10.1016/S0749-0690\(18\)30197-6](https://doi.org/10.1016/S0749-0690(18)30197-6)
- Bergman Nutley, S., Söderqvist, S., Bryde, S., Thorell, L. B., Humphreys, K., & Klingberg, T. (2011). Gains in fluid intelligence after training non-verbal reasoning in 4-year-old children: A controlled, randomized study. *Developmental Science*, 14(3), 591–601. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01022.x>
- Berlin, L., & Bohlin, G. (2002). Response inhibition, hyperactivity, and conduct problems among preschool children. *Journal of Clinical Child and Adolescent Psychology*, 31(2), 242–251. https://doi.org/10.1207/S15374424JCCP3102_09
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641–1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Best, J. R., Miller, P. H., & Jones, L. L. (2009). Executive functions after age 5: Changes and correlates. *Developmental Review*, 29(3), 180–200. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.05.002>
- Best, J. R., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2011). Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample. *Learning and Individual Differences*, 21(4), 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.01.007>
- Bewick, V., Cheek, L., & Ball, J. (2003). Statistics review 7: Correlation and regression. *Critical Care*, 7(6), 451–459. <https://doi.org/10.1186/cc2401>
- Blackwell, K. A., Cepeda, N. J., & Munakata, Y. (2009). When simple things are meaningful: Working memory strength predicts children's cognitive flexibility. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(2), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.01.002>
- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*, 78(2), 647–663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Blank, R., Jenetzky, E., & Vincon, S. (2014). *BOT-2. Bruininks-Oseretzky Test der motorischen Fähigkeiten*. Pearson.
- Blumberg, M. S., Spencer, J. P., & Shenk, D. (2017). Introduction to the collection "How we develop—developmental systems and the emergence of complex behaviors." *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 8(e1413), 1–2. <https://doi.org/10.1002/wcs.1413>
- Bowie, C. R., & Harvey, P. D. (2006). Administration and interpretation of the Trail Making Test. In *Nature Protocols* (Vol. 1, Issue 5, pp. 2277–2281). <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.390>
- Braem, S., & Hommel, B. (2019). Executive functions are cognitive gadgets. *Behavioral and Brain Sciences*.
- Brandt, T. (1991). *Vertigo: Its multisensory syndromes*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3342-1>

- Brocki, K., & Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: A dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology*, 26(2), 571–593.
<https://doi.org/10.1207/s15326942dn2602>
- Brooks, V. B. (1986). *The neural basis of motor control*. University Press.
- Bruininks, R. H. (2005). *Bruininks-Oseretsky test of motor proficiency*. AGS Publishing.
- Brydges, C. R., Fox, A. M., Reid, C. L., & Anderson, M. (2014). The differentiation of executive functions in middle and late childhood: A longitudinal latent-variable analysis. *Intelligence*, 47, 34–43.
<https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.08.010>
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietrassik-Kendziorra, S., Machado, S., Ribeiro, P., & Arafat, A. M. (2010). Steroid hormones in the saliva of adolescents after different exercise intensities and their influence on working memory in a school setting. *Psychoneuroendocrinology*, 35(3), 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2009.07.015>
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietraßik-Kendziorra, S., Ribeiro, P., & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, 441(2), 219–223. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.06.024>
- Bull, R., Espy, K. A., & Wiebe, S. A. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: Longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years. *Developmental Neuropsychology*, 33(3), 205–228.
<https://doi.org/10.1080/87565640801982312>.
- Burgess, P. W., & Simons, J. S. (2005). Theories of frontal lobe executive function: clinical applications. In P. W. Halligan & D. T. Wade (Eds.), *Effectiveness of rehabilitation for cognitive deficits* (pp. 211–231). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198526544.003.0018>
- Büscher, D., Hagemann, N., & Bender, N. (2009). Das Lateral Preference Inventory: Itemhomogenität der deutschen Version. *Zeitschrift Für Sportpsychologie*, 16(1), 17–28.
<https://doi.org/10.1026/1612-5010.16.1.17>
- Butler, K. M., Zacks, R. T., & Henderson, J. M. (1999). Suppression of reflexive saccades in younger and older adults: Age comparisons on an antisaccade task. *Memory and Cognition*, 27(4), 584–591.
<https://doi.org/10.3758/bf03211552>
- Butterfuss, R., & Kendeou, P. (2018). The role of executive functions in reading comprehension. *Educational Psychology Review*, 30(3), 801–826. <https://doi.org/10.1007/s10648-017-9422-6>
- Cacioppo, J. T., & Patrick, W. (2008). *Loneliness. Human nature and the need for social connection*. W.W. Norton & Company.

- Cadoret, G., Bigras, N., Duval, S., Lemay, L., Tremblay, T., & Lemire, J. (2018). The mediating role of cognitive ability on the relationship between motor proficiency and early academic achievement in children. *Human Movement Science*, 57, 149–157.
- <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.12.002>
- Cameron, C. E. (2018). *Hands on, minds on: How executive function, motor, and spatial skills foster school readiness*. Teachers College Press.
- Cameron, C. E., Brock, L. L., Hatfield, B. E., Cottone, E. A., Rubenstein, E., LoCasale-Crouch, J., Grissmer, D. W., & Min, J. (2015). Visuomotor integration and inhibitory control compensate for each other in school readiness. *Developmental Psychology*, 51(11), 1529–1543.
- <https://doi.org/10.1037/a0039740>
- Cameron, C. E., Brock, L. L., Murrah, W. M., Bell, L. H., Worzalla, S. L., Grissmer, D., & Morrison, F. J. (2012). Fine motor skills and executive function both contribute to kindergarten achievement. *Child Development*, 83(4), 1229–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01768.x>
- Campbell, W. K., Krusemark, E. A., Dyckman, K. A., Brunell, A. B., McDowell, J. E., Twenge, J. M., & Clementz, B. A. (2006). A magnetoencephalography investigation of neural correlates for social exclusion and self-control. *Social Neuroscience*, 1(2), 124–134.
- <https://doi.org/10.1080/17470910601035160>
- Cantin, R. H., Gnaedinger, E. K., Gallaway, K. C., Hesson-McInnis, M. S., & Hund, A. M. (2016). Executive functioning predicts reading, mathematics, and theory of mind during the elementary years. *Journal of Experimental Child Psychology*, 146, 66–78.
- <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.01.014>
- Carlson, A. G., Rowe, E., & Curby, T. W. (2013). Disentangling fine motor skills' relations to academic achievement: The relative contributions of visual-spatial integration and visual-motor coordination. *The Journal of Genetic Psychology*, 174(5), 514–533.
- <https://doi.org/10.1080/00221325.2012.717122>
- Carver, A. C., Livesey, D. J., & Charles, M. (2001). Age related changes in inhibitory control as measured by stop signal task performance. *International Journal of Neuroscience*, 107(1–2), 43–61.
- <https://doi.org/10.3109/00207450109149756>
- Casey, B. J., Giedd, J. N., & Thomas, K. M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, 54(1–3), 241–257.
- [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00058-2)
- Casey, B. J., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 104–110.
- <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.011>

- Cepeda, N. J., Kramer, A. F., & Gonzalez de Sather, J. C. M. (2001). Changes in executive control across the life span: examination of task-switching performance. *Developmental Psychology, 37*(5), 715–730. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.37.5.715>
- Cerqueira, J. J., Mailliet, F., Almeida, O. F. X., Jay, T. M., & Sousa, N. (2007). The prefrontal cortex as a key target of the maladaptive response to stress. *The Journal of Neuroscience, 27*(11), 2781–2787. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4372-06.2007>
- Chang, Y.-K., Tsai, Y. J., Chen, T.-T., & Hung, T.-M. (2013). The impacts of coordinative exercise on executive function in kindergarten children: An ERP study. *Experimental Brain Research, 225*(2), 187–196. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3360-9>
- Chein, J. M., & Schneider, W. (2005). Neuroimaging studies of practice-related change: fMRI and meta-analytic evidence of a domain-general control network for learning. *Cognitive Brain Research, 25*(3), 607–623. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.08.013>
- Chevalier, N. (2015). Executive function development: Making sense of the environment to behave adaptively. *Current Directions in Psychological Science, 24*(5), 363–368. <https://doi.org/10.1177/0963721415593724>
- Chevalier, N., Sheffield, T. D., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Wiebe, S. A., & Espy, K. A. (2012). Underpinnings of the costs of flexibility in preschool children: The roles of inhibition and working memory. *Developmental Neuropsychology, 37*(2), 99–118. <https://doi.org/10.1080/87565641.2011.632458>.
- Clark, J. E., & Metcalfe, J. S. (2002). The mountain of motor development: A metaphor. In J. E. Clark & J. Humphreys (Eds.), *Motor development: Research and reviews* (Vol. 2, pp. 163–190). NASPE Publications.
- Cohen, G. N., Bronson, M. B., & Casey, M. B. (1995). Planning as a factor in school achievement. *Journal of Applied Developmental Psychology, 16*(3), 405–428. [https://doi.org/10.1016/0193-3973\(95\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0193-3973(95)90027-6)
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Salmon, E. (2005). Exploring the unity and diversity of the neural substrates of executive functioning. *Human Brain Mapping, 25*(4), 409–423. <https://doi.org/10.1002/hbm.20118>
- Cools, R. (2008). Role of dopamine in the motivational and cognitive control of behavior. *Neuroscientist, 14*(4), 381–395. <https://doi.org/10.1177/1073858408317009>
- Coren, S. (1993). The lateral preference inventory for measurement of handedness, footedness, eyedness, and earedness: Norms for young adults. *Bulletin of the Psychonomic Society, 31*(1), 1–3. <https://doi.org/10.3758/BF03334122>

- Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain*. McGill University.
- Coyle, T. R. (2003). A review of the worst performance rule: Evidence, theory, and alternative hypotheses. *Intelligence*, 31(6), 567–587. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(03\)00054-0](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(03)00054-0)
- Cragg, L., Keeble, S., Richardson, S., Roome, H. E., & Gilmore, C. (2017). Direct and indirect influences of executive functions on mathematics achievement. *Cognition*, 162, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.01.014>
- Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or no-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science*, 11(6), 819–827. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00730.x>
- Crova, C., Struzzolino, I., Marchetti, R., Masci, I., Vannozzi, G., Forte, R., & Pesce, C. (2014). Cognitively challenging physical activity benefits executive function in overweight children. *Journal of Sports Sciences*, 32(3), 201–211. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.828849>
- Cummings, J. L. (1993). Frontal-subcortical circuits and human behavior. *Journal of Psychosomatic Research*, 50, 873–880. <https://doi.org/10.1001/archneur.1993.00540080076020>
- Dalziell, A., Boyle, J., & Mutrie, N. (2015). Better movers and thinkers (BMT): An exploratory study of an innovative approach to physical education. *Europe's Journal of Psychology*, 11(4), 722–741. <https://doi.org/10.5964/ejop.v11i4.950>
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037–2078. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- de Frias, C. M., Lövdén, M., Lindenberger, U., & Nilsson, L.-G. (2007). Revisiting the dedifferentiation hypothesis with longitudinal multi-cohort data. *Intelligence*, 35(4), 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.07.011>
- de Greeff, J. W., Bosker, R. J., Oosterlaan, J., Visscher, C., & Hartman, E. (2017). Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: a meta-analysis. *Journal of Science a*, 21(5), 501–507. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.09.595>
- De Luca, C. R., & Leventer, R. J. (2008). Developmental trajectories of executive functions across the lifespan. In V. Anderson, R. Jacobs, & P. J. Anderson (Eds.), *Executive functions and the frontal lobes: A lifespan perspective* (pp. 23–56). Taylor & Francis Group.
- De Luca, C. R., Wood, S. J., Anderson, V., Buchanan, J.-A., Proffitt, T. M., Mahony, K., & Pantelis, C. (2003). Normative data from the Cantab. I: Development of executive function over the lifespan. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(2), 242–254. <https://doi.org/10.1076/jcen.25.2.242.13639>

- De Rammelaere, S., Stuyven, E., & Vandierendonck, A. (2001). Verifying simple arithmetic sums and products: Are the phonological loop and the central executive involved? *Memory & Cognition*, 29(2), 267–273. <https://doi.org/10.3758/BF03194920>
- Denckla, M. B. (1994). Measurement of executive function. In G. R. Lyon (Ed.), *Frames of references for the assessment of learning disabilities: New views on measurement issues* (pp. 117–142). Paul H Brooks Publishing Co.
- Dennis, M. (1989). Language & young damaged brain. In T. Boll & B. Bryant (Eds.), *Clinical neuropsychology and brain function: Research, measurement and practice* (pp. 89–123). American Psychological Association.
- Deoni, S. C. L., Mercure, E., Blasi, A., Gasston, D., Thomson, A., Johnson, M., Williams, S. C. R., & Murphy, D. G. M. (2011). Mapping infant brain myelination with magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, 31(2), 784–791. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2106-10.2011>
- Desseilles, M., Balteau, E., Sterpenich, V., Dang-Vu, T. T., Darsaud, A., Vandewalle, G., Albouy, G., Salmon, E., Peters, F., Schmidt, C., Schabus, M., Gais, S., Degueldre, C., Phillips, C., Luxen, A., Ansseau, M., Maquet, P., Maquet, P., & Schwartz, S. (2009). Abnormal neural filtering of irrelevant visual information in depression. *The Journal of Neuroscience*, 29(5), 1395–1403. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3341-08.2009>
- Deutsch, K. M., & Newell, K. M. (2004). Changes in the structure of children's isometric force variability with practice. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88(4), 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.04.003>
- Diamond, A. (1996). Evidence for the importance of dopamine for prefrontal cortex functions early in life. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*, 351(1346), 1483–1494. <https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0134>
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, 71(1), 44–56. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00117>
- Diamond, A. (2012). Activities and programs that improve children's executive functions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(5), 335–341. <https://doi.org/10.1177/0963721412453722>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2014). Want to optimize executive functions and academic outcomes? Simple, just nourish the human spirit. *Minnesota Symposia on Child Psychology*, 37, 205–232.
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science*, 318(5855), 1387–1388. <https://doi.org/10.1126/science.1151148>

- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4-12 years old. *Science*, 333(6045), 959–964. <https://doi.org/10.1126/science.1204529>.
- Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Diamond, A., & Ling, D. S. (2019). Commentary: Aerobic-exercise and resistance-training interventions have been among the least effective ways to improve executive functions of any method tried thus far. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 37(100572), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.05.001>
- Diamond, A., & Ling, D. S. (2020). Review of the evidence on, and fundamental questions about, efforts to improve executive functions, including working memory. In J. M. Novick, M. F. Bunting, M. R. Dougherty, & R. W. Engle (Eds.), *Cognitive and working memory training: Perspectives from psychology, neurosciences, and human development* (pp. 143–431). Oxford University Press.
- Dinehart, L., & Manfra, L. (2013). Associations between low-income children's fine motor skills in preschool and academic performance in second grade. *Early Education and Development*, 24(2), 138–161. <https://doi.org/10.1080/10409289.2011.636729>
- Donnelly, J. E., Greene, J. L., Gibson, C. A., Smith, B. K., Washburn, Richard, A., Sullivan, D. K., DuBose, K., Mayo, Matthew, S., Schmelzle, Kristin, H., Ryan, J. J., Jacobsen, D. J., & Williams, S. L. (2009). Physical activity across the curriculum (PAAC): A randomized controlled trial to promote physical activity and diminish overweight and obesity in elementary school children. *Preventive Medicine*, 49(4), 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2009.07.022>.
- Doyle, C., Smeaton, A. F., Roche, R. A. P., & Boran, L. (2018). Inhibition and updating, but not switching, predict developmental dyslexia and individual variation in reading ability. *Frontiers in Psychology*, 9:795, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00795>
- Doyon, J. (1997). Skill learning. In J. D. Schmahmann (Ed.), *The cerebellum and cognition* (pp. 273–294). Academic Press.
- Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.004>
- Durston, S., Davidson, M. C., Tottenham, N., Galvan, A., Spicer, J., Fossella, J. A., & Casey, B. J. (2006). A shift from diffuse to focal cortical activity with development. *Developmental Science*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00454.x>
- Edwards, W. H. (2011). *Motor learning and control. From theory to practice*. Wadsworth Cengage Learning. <https://doi.org/10.495-01080-4>

- Erickson, K. I., Hillman, C. H., & Kramer, A. F. (2015). Physical activity, brain, and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.01.005>
- Ericsson, I. (2008). Motor skills, attention and academic achievements. An intervention study in school years 1-3. *British Educational Research Journal*, 34(3), 301–313. <https://doi.org/10.1080/01411920701609299>
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143–149. <https://doi.org/10.3758/BF03203267>
- Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & Senn, T. E. (2004). The contribution of executive functions to emergent mathematic skills in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1), 465–486. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_6
- Fälth, L., Jaansson, L., & Johansson, K. (2015). Working memory training - A Cogmed intervention. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 14(2), 28–35.
- Fernandes, V. R., Ribeiro, M. L. S., Melo, T., Maciel-Pinheiro, P. de T., Guimaraes, T. T., Araujo, N. B., Ribeiro, S., & Deslandes, A. C. (2016). Motor coordination correlates with academic achievement and cognitive function in children. *Frontiers in Psychology*, 7:318, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00318>
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381–391. <https://doi.org/10.1037/h0055392>
- Fitts, P. M., & Posner, M. T. (1967). *Human performance*. Brooks/Cole.
- Floyer-Lea, A., & Matthews, P. M. (2004). Changing brain networks for visuomotor control with increased movement automaticity. *Journal of Neurophysiology*, 92(4), 2405–2412. <https://doi.org/10.1152/jn.01092.2003>
- Fransson, P. A., Gomez, S., Patel, M., & Johansson, L. (2007). Changes in multi-segmented body movements and EMG activity while standing on firm and foam support surfaces. *European Journal of Applied Physiology*, 101(1), 81–89. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0476-x>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201–225. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.2.201>
- Fuster, J. M. (2002). Frontal lobe and cognitive development. *Journal of Neurocytology*, 31(3–5), 373–385. <https://doi.org/10.1023/a:1024190429920>
- Gallotta, M. C., Emerenziani, G., Pietro, Iazzoni, S., Meucci, M., Baldari, C., & Guidetti, L. (2015). Impacts of coordinative training on normal weight and overweight/obese children's attentional performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(577), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00577>

- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31–60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Garrett, H. E. (1946). A developmental theory of intelligence. *American Psychologist*, 1(9), 372–378. <https://doi.org/10.1037/h0056380>
- Gathercole, S. E., & Alloway, T. P. (2008). *Working memory & learning: A practical guide for teachers*. SAGE.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40(2), 177–190. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.177>
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working memory skills and educational attainment: Evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 1–16. <https://doi.org/10.1002/acp.934>
- Georgiou, G. K., & Das, J. P. (2016). What component of executive functions contributes to normal and impaired reading comprehension in young adults? *Research in Developmental Disabilities*, 49–50, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.12.001>
- Ghahramani, M. H., Sohrabi, M., Kakhki, A. S., & Besharat, M. A. (2016). The effects of physical activity on impulse control, attention, decision-making and motor functions in students with high and low impulsivity. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13(3), 1689–1696. <https://doi.org/10.13005/bbra/2318>
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C., & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861–863. <https://doi.org/10.1038/13158>
- Gläscher, J., Adolphs, R., Damasio, H., Bechara, A., Rudrauf, D., Calamia, M., Paul, L. K., & Tranel, D. (2012). Lesion mapping of cognitive control and value-based decision making in the prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(36), 14681–14686. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206608109>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent III, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., & Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Golenia, L., Schoemaker, M. M., Otten, E., Mouton, L. J., & Bongers, R. M. (2017). What the dynamic systems approach can offer for understanding development: An example of mid-childhood reaching. *Frontiers in Psychology*, 8(1774), 1–6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01774>

- Gonthier, C., Zira, M., Colé, P., & Blaye, A. (2019). Evidencing the developmental shift from reactive to proactive control in early childhood and its relationship to working memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 177, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.001>
- Grant, D. A., & Berg, E. A. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404–411. <https://doi.org/10.1037/h0059831>
- Gray, G. W. (1995). *Lower extremity functional profile*. Wynn Marketing, Inc.
- Greve, K. W. (2001). The WCST-64: A standardized short-form of the Wisconsin Card Sorting test. *The Clinical Neuropsychologist*, 15(2), 228–234. <https://doi.org/10.1076/clin.15.2.228.1901>
- Grimm, H., Aktas, M., & Frevert, S. (2010). *SETK 3-5. Sprachentwicklungs test für drei- bis fünfjährige Kinder* (2. Auflage). Hogrefe.
- Grissmer, D., Grimm, K. J., Aiyer, S. M., Murrah, W. M., & Steele, J. S. (2010). Fine motor skills and early comprehension of the world: Two new school readiness indicators. *Developmental Psychology*, 46(5), 1008–1017. <https://doi.org/10.1037/a0020104>
- Guadagnoli, M. A., & Lee, T. D. (2004). Challenge point: A framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 212–224. <https://doi.org/10.3200/JMBR.36.2.212-224>
- Gueugneau, N., Pozzo, T., Darlot, C., & Papaxanthis, C. (2017). Daily modulation of the speed–accuracy trade-off. *Neuroscience*, 356, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.04.043>
- Haapala, E. A. (2013). Cardiorespiratory fitness and motor skills in relation to cognition and academic performance in children - A Review. *Journal of Human Kinetics*, 36(1), 55–68. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0006>
- Hamilton, A. F. de C., Southgate, V., & Hill, E. (2015). The development of action cognition. In A. K. Engel, J. Friston, Karl, & D. Kragic (Eds.), *The pragmatic turn: Toward action-oriented views in cognitive science* (pp. 35–48). Strüngmann Forum Reports.
- Hartung, J., Engelhardt, L. E., Thibodeaux, M. L., Harden, K. P., & Tucker-Drob, E. M. (2020). Developmental transformations in the structure of executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 189(104681), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104681>
- Heaton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. G., & Curtiss, G. (1993). *Wisconsin Card Sorting test manual: Revised and expanded*. Psychological Assessment Resources.
- Henderson, S. E., & Sudgen, D. A. (1992). *The Movement Assessment Battery for Children*. The Psychological Corporation.
- Henderson, S. E., Sudgen, D. A., & Barnett, A. L. (2007). *Movement Assessment Battery for Children (M-ABC-2)*. Harcourt Assessment.

- Henry, L. A., Messer, D. J., & Nash, G. (2014). Testing for near and far transfer effects with a short, face-to-face adaptive working memory training intervention in typical children. *Infant and Child Development*, 23(1), 84–103. <https://doi.org/10.1002/icd.1816>
- Hertel, J., Braham, R. A., Hale, S. A., & Olmsted-Kramer, L. C. (2006). Simplifying the Star Excursion Balance test: Analyses of subjects with and without chronic ankle instability. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 36(3), 131–137. <https://doi.org/10.2519/jospt.2006.36.3.131>
- Heyes, C. (2018). *Cognitive gadgets: The cultural evolution of thinking*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/9780674985155>
- Hillman, C. H., McAuley, E., Erickson, K. I., Liu-Ambrose, T., & Kramer, A. F. (2019). On mindful and mindless physical activity and executive function: A response to Diamond and Ling (2016). *Developmental Cognitive Neuroscience*, 37(100529), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.01.006>
- Holmes, J., Gathercole, S. E., & Dunning, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental Science*, 12(4), 1–7. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00848.x>
- Hommel, B. (2011). The Simon effect as tool and heuristic. *Acta Psychologica*, 136(2), 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.04.011>
- Houwen, S., Kamphorst, E., van der Veer, G., & Cantell, M. (2019). Identifying patterns of motor performance, executive functioning, and verbal ability in preschool children: A latent profile analysis. *Research in Developmental Disabilities*, 84, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.04.002>
- Howard, S. J., Okely, A. D., & Ellis, Y. G. (2015). Evaluation of a differentiation model of preschoolers' executive functions. *Frontiers in Psychology*, 6(285), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00285>
- Hsieh, S.-S., Lin, C.-C., Chang, Y.-K., Huang, C.-J., Hung, T.-M., City, T., Science, C., City, T., & City, T. (2017). Effects of childhood gymnastics program on spatial working memory. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(12), 2537–2547. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001399>
- Hughes, C., Ensor, R., Wilson, A., & Graham, A. (2010). Tracking executive function across the transition to school: A latent variable approach. *Developmental Neuropsychology*, 35(1), 20–36. <https://doi.org/10.1080/87565640903325691>
- Hughes, C., & Graham, a. (2002). Measuring executive functions in childhood: Problems and solutions? *Child and Adolescent Mental Health*, 7(3), 131–142. <https://doi.org/10.1111/1475-3588.00024>

- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017–2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>
- Huttenlocher, P. R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex - developmental changes and effects of aging. *Brain Research*, 163(2), 195–205. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(79\)90349-4](https://doi.org/10.1016/0006-8993(79)90349-4)
- Hytönen, M., Pyykkö, I., Aalto, H., & Starck, J. (1993). Postural control and age. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(2), 119–122. <https://doi.org/10.3109/00016489309135778>
- Ionescu, T. (2012). Exploring the nature of cognitive flexibility. *New Ideas in Psychology*, 30(2), 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2011.11.001>
- Ito, T. A., Friedman, N. P., Bartholow, B. D., Correll, J., Loersch, C., Altamirano, L. J., & Miyake, A. (2015). Toward a comprehensive understanding of executive cognitive function in implicit racial bias. *Journal of Personality and Social Psychology*, 108(2), 187–218. <https://doi.org/10.1037/a0038557>
- Jacobs, J. V., & Horak, F. B. (2007). Cortical control of postural responses. *Journal of Neural Transmission*, 114(10), 1339–1348. <https://doi.org/10.1007/s00702-007-0657-0>
- Jain, A., & Spieß, R. (2012). Versuchspläne der experimentellen Einzelfallforschung. *Empirische Sonderpädagogik*, 4(3/4), 211–245.
- Johnson, M. H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(7), 475–483. <https://doi.org/10.1038/35081509>
- Johnson, M. H. (2011). Interactive specialization: A domain-general framework for human functional brain development? *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(1), 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2010.07.003>
- Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The elusive nature of executive functions: A Review of our current understanding. *Neuropsychology Review*, 17(3), 213–233. <https://doi.org/10.1007/s11065-007-9040-z>
- Kaller, C. P., Rahm, B., Spreer, J., Mader, I., & Unterrainer, J. M. (2008). Thinking around the corner: The development of planning abilities. *Brain and Cognition*, 67(3), 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.02.003>
- Kamijo, K., Pontifex, M. B., O’Leary, K. C., Scudder, M. R., Wu, C.-T., Castelli, D. M., & Hillman, C. H. (2011). The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Developmental Science*, 14(5), 1046–1058. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01054.x>
- Kapteyn, T. S., Bles, W., Njiokiktjien, C., Kodde, L., Massen, C. H., & Mol, J. M. (1983). Standardization in platform stabilometry being a part of posturography. *Agressologie*, 24(7), 321–326.

- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., Hofer, S. M., Iverson, G. L., & Garcia-Barrera, M. A. (2018). The unity and diversity of executive functions: a systematic review and re- analysis of latent variable studies. *Psychological Bulletin*, 144(11), 1147–1185. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>
- Kaufmann, L., Nuerk, H.-C., Graf, M., Krinzinger, H., Delazer, M., & Willmes, K. (2009). *Test zur Erfassung numerisch-rechnerischer Fertigkeiten vom Kindergarten bis zur 3. Klasse (TEDI-MATH)*. Huber.
- Kazdin, A. E. (2011). *Single-case research designs: Methods for clinical and applied settings* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Kennedy, A., Guevel, A., & Sveistrup, H. (2012). Impact of ankle muscle fatigue and recovery on the anticipatory postural adjustments to externally initiated perturbations in dynamic postural control. *Experimental Brain Research*, 223(4), 553–562. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3282-6>
- Kessels, R. P. C., van Zandvoort, M. J. E., Postma, A., Kappelle, L. J., & de Haan, E. H. F. (2000). The Corsi Block-Tapping task: Standardization and normative data. *Applied Neuropsychology*, 7(4), 252–258. https://doi.org/10.1207/S15324826AN0704_8
- Kiselev, S., Espy, K. A., & Sheffield, T. (2009). Age-related differences in reaction time task performance in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102(2), 150–166. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.02.002>
- Kloskowski, M. (o. J.). Himmel und Hölle basteln. Abgerufen 02. Juni 2020, von <https://www.basteln-gestalten.de/himmel-und-hoelle-basteln>
- Koutsandréou, F., Wegner, M., Niemann, C., & Budde, H. (2016). Effects of motor versus cardiovascular exercise training on children's working memory. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(6), 1144–1152. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000869>
- Koziol, L. F. (2014). *The myth of executive functioning. Missing elements in conceptualization, evaluation, and assessment*. Springer.
- Koziol, L. F., Budding, D., Andreasen, N., D'Arrigo, S., Bulgheroni, S., Imamizu, H., Ito, M., Manto, M., Marvel, C., Parker, K., Pezzulo, G., Ramnani, N., Riva, D., Schmahmann, J. D., Vandervert, L., & Yamazaki, T. (2014). Consensus Paper: The cerebellum's role in movement and cognition. *Cerebellum*, 13(1), 151–177. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0511-x>.
- Koziol, L. F., Budding, D. E., & Chidekel, D. (2012). From movement to thought: Executive function, embodied cognition, and the cerebellum. *Cerebellum*, 11(2), 505–525. <https://doi.org/10.1007/s12311-011-0321-y>
- Kray, J., Eber, J., & Lindenberger, U. (2004). Age differences in executive functioning across the lifespan: The role of verbalization in task preparation. *Acta Psychologica*, 115(2–3), 143–165. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.12.001>

- Krikorian, R., Bartok, J., & Gay, N. (1994). Tower of London procedure: A standard method and developmental data. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16(6), 840–850.
<https://doi.org/10.1080/01688639408402697>
- Kroesbergen, E. H., van't Noordende, J. E., & Kolkman, M. E. (2012). Training working memory in kindergarten children: Effects on working memory and early numeracy. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 20(1), 23–37.
<https://doi.org/10.1080/09297049.2012.736483>
- Kuan, C.-Y., Roth, K. A., Flavell, R. A., & Rakic, P. (2000). Mechanisms of programmed cell death in the developing brain. *Trends in Neurosciences*, 23(7), 291–297. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01581-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01581-2)
- Kytälä, M., Aunio, P., Lehto, J. E., Van Luit, J., & Hautamäki, J. (2003). Visuospatial working memory and early numeracy. *Educational and Child Psychology*, 20(3), 65–76.
- Lakes, K. D., & Hoyt, W. T. (2004). Promoting self-regulation through school-based martial arts training. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 25(3), 283–302.
<https://doi.org/10.1016/j.appdev.2004.04.002>
- Lan, X., Legare, C. H., Ponitz, C. C., Li, S., & Morrison, F. J. (2011). Investigating the links between the subcomponents of executive function and academic achievement: A cross-cultural analysis of Chinese and American preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 677–692.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.11.001>
- Larson, G. E., & Alderton, D. L. (1990). Reaction time variability and intelligence: A “worst performance” analysis of individual differences. *Intelligence*, 14(3), 309–325.
[https://doi.org/10.1016/0160-2896\(90\)90021-K](https://doi.org/10.1016/0160-2896(90)90021-K)
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. H. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Development*, 84(6), 1933–1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59–80.
<https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Leisman, G., Braun-Benjamin, O., & Melillo, R. (2014). Cognitive-motor interactions of the basal ganglia in development. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 1–18.
<https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00016>
- Leisman, G., Moustafa, A. A., & Shafir, T. (2016). Thinking, walking, talking: Integratory motor and cognitive brain function. *Frontiers in Public Health*, 4:94, 1–19.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00094>
- Leversen, J. S. R., Haga, M., & Sigmundsson, H. (2012). From children to adults: Motor performance across the life-span. *PLoS One*, 7(6), 1–7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038830>

- Lezak, M. D. (1982). The problem of assessing executive functions. *International Journal of Psychology*, 17(2–3), 281–297. <https://doi.org/10.1080/00207598208247445>
- Li, S.-C., Lindenberger, U., Hommel, B., Aschersleben, G., Prinz, W., & Baltes, P. B. (2004). Transformations in the couplings among intellectual abilities and constituent cognitive processes across the life span. *Psychological Science*, 15(3), 155–163. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.01503003.x>
- Livingston, D., Keen, J., Rouse, J., & White, F. (2006). The relationship between measures of executive function, motor performance and externalising behaviour in 5- and 6-year-old children. *Human Movement Science*, 25(1), 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2005.10.008>
- Logan, S. W., & Fischman, M. G. (2015). The death of recency: Relationship between end-state comfort and serial position effects in serial recall: Logan and Fischman (2011) revisited. *Human Movement Science*, 44, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.003>
- Lu, C.-H., & Proctor, R. W. (1995). The influence of irrelevant location information on performance: A review of the Simon and spatial Stroop effects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(2), 174–207. <https://doi.org/10.3758/BF03210959>
- Lucenet, J., & Blaye, A. (2014). Age-related changes in the temporal dynamics of executive control: a study in 5- and 6-year-old children. *Frontiers in Psychology*, 5(831), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00831>
- Luciana, M., & Nelson, C. A. (1998). The functional emergence of prefrontally-guided working memory systems in four- to eight-year-old children. *Neuropsychologia*, 36(3), 273–293. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00109-7)
- Ludyga, S., Koutsandréou, F., Reuter, E.-M., Voelcker-Rehage, C., & Budde, H. (2019). A randomized controlled trial on the effects of aerobic and coordinative training on neural correlates of inhibitory control in children. *Journal of Clinical Medicine*, 8(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/jcm8020184>
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Development*, 75(5), 1357–1372. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00745.x>
- Luria, A. R. (1973). The frontal lobes and the regulation of behavior. In K. H. Pribram & A. R. Luria (Eds.), *Psychophysiology of the frontal lobes* (pp. 3–28). Academic Press. <https://doi.org/10.1483205924>
- Lyons-Warren, A., Lillie, R., & Hershey, T. (2004). Short- and long-term spatial delayed response performance across the lifespan. *Developmental Neuropsychology*, 26(3), 661–678. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2603_1
- MacDonald, M., Lipscomb, S., McClelland, M. M., Duncan, R., Becker, D., Anderson, K., & Kile, M. (2016). Relations of preschoolers' visual motor and object manipulation skills with executive

- function and social behavior. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 87(4), 396–407.
<https://doi.org/10.1080/02701367.2016.1229862>
- Magill, R. A. (2001). *Motor learning: Concepts and applications* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Mann, T. D., Hund, A. M., Hesson-McInnis, M. S., & Roman, Z. J. (2017). Pathways to school readiness: Executive functioning predicts academic and social-emotional aspects of school readiness. *Mind, Brain, and Education*, 11(1), 21–31. <https://doi.org/10.1111/mbe.12134>
- Maurer, M. N., & Roebers, C. M. (2019). Towards a better understanding of the association between motor skills and executive functions in 5- to 6-year-olds: The impact of motor task difficulty. *Human Movement Science*, 66, 607–620. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.06.010>
- McClelland, M. M., & Cameron, C. E. (2019). Developing together: The role of executive function and motor skills in children's early academic lives. *Early Childhood Research Quarterly*, 46, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.03.014>
- McCormack, T., & Atance, C. M. (2011). Planning in young children: A review and synthesis. *Developmental Review*, 31(1), 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2011.02.002>
- McDermott, J. M., Pérez-Edgar, K., & Fox, N. A. (2007). Variations of the flanker paradigm: Assessing selective attention in young children. *Behavior Research Methods*, 39(1), 62–70. <https://doi.org/10.3758/bf03192844>
- McKenna, R., Rushe, T., & Woodcock, K. A. (2017). Informing the structure of executive function in children: A meta-analysis of functional neuroimaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11(154), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00154>
- McKenzie, B., Bull, R., & Gray, C. (2003). The effects of phonological and visual-spatial interference on children's arithmetic performance. *Educational and Child Psychology*, 20(3), 93–108.
- Melby-Lervåg, M., Redick, T. S., & Hulme, C. (2016). Working memory training does not improve performance on measures of intelligence or other measures of "far transfer": Evidence from a meta-analytic review. *Perspectives on Psychological Science*, 11(4), 512–534. <https://doi.org/10.1177/1745691616635612>
- Michel, E., Cimeli, P., Neuenschwander, R., Röthlisberger, M., & Roebers, C. M. (2013). Entwicklung von Handkoordination, exekutiven Funktionen und Schulleistungen bei Kindern mit Auffälligkeiten in der Handgeschicklichkeit. *Zeitschrift Für Entwicklungspsychologie Und Padagogische Psychologie*, 45(4), 191–206. <https://doi.org/10.1026/0049-8637/a000097>
- Michel, E., Kauer, M., & Roebers, C. M. (2011). Motorische Koordinationsdefizite im Kindesalter. *Kindheit Und Entwicklung*, 20(1), 49–58. <https://doi.org/10.1026/0942-5403/a000024>
- Michel, E., Molitor, S., & Schneider, W. (2019). Motor coordination and executive functions as early predictors of reading and spelling acquisition. *Developmental Neuropsychology*, 44(3), 282–295. <https://doi.org/10.1080/87565641.2019.1584802>

- Michel, E., Röthlisberger, M., Neuenschwander, R., & Roebers, C. M. (2011). Development of cognitive skills in children with motor coordination impairments at 12-month follow-up. *Child Neuropsychology, 17*(2), 151–172. <https://doi.org/10.1080/09297049.2010.525501>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience, 24*, 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miller, M. R., Giesbrecht, G. F., Müller, U., McInerney, R. J., & Kerns, K. A. (2012). A latent variable approach to determining the structure of executive function in preschool children. *Journal of Cognition and Development, 13*(3), 395–423. <https://doi.org/10.1080/15248372.2011.585478>
- Milner, B. (1964). Some effects of frontal lobectomy in man. In J. M. Warren & K. Akert (Eds.), *The Frontal Granular Cortex and Behavior* (pp. 313–334). McGraw-Hill.
- Misiaszek, J. E., & Vander Meulen, J. (2017). Balance reactions to light touch displacements when standing on foam. *Neuroscience Letters, 639*, 13–17.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.12.027>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organisation of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science, 21*(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (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.
<https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Monchi, O., Petrides, M., Strafella, A. P., Worsley, K. J., & Doyon, J. (2006). Functional role of the basal ganglia in the planning and execution of actions. *Annals of Neurology, 59*(2), 257–264.
<https://doi.org/10.1002/ana.20742>
- Monette, S., Bigras, M., & Guay, M.-C. (2011). The role of the executive functions in school achievement at the end of grade 1. *Journal of Experimental Child Psychology, 109*(2), 158–173.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.008>
- Monette, S., Bigras, M., & Lafrenière, M.-A. (2015). Structure of executive functions in typically developing kindergarteners. *Journal of Experimental Child Psychology, 140*, 120–139.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.07.005>
- Moreau, D., & Conway, A. R. A. (2013). Cognitive enhancement: A comparative review of computerized and athletic training programs. *International Review of Sport and Exercise Psychology, 6*(1), 155–183. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2012.758763>
- Morrison, F. J., Ponitz, C. C., & McClelland, M. M. (2010). Self-regulation and academic achievement in the transition to school. *Child Development at the Intersection of Emotion and Cognition, 6*(X), 203–224. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/12059-011>

- Motor Development Task Force. (1995). *Looking at physical education from a developmental perspective: A guide to teaching*. National Association for Sports and Physical Education.
- Muehlbauer, T., Mettler, C., Roth, R., & Granacher, U. (2014). One-leg standing performance and muscle activity: Are there limb differences? *Journal of Applied Biomechanics*, 30(3), 407–414. <https://doi.org/10.1123/jab.2013-0230>
- Muehlbauer, T., Roth, R., Bopp, M., & Granacher, U. (2012). An exercise sequence for progression in balance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(2), 568–574. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318225f3c4>
- Mueller, S. T., & Piper, B. J. (2014). The Psychology Experiment Building Language (PEBL) and PEBL test battery. *Journal of Neuroscience Methods*, 222, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.10.024>
- Munakata, Y., Snyder, H. R., & Chatham, C. H. (2012). Developing cognitive control: Three key transitions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(2), 71–77. <https://doi.org/10.1177/0963721412436807>.
- Munro, A. G., & Herrington, L. C. (2010). Between-session reliability of the star excursion balance test. *Physical Therapy in Sport*, 11(4), 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2010.07.002>
- Nevo, E., & Breznitz, Z. (2013). The development of working memory from kindergarten to first grade in children with different decoding skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 114(2), 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.09.004>
- Oberer, N., Gashaj, V., & Roebers, C. M. (2017). Motor skills in kindergarten: Internal structure, cognitive correlates and relationships to background variables. *Human Movement Science*, 52, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.02.002>
- Okada, K. (2013). Is omega squared less biased? A comparison of three major effect size indices in one-way ANOVA. *Behaviormetrika*, 40(2), 129–147. <https://doi.org/10.2333/bhmk.40.129>
- Pangalinan, M. M., Zhang, G., VanMeter, J. W., Clark, J. E., Hatfield, Bradley, D., & Haufler, A. J. (2011). Beyond age and gender: Relationships between cortical and subcortical brain volume and cognitive-motor abilities in school-age children. *Neuroimage*, 54(4), 3093–3100. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.021>
- Patel, R., Spreng, R. N., & Turner, G. R. (2013). Functional brain changes following cognitive and motor skills training: A quantitative meta-analysis. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 27(3), 187–199. <https://doi.org/10.1177/1545968312461718>
- Payne, V. G., & Isaacs, L. D. (2012). *Human motor development: A lifespan approach* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Pellicano, E., Kenny, L., Brede, J., Klaric, E., Lichwa, H., & McMillin, R. (2017). Executive function predicts school readiness in autistic and typical preschool children. *Cognitive Development*, 43, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2017.02.003>

- Pennequin, V., Sorel, O., & Fontaine, R. (2010). Motor planning between 4 and 7 years of age: Changes linked to executive functions. *Brain and Cognition*, 74(2), 107–111.
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.07.003>
- Perry, S. D., McIlroy, W. E., & Maki, B. E. (2000). The role of plantar cutaneous mechanoreceptors in the control of compensatory stepping reactions evoked by unpredictable, multi-directional perturbation. *Brain Research*, 877(2), 401–406. [https://doi.org/10.1016/S0006-8993\(00\)02712-8](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(00)02712-8)
- Pesce, C. (2012). Shifting the focus from quantitative to qualitative exercise characteristics in exercise and cognition research. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 34(6), 766–786.
<https://doi.org/10.1123/jsep.34.6.766>
- Pesce, C., & Ben-Soussan, T. D. (2016). “Cogito ergo sum” or “ambulo ergo sum”? New perspectives in developmental exercise and cognition research. In T. McMorris (Ed.), *Exercise-Cognition Interaction: Neuroscience Perspectives* (pp. 251–282). Elsevier Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800778-5.00012-8>
- Petermann, F. (Ed. . (2009). *Movement Assessment Battery for Children-2 (M-ABC-2)* (2. veränd.). Pearson Assessment.
- Peters, A., Morrison, J. H., Rosene, D. L., & Hyman, B. T. (1998). Feature article: are neurons lost from the primate cerebral cortex during normal aging? *Cerebral Cortex*, 8(4), 295–300.
<https://doi.org/10.1093/cercor/8.4.295>
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. W W Norton & Co.
<https://doi.org/10.1037/11494-000>
- Piek, J. P., Dyck, M. J., Francis, M., & Conwell, A. (2007). Working memory, processing speed, and set-shifting in children with developmental coordination disorder and attention-deficit-hyperactivity disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(9), 678–683.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00678.x>
- Piper, B. J., Li, V., Eiwaz, M. A., Kobel, Y. V., Benice, T. S., Chu, A. M., Olsen, R. H. J., Rice, D. Z., Gray, H. M., & Mueller, S. T. (2012). Executive function on the Psychology Experiment Building Language tests. *Behavior Research Methods*, 44(1), 110–123. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0096-6>
- Planinsec, J. (2002). Relations between motor and cognitive dimensions of preschool girls and boys. *Perceptual and Motor Skills*, 94(2), 415–423. <https://doi.org/10.2466/pms.2002.94.2.415>
- Poldrack, R. A., Sabb, F. W., Foerde, K., Tom, S. M., Asarnow, R. F., Bookheimer, S. Y., & Knowlton, B. J. (2005). The neural correlates of motor skill automaticity. *Journal of Neuroscience*, 25(22), 5356–5364. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3880-04.2005>
- Poole, J. L. (2009). Age related changes in sensory system dynamics related to balance. *Physical & Occupational Therapy in Geriatrics*, 10(2), 55–66. https://doi.org/10.1080/J148v10n02_04

- Poon, K. (2018). Hot and cool executive functions in adolescence: Development and contributions to important developmental outcomes. *Frontiers in Psychology*, 8(2311), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02311>
- Purpura, D. J., Schmitt, S. A., & Ganley, C. M. (2017). Foundations of mathematics and literacy: The role of executive functioning components. *Journal of Experimental Child Psychology*, 153, 15–34. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.08.010>
- Rabbitt, P. (1997). Methodologies and models in the study of executive function. In P. Rabbitt (Ed.), *Methodology of frontal and executive function* (pp. 1–38). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.4324/9780203344187>
- Raghubar, K. P., Barnes, M. A., & Hecht, S. A. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.005>
- Redick, T. S., Shipstead, Z., Wiemers, E. A., Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2015). What's working in working memory training? An educational perspective. *Educational Psychology Review*, 27(4), 617–633. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9314-6>
- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1995). Category test and Trail Making test as measures of frontal lobe functions. *The Clinical Neuropsychologist*, 9(1), 50–56. <https://doi.org/10.1080/13854049508402057>
- Resaland, G. K., Aadland, E., Fusche Moe, V., Aadland, K. N., Skrede, T., Stavnsbo, M., Suominen, L., Steene-Johannessen, J., Glosvik, Ø., Andersen, J. R., Kvalheim, O. M., Engelsrud, G., Andersen, L. B., Holme, I. M., Ommundsen, Y., Kriemler, S., van Mechelen, W., McKay, H. A., Ekelund, U., & Anderssen, S. A. (2016). Effects of physical activity on schoolchildren's academic performance: The Active Smarter Kids (ASK) cluster-randomized controlled trial. *Preventive Medicine*, 91, 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.09.005>
- Rigoli, D., Piek, J. P., Kane, R., & Oosterlaan, J. (2012). An examination of the relationship between motor coordination and executive functions in adolescents. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 54(11), 1025–1031. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04403.x>
- Rigoli, D., Piek, J. P., Kane, R., Whillier, A., Baxter, C., & Wilson, P. (2013). An 18-month follow-up investigation of motor coordination and working memory in primary school children. *Human Movement Science*, 32(5), 1116–1126. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.07.014>
- Robinson, R. H., & Gribble, P. A. (2008). Support for a reduction in the number of trials needed for the Star Excursion Balance test. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(2), 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.08.139>
- Roebers, C. M., & Kauer, M. (2009). Motor and cognitive control in a normative sample of 7-year-olds. *Developmental Science*, 12(1), 175–181. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00755.x>

- Roebers, C. M., Röthlisberger, M., Neuenschwander, R., Cimeli, P., Michel, E., & Jäger, K. (2014). The relation between cognitive and motor performance and their relevance for children's transition to school: A latent variable approach. *Human Movement Science*, 33(1), 284–297.
- <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.08.011>
- Romberg, A. R., & Saffran, J. R. (2010). Statistical learning and language acquisition. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 1(6), 906–914. <https://doi.org/10.1002/wcs.78>.
- Romine, C. B., & Reynolds, C. R. (2005). A model of the development of frontal lobe functioning: Findings from a meta-analysis. *Applied Neuropsychology*, 12(4), 190–201.
- https://doi.org/10.1207/s15324826an1204_2
- Rosengren, K. S., Rajendran, K., Contakos, J., Chuang, L.-L., Peterson, M., Doyle, R., & McAuley, E. (2007). Changing control strategies during standard assessment using computerized dynamic posturography with older women. *Gait Posture*, 25(2), 215–221.
- <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.03.009>
- Roth, R., Tam, S.-Y., Ida, Y., Yang, J.-X., & Deutch, A. Y. (1988). Stress and the mesocorticolimbic dopamine systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 537, 138–147.
- <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1988.tb42102.x>
- Rothbart, M. K., & Bates, J. E. (2006). Temperament. In N. Eisenberg, W. Damon, & R. M. Lerner (Eds.), *Handbook of child psychology* (pp. 99–166). John Wiley & Sons Inc.
- Röthlisberger, M., Neuenschwander, R., Michel, E., & Roebers, C. M. (2010). Exekutive Funktionen: Zugrundeliegende kognitive Prozesse und deren Korrelate bei Kindern im späten Vorschulalter. *Zeitschrift Für Entwicklungspsychologie Und Pädagogische Psychologie*, 42(2), 99–110.
- <https://doi.org/10.1026/0049-8637/a000010>
- Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C. R., Simmons, A., Andrew, C., & Bullmore, E. T. (2000). Functional frontalisat ion with age: Mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24(1), 13–19.
- [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(99\)00055-x](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(99)00055-x)
- Salat, D. H., Kaye, J. A., & Janowsky, J. S. (2001). Selective preservation and degeneration within the prefrontal cortex in aging and Alzheimer disease. *Archives of Neurology*, 58(9), 1403–1408.
- <https://doi.org/10.1001/archneur.58.9.1403>
- Salthouse, T. A. (2010). Is flanker-based inhibition related to age? Identifying specific influences of individual differences on neurocognitive variables. *Brain and Cognition*, 73(1), 51–61.
- <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.02.003>
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(4), 566–594. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.132.4.566>

- Sánchez-Cubillo, I., Periáñez, J. A., Adrover-Roig, D., Rodríguez-Sánchez, J. M., Ríos-Lago, M., Tirapu, J., & Barceló, F. (2009). Construct validity of the Trail Making test: Role of task-Switching, working memory, inhibition/interference control, and visuomotor abilities. *Journal of International Neuropsychological Society*, 15(3), 438–450. <https://doi.org/10.1017/S1355617709090626>
- Schmahmann, J. D. (1996). From movement to thought: Anatomic substrates of the cerebellar contribution to cognitive processing. *Human Brain Mapping*, 4(3), 174–198. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1996\)4:3<174::AID-HBM3>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1996)4:3<174::AID-HBM3>3.0.CO;2-0)
- Schmidt, M., Jäger, K., Egger, F., Roebers, C. M., & Conzelmann, A. (2015). Cognitively engaging chronic physical activity, but not aerobic exercise, affects executive functions in primary school children: A group-randomized controlled trial. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 37(6), 575–591. <https://doi.org/10.1123/jsep.2015-0069>
- Senn, T. E., Espy, K. A., & Kaufmann, P. M. (2004). Using path analysis to understand executive function organization in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1), 445–464. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_5
- Serrien, D. J., Ivry, R. B., & Swinnen, S. P. (2006). Dynamics of hemispheric specialization and integration in the context of motor control. *Nature Reviews. Neuroscience*, 7(2), 160–166. <https://doi.org/10.1038/nrn1849>
- Serrien, D. J., Ivry, R. B., & Swinnen, S. P. (2007). The missing link between action and cognition. *Progress in Neurobiology*, 82(2), 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.02.003>
- Shadmehr, R., & Holcomb, H. H. (1997). Neural correlates of motor memory consolidation. *Science*, 277(5327), 821–825. <https://doi.org/10.1126/science.277.5327.821>
- Shaffer, S. W., & Harrison, A. L. (2007). Aging of the somatosensory system: A translational perspective. *Physical Therapy*, 87(2), 193–207. <https://doi.org/10.2522/ptj.20060083>
- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. In *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* (Vol. 298, Issue 1089, pp. 199–209). <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0082>
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511526817>
- Shing, Y. L., Lindenberger, U., Diamond, A., Li, S.-C., & Davidson, M. C. (2010). Memory maintenance and inhibitory control differentiate from early childhood to adolescence. *Developmental Neuropsychology*, 35(6), 679–697. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.508546>.
- Sigmundsson, H., Lorås, H., & Haga, M. (2016). Assessment of motor competence across the life span: Aspects of reliability and validity of a new test battery. *SAGE Open*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1177/2158244016633273>

- Sikora, D. M., Haley, P., Edwards, J., & Butler, R. W. (2002). Tower of London test performance in children with poor arithmetic skills. *Developmental Neuropsychology*, 21(3), 243–254.
https://doi.org/10.1207/S15326942DN2103_2
- Simmons, F., Singleton, C., & Horne, J. (2008). Brief report-Phonological awareness and visual-spatial sketchpad functioning predict early arithmetic attainment: Evidence from a longitudinal study. *European Journal of Cognitive Psychology*, 20(4), 711–722.
<https://doi.org/10.1080/09541440701614922>
- Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory S-R compatibility: the effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51(3), 300–304.
<https://doi.org/10.1037/h0020586>
- Singh, A. S., Saliasi, E., van den Berg, V., Uijtdewilligen, L., de Groot, R. H. M., Jolles, J., Andersen, L. B., Bailey, R., Chang, Y.-K., Diamond, A., Ericsson, I., Etnier, J. L., Fedewa, A. L., Hillman, C. H., McMorris, T., Pesce, C., Pühse, U., Tomporowski, P. D., & Chinapaw, M. J. M. (2018). Effects of physical activity interventions on cognitive and academic performance in children and adolescents: a novel combination of a systematic review and recommendations from an expert panel. *British Journal of Sports Medicine*, 53(10), 640–647. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098136>
- Smits-Engelsman, B. C. M., Henderson, S. E., & Michels, C. G. J. (1998). The assessment of children with developmental coordination disorders in the Netherlands: The relationship between the Movement Assessment Battery for Children and the Körperkoordinationstest für Kinder. *Human Movement Science*, 17, 699–709. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(98\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(98)00019-0)
- Somson, R. J. M. (2007). The development of attention regulation in the Wisconsin Card Sorting task. *Developmental Science*, 10(5), 664–680. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00613.x>
- Spedden, M. E., Malling, A. S. B., Andersen, K. K., & Jensen, B. R. (2017). Association between gross-motor and executive function depends on age and motor task complexity. *Developmental Neuropsychology*, 42(7–8), 495–506. <https://doi.org/10.1080/87565641.2017.1399129>
- Springer, B. A., Marin, R., Cyhan, T., Roberts, H., & Gill, N. W. (2007). Normative values for the unipedal stance test with eyes open and closed. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, 30(1), 8–15.
<https://doi.org/10.1519/00139143-200704000-00003>
- St Clair-Thompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745–759. <https://doi.org/10.1080/17470210500162854>
- Steinlin, M. (2007). The cerebellum in cognitive processes: Supporting studies in children. *Cerebellum*, 6(3), 237–241. <https://doi.org/10.1080/14734220701344507>

- Sternad, D. (2018). It's not (only) the mean that matters: Variability, noise and exploration in skill learning. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 20, 183–195.
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.01.004>
- Stöckel, T., & Hughes, C. M. L. (2015). Effects of multiple planning constraints on the development of grasp posture planning in 6- to 10-year-old children. *Developmental Psychology*, 51(9), 1254–1261. <https://doi.org/10.1037/a0039506>
- Stöckel, T., & Hughes, C. M. L. (2016). The relation between measures of cognitive and motor functioning in 5- to 6-year-old children. *Psychological Research*, 80(4), 543–554.
<https://doi.org/10.1007/s00426-015-0662-0>
- Stöckel, T., Wunsch, K., & Hughes, C. M. L. (2017). Age-related decline in anticipatory motor planning and its relation to cognitive and motor skill proficiency. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9(283), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00283>
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662.
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: A conceptual view. *Psychological Research*, 63(3–4), 289–298. <https://doi.org/10.1007/s004269900007>
- Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1984). Neuropsychological studies of the frontal lobes. *Psychological Bulletin*, 95(1), 3–28. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.95.1.3>
- Stuss, D. T., Shallice, T., Alexander, M. P., & Picton, T. W. (1995). A multidisciplinary approach to anterior attentional functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 15(769), 191–211. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1995.tb38140.x>
- Swinnen, S. P., Walter, C. B., Serrien, D. J., & Vandendriessche, C. (1992). The effect of movement speed on upper-limb coupling strength. *Human Movement Science*, 11(5), 615–636.
[https://doi.org/10.1016/0167-9457\(92\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0167-9457(92)90018-7)
- Teipel, D. (1988). *Diagnostik koordinativer Fähigkeiten. Eine Studie zur Struktur und querschnittlich betrachteten Entwicklung fein- und grobmotorischer Leistungen. Profil*.
- Telford, R. D., Cunningham, R. B., Fitzgerald, R., Olive, L. S., Prosser, L., Jiang, X., & Telford, R. M. (2012). Physical education, obesity, and academic achievement: A 2-year longitudinal investigation of Australian elementary school children. *American Journal of Public Health*, 102(2), 368–374. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2011.300220>
- Thompson, R. A., & Nelson, C. (2001). Developmental science and the media: Early brain development. *American Psychologist*, 56(1), 5–15. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.56.1.5>
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, 12(1), 106–113.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>

- Tiffin, J., & Asher, E. J. (1948). The Purdue Pegboard: Norms and studies of reliability and validity. *The Journal of Applied Psychology*, 32(3), 234–247. <https://doi.org/10.1037/h0061266>
- Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Lambourne, K., Gregoski, M., & Tkacz, J. (2008). Task switching in overweight children: Effects of acute exercise and age. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 30(5), 497–511. <https://doi.org/10.1123/jsep.30.5.497>
- Tomporowski, P. D., McCullick, B., Pendleton, D. M., & Pesce, C. (2015). Exercise and children's cognition: The role of exercise characteristics and a place for metacognition. *Journal of Sport and Health Science*, 4(1), 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.09.003>
- Trepel, M. (2015). *Neuroanatomie. Struktur und Funktion* (6. Auflage). Urban & Fischer.
- Tse, Y. Y. F., Petrofsky, J. S., Berk, L., Daher, N., Lohman, E., Laymon, M. S., & Cavalcanti, P. (2013). Postural sway and rhythmic electroencephalography analysis of cortical activation during eight balance training tasks. *Medical Science Monitor*, 19, 175–186. <https://doi.org/10.12659/MSM.883824>
- Tsujimoto, S., Kuwajima, M., & Sawaguchi, T. (2007). Developmental fractionation of working memory and response inhibition during childhood. *Experimental Psychology*, 54(1), 30–37. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.54.1.30>
- Tulsky, D. S., Carozzi, N., Chiaravalloti, N. D., Beaumont, J. L., Kisala, P. A., Mungas, D., Conway, K., & Gershon, R. (2014). NIH Toolbox Cognition Battery (NIHTB-CB): The List Sorting test to measure working memory. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 20(6), 599–610. <https://doi.org/10.1017/S135561771400040X>.
- Tulsky, D. S., Carozzi, N. E., Chevalier, N., Espy, K. A., Beaumont, J. L., & Mungas, D. (2013). V. NIH Toolbox Cognition Battery (CB): Measuring working memory. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 78(4), 70–87. <https://doi.org/10.1111/mono.12035>
- Uchiyama, M., & Demura, S. (2009). The role of eye movement in upright postural control. *Sport Sciences for Health*, 5(1), 21–27. <https://doi.org/10.1007/s11332-009-0072-z>
- Unterrainer, J. M., Rahm, B., Loosli, S. V., Rauh, R., Schumacher, L. V., Biscaldi, M., & Kaller, C. P. (2020). Psychometric analyses of the Tower of London planning task reveal high reliability and feasibility in typically developing children and child patients with ASD and ADHD. *Child Neuropsychology*, 26(2), 257–273. <https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1642317>
- Usai, M. C., Viterbori, P., Traverso, L., & De Franchis, V. (2014). Latent structure of executive function in five- and six-year-old children: A longitudinal study. *European Journal of Developmental Psychology*, 11(4), 447–462. <https://doi.org/10.1080/17405629.2013.840578>
- Usher, M., Olami, Z., & McClelland, J. L. (2002). Hick's law in a stochastic race model with speed-accuracy tradeoff. *Journal of Mathematical Psychology*, 46(6), 704–715. <https://doi.org/10.1006/jmps.2002.1420>

- van der Fels, I. M. J., te Wierike, S. C. M., Hartman, E., Elferink-Gemser, M. T., Smith, J., & Visscher, C. (2015). The relationship between motor skills and cognitive skills in 4 – 16 year old typically developing children: A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(6), 697–703. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.09.007>
- van der Niet, A. G., Smith, J., Oosterlaan, J., Scherder, E. J. A., Hartman, E., & Visscher, C. (2016). Effects of a cognitively demanding aerobic intervention during recess on children's physical fitness and executive functioning. *Pediatric Exercise Science*, 28(1), 64–70. <https://doi.org/10.1123/pes.2015-0084>
- van der Sluis, S., de Jong, P. F., & van der Leij, A. (2007). Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic. *Intelligence*, 35(5), 427–449. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.09.001>
- van der Ven, S. H. G., Kroesbergen, E. H., Boom, J., & Leseman, P. P. M. (2013). The structure of executive functions in children: A closer examination of inhibition, shifting, and updating. *British Journal of Developmental Psychology*, 31(Pt 1), 70–87. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.2012.02079.x>
- Van Nieuwenhoven, C., Noel, M.-P., & Grégoire, J. (2001). *TEDI-MATH. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. ECPA.
- Van Waelvelde, H., De Weerdt, W., De Cock, P., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2004). Aspects of the validity of the Movement Assessment Battery for Children. *Human Movement Science*, 23(1), 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2004.04.004>
- Vandenbroucke, L., Verschueren, K., & Baeyens, D. (2017). The development of executive functioning across the transition to first grade and its predictive value for academic achievement. *Learning and Instruction*, 49, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.12.008>
- Vazou, S., Pesce, C., Lakes, K., & Smiley-Oyen, A. (2016). More than one road leads to Rome: A narrative review and meta-analysis of physical activity intervention effects on cognition in youth. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 17(2), 153–178. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2016.1223423>
- Verbruggen, F., & Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.07.005>
- von Hecker, U., & Meiser, T. (2005). Defocused attention in depressed mood: Evidence from source monitoring. *Emotion*, 5(4), 456–463. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.5.4.456>
- von Hofsten, C. (2009). Action, the foundation for cognitive development. *Scandinavian Journal of Psychology*, 50(6), 617–623. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2009.00780.x>
- Vygotsky, L. (2012). *Thought and language* (E. Hanfmann, V. Gertrude, & A. Kozulin (eds.)). MIT Press.

- Watter, P., Rodger, S., Marinac, J., Woodyatt, G., Ziviani, J., & Ozanne, A. (2008). Multidisciplinary assessment of children with developmental coordination disorder: Using the ICF framework to inform assessment. *Physical and Occupational Therapy in Pediatrics*, 28(4), 331–352. <https://doi.org/10.1080/01942630802307093>
- Wechsler, D. (1991). *Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-III)* (3rd ed.). The Psychological Corporation.
- Weigelt, M., Rosenbaum, D. A., Huelshorst, S., & Schack, T. (2009). Moving and memorizing: Motor planning modulates the recency effect in serial and free recall. *Acta Psychologica*, 132(1), 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2009.06.005>
- Welsh, M. C., Pennington, B. F., & Groisser, D. B. (1991). A normative-developmental study of executive function: A window on prefrontal function in children. *Developmental Neuropsychology*, 7(2), 131–149. <https://doi.org/10.1080/87565649109540483>
- Wiebe, S. A., Espy, K. A., & Charak, D. (2008). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I. latent structure. *Developmental Psychology*, 44(2), 575–587. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.44.2.575>
- Willoughby, M. T., Blair, C. B., Wirth, R. J., & Greenberg, M. (2012). The measurement of executive function at age 5: Psychometric properties and relationship to academic achievement. *Psychological Assessment*, 24(1), 226–239. <https://doi.org/10.1037/a0025361>
- Wright, A., & Diamond, A. (2014). An effect of inhibitory load in children while keeping working memory load constant. *Frontiers in Psychology*, 5(Article ID 213), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00213>
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(4), 561–575. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00145>
- Wu, G., & Chiang, J.-H. (1997). The significance of somatosensory stimulations to the human foot in the control of postural reflexes. *Experimental Brain Research*, 114(1), 163–169. <https://doi.org/10.1007/PL00005616>
- Yeniad, N., Malda, M., Mesman, J., van IJzendorp, M. H., & Pieper, S. (2013). Shifting ability predicts math and reading performance in children: A meta-analytical study. *Learning and Individual Differences*, 23, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.10.004>
- Zaitchik, D., Iqbal, Y., & Carey, S. (2014). The effect of executive function on biological reasoning in young children: An individual differences study. *Child Development*, 85(1), 160–175. <https://doi.org/10.1111/cdev.12145>
- Zelazo, P. D., Craik, F. I. M., & Booth, L. (2004). Executive function across the life span. *Acta Psychologica*, 115(2–3), 167–183. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.12.005>

- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami (Ed.), *Blackwell handbook of childhood cognitive development* (pp. 445–469). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470996652.ch20>
- Zelazo, P. D., Qu, L., & Müller, U. (2005). Hot and cool aspects of executive function: Relations in early development. In W. Schneider, R. Schumann-Hengsteler, & B. Sodian (Eds.), *Young children's cognitive development: Interrelationships among executive functioning, working memory, verbal ability, and theory of mind* (pp. 71–93). Psychology Press.

Anhang

Anhang A Interventionsinhalte

Tabelle 14: Übersicht über die einzelnen Stationen der Intervention aus Studie 3. Die Farben markieren den aufsteigenden Schwierigkeitsgrad von leicht (grau) über mittel (gelb) zu schwer (orange).

Interventionsstationen/jeweils 3 Runden															
	Station 1/konstant			Station 2/wechselnd			Station 3/wechselnd			Station 4/konstant			Station 5/konstant		
1. Woche	Pegboard			Auffädeln/Falten			Transportieren/Ausschneiden			Spur nachzeichnen			Steckperlen		
1. Sitzung	dominante Hand			Würfel auffädeln (BOT)			Pennies transportieren (BOT)			eckige Spur nachzeichnen (BOT)			einfaches Stecken		
2. Sitzung	dominante Hand			Faltanleitung „Himmel und Hölle“, 1. und 2. Schritt			Pennies transportieren (BOT)			eckige Spur nachzeichnen (BOT)			einfaches Stecken		
3. Sitzung	dominante Hand			Faltanleitung „Himmel und Hölle“, 1. und 2. Schritt			Kreis ausschneiden (BOT)			eckige Spur nachzeichnen (BOT)			einfaches Stecken		
2. Woche	Pegboard			Auffädeln/Falten			Transportieren/Ausschneiden			Spur nachzeichnen			Steckperlen		
1. Sitzung	nicht-dominante Hand			Murmeln Bastelladen auffädeln			Perlen transportieren			kurvige Spur nachzeichnen (BOT)			nicht-dominante Hand		
2. Sitzung	nicht-dominante Hand			Murmeln Bastelladen			Stern ausschneiden			kurvige Spur nachzeichnen (BOT)			nicht-dominante Hand		
3. Sitzung	nicht-dominante Hand			Faltanleitung „Himmel und Hölle“, 3. und 4. Schritt			Stern ausschneiden			kurvige Spur nachzeichnen (BOT)			nicht-dominante Hand		
3. Woche	Pegboard			Auffädeln/Falten			Transportieren/Ausschneiden			Falten			Steckperlen		
1. Sitzung	bimanuell			Perlen auffädeln			komplizierte Form ausschneiden			komplizierte Spur nachzeichnen			bimanuell		
2. Sitzung	bimanuell			Faltanleitung „Himmel und Hölle“, 5. und 6. Schritt			komplizierte Form ausschneiden			komplizierte Spur nachzeichnen			bimanuell		
3. Sitzung	bimanuell			Faltanleitung „Himmel und Hölle“, 5. und 6. Schritt			Linsen transportieren			komplizierte Spur nachzeichnen			bimanuell		
4. Woche	Pegboard			Auffädeln/Falten			Transportieren/Ausschneiden			Spur nachzeichnen			Steckperlen		
1. Sitzung	dominante Hand	nicht-dominante Hand	bimanuell	Würfel Auffädeln (BOT)	Murmeln Bastel-laden	Perlen auffädeln	Kreis (BOT)	Stern aus-schneiden	komplizierte Form ausschneiden	eckig (BOT)	kurvig (BOT)	kompliziert	einfaches Stecken	nicht-dominante Hand	bimanuell
2. Sitzung	dominante Hand	nicht-dominante Hand	bimanuell	Würfel Auffädeln (BOT)	Murmeln Bastel-laden	Perlen auffädeln	Pennies (BOT)	Perlen trans-portieren	Linsen trans-portieren	eckig (BOT)	kurvig (BOT)	kompliziert	einfaches Stecken	nicht-dominante Hand	bimanuell
3. Sitzung	dominante Hand	nicht-dominante Hand	bimanuell	Himmel und Hölle	Himmel und Hölle	Himmel und Hölle	Pennies (BOT)	Perlen trans-portieren	Linsen trans-portieren	eckig (BOT)	kurvig (BOT)	kompliziert	einfaches Stecken	nicht-dominante Hand	bimanuell

Anhang B Bastelanleitung

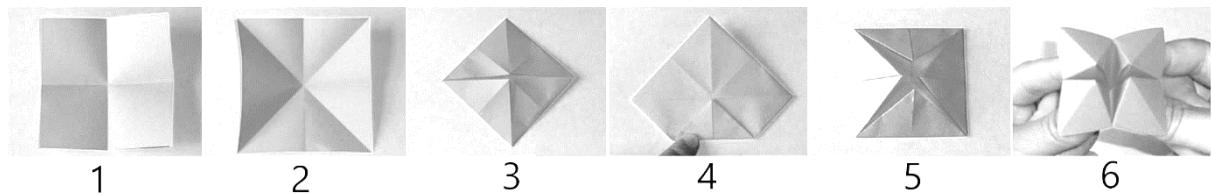


Abbildung 11: Schritt für Schritt Bastelanleitung des „Himmel und Hölle“ – Spiels (Kloskowski, o.J.) aus Station 2 der Intervention in Studie 3.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich es nicht verpassen, all denen zu danken, die mich in den letzten Jahren und während der Anfertigung der Dissertation begleitet haben.

Ich danke den Verantwortlichen der Universität Rostock, die es mir, durch die Vergabe des Landesgraduiertenstipendiums und des Hermespreises, ermöglicht haben zu promovieren und im Zuge dessen bei Prof. Dr. Adele Diamond in Kanada lernen zu dürfen. Mein Dank geht weiterhin an die Kindertagesstätten, Erzieherinnen, Kinder und deren Eltern, die an unseren Studien teilgenommen und zum erfolgreichen Abschluss beigetragen haben. Ohne eure Unterstützung hätten wir die vielen Erkenntnisse nicht gewinnen können.

Besonderer Dank geht an Herrn Dr. Tino Stöckel. Ich konnte stets an deine Bürotür klopfen und immer, wirklich immer hattest du ein offenes Ohr für meine Fragen und die manchmal sehr konfusen Gedanken. Du hast es immer geschafft, die wilden Informationen die ich gelesen und auf deinen Tisch gepackt habe, mit mir gemeinsam zu sortieren und studientechnisch strukturiert aufzubereiten. Du hast mir das Handwerk wissenschaftlichen Arbeitens vermittelt und meine Neugier für das Thema „Exekutive Funktionen“ immer am Laufen halten können. Dafür dank ich Dir sehr.

Ich danke meinen Kollegen/innen und mittlerweile Freunden Dr. Martin Behrens, Martin Gube, Dr. Anett Mau-Möller und Dr. Matthias Weippert aus dem Sportinstitut dafür, dass ihr mir mit Rat und Tat zur Seite standet und mir das wissenschaftliche Arbeiten mit all seinen Facetten nähergebracht habt. Neben eurer passionierten Herangehensweise hat mich vor allem eure positive Sicht auf die Dinge durch den einen oder anderen schwierigen Moment gebracht. Zudem danke ich Frau Prof. Dr. Klatt für die Betreuung meiner Arbeit und ihren Input.

Ich danke meiner Freundin Katja für das Gegenlesen meiner Arbeit und all die unzähligen Kommata, die sie dabei entweder setzen oder löschen musste. Weiterhin möchte ich meiner Familie danken. Für die gebaute „Handle Bar“ zur Erhebung der Daten, für viele zubereitete Obst- und Mittagsteller, fürs immer an mich glauben und vor allem dafür, dass ihr immer für mich da seid und hinter mir und meinen Entscheidungen steht. Ich hatte lange das Bedürfnis dazu zu lernen und mich weiterzubilden und ihr musstet mit. Dafür danke ich euch von ganzem Herzen.

Zum Schluss danke ich meinem Freund Robert. Ich hätte mir keinen besseren Wegbegleiter vorstellen können und kann es noch immer nicht. Meisterhaft hast du mich in schwierigen Momenten aufgefangen und dich in schönen Momenten mit mir gefreut. Danke für deine Geduld, deine fröhliche und zuversichtliche Art und deine Hilfsbereitschaft.

Curriculum Vitae

Persönliche Informationen

Name	Christina Stuhr
Titel	Bachelor of Speech and Language therapy
Geburtstag	03.04.1985
Geburtsort	Güstrow
Nationalität	deutsch
Familienstand	ledig

Schulausbildung

08/1992 - 07/1996 2. Grundschule „Fritz-Reuter“ Güstrow

08/1996 - 06/2005 Allgemeine Hochschulreife
Geschwister-Scholl-Gymnasium Bützow

Hochschulbildung

10/2009 - 07/2015 Universität Rostock, Lehramt an Gymnasien (Sportwissenschaft und Biologie)

- Abschluss: 1. Staatsexamen
- Prädikat: „sehr gut“

Staatsexamensarbeit, Universität Rostock,
Institut für Sportwissenschaft, Bereich Sportpsychologie,
Thema: „*Direkte Dyslexietherapie und Förderung der Arbeitsgedächtnisfunktion im Sportunterricht - Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzepts*“

- Prädikat: „sehr gut“

10/2005 - 09/2009 Europäische Wirtschafts- und Sprachakademie, Rostock und Fontys University of Applied Sciences, Eindhoven Abschluss:

- staatlich anerkannte Logopädin
- Bachelor of Health, Speech and Language therapy

Wissenschaftlicher Werdegang

09/2016 – 10/2020 Promotionsstudentin, Universität Rostock,
Institut für Sportwissenschaft, Bereich Sportpsychologie,
Thema: „*Entwicklung exekutiver und motorischer Funktionen im frühen Kindesalter – eine Längsschnittuntersuchung zu Interdependenzen und potentiellen Förderungsmöglichkeiten*“

- angestrebter Abschluss: Dr. phil.

Universitäre Lehrveranstaltungen

SS 20 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sportwissenschaft
Titel: „Forschungsprojekt Sportpsychologie“
(4 SWS)

SS 20 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sportwissenschaft
Titel: „Schulpraktische Übungen“
(10 SWS)

SS 20 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sportwissenschaft
Titel: „Hauptseminar Sportdidaktik“
(2 SWS)

WS 19/20 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sportwissenschaft
Titel: „Schulpraktische Übungen“
(12 SWS)

WS 19/20 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sportwissenschaft
Titel: „Sprecherziehung für Sportstudenten“
(2 SWS)

WS 19/20 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sportwissenschaft
Titel: „Hauptseminar Sportdidaktik“
(2 SWS)

WS 18/19 Universität Rostock, Philosophische Fakultät
Institut für Sonderpädagogische Entwicklungsförderung und
Rehabilitation (ISER)
Titel: „Einzelfallhilfen im Schriftspracherwerb“
(4 SWS)

WS 18/19	Universität Rostock, Philosophische Fakultät Institut für Sportwissenschaft Assistenz im Forschungspraktikum Sportpsychologie (4 SWS)
WS 17/18	Universität Rostock, Philosophische Fakultät Institut für Sportwissenschaft Assistenz im Forschungspraktikum Sportpsychologie (4 SWS)
WS 16/17	Universität Rostock, Philosophische Fakultät Institut für Sportwissenschaft Assistenz im Forschungspraktikum Sportpsychologie (4 SWS)

Außeruniversitäre Lehrveranstaltungen

02/2019	Trainerausbildung Triathlon in Theorie und Praxis (ca. 4 Stunden) beim Landessportbund Mecklenburg-Vorpommern
07/2018	Trainerausbildung Leichtathletik in Theorie und Praxis (ca. 8 Stunden) beim Landessportbund Mecklenburg-Vorpommern
09/2017	Fortbildung von Herzgruppenübungsleitern Landesverband für Prävention und Rehabilitation von Herz-Kreislauf-Erkrankungen e. V., Schwerpunkt: „Motorik und Kognition“ (ca. 8 Stunden)
09/2016	Trainerausbildung Leichtathletik in Theorie und Praxis (ca. 8 Stunden) beim Landessportbund Mecklenburg-Vorpommern

Publikationen:

1. **Stuhr, C.**, Hughes, C. M. L., & Stöckel, T. (2018). Task-specific and variability-driven activation of cognitive control processes during motor performance. *Scientific reports*, 8, 10811.
2. **Stuhr, C.**, Hughes, C. M. L., & Stöckel, T. (2020). The role of executive functions for motor performance in preschool children as compared to young adults. *Frontiers in Psychology*, 11, 1552.

Tagungsbeiträge (mit peer-review):

1. **Stuhr, C.**, & Stöckel, T. (2018). The impact of different motor interventions on executive functions in healthy young adults – multimodal- versus single- interventions forms. ECSS'18, 23rd Annual Congress of the European College of Sport Science, Dublin. (angenommen)
 2. **Stuhr, C.**, & Stöckel, T. (2019). Cognitive and motor function development in early childhood. TeaP'19, 61. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, London. (angenommen)
 3. **Stuhr, C.**, & Stöckel, T. (2019). Förderung der Arbeitsgedächtnisleistung von Vorschülern durch Handgeschicklichkeitstraining. asp Tagung' 19, 51. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Sportpsychologie in Deutschland e.V., Halle. (angenommen)

Berufsausbildung

- | | |
|-------------------|---|
| 10/2013 - 03/2015 | ligEL Institut, Berlin
Klinische Lerntherapeutin und Dyslexietherapeutin nach BVL |
| 10/2005 - 09/2009 | Europäische Wirtschafts- und Sprachakademie, Rostock und Eindhoven
Abschluss: <ul style="list-style-type: none">○ staatlich anerkannte Logopädin○ Bachelor of Speech and Language therapy |

Berufserfahrung

- 09/2013 - 07/2018 freiberufliche Logopädin,
Logopädische Praxis Silke Dethloff
August-Bebel-Straße 7
18258 Schwaan

Auszeichnungen

- | | |
|-------------------|---|
| 09/2016 - 08/2019 | Landesgraduiertenstipendium der Universität Rostock |
| 03/2016 | Hermes Forschungspreis für Forschungsförderung |

Sprachen

Englisch	in Wort und Schrift
Französisch	Schulkenntnisse

Weitere Qualifikationen

01/2020	Weiterbildung: Planung von Lehrveranstaltungen, Hochschuldidaktik Universität Rostock (GER)
11/2018 – 06/2019	Ausbildung zur sportpsychologischen Expertin, Center of Mental Excellence, Innsbruck (AUS)
10/2017	Bal-A-Vis X, Göfis (AUS)
2003	Trainer C Leichtathletik

Rostock, 04.06.2020

Eigenständigkeitserklärung

Versicherung (Erklärung gemäß § 7 Absatz 2 Buchstaben a der Promotionsordnung der Philosophischen Fakultät der Universität Rostock (vom 15. März 2013)

Name: Christina Stuhr

Anschrift: Beim Hornschen Hof 6, 18055, Rostock

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die eingereichte Dissertation mit dem Titel:

Der Zusammenhang zwischen motorischen Fertigkeiten und exekutiven Funktionen im Vorschul- und frühen Erwachsenenalter

selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere weiterhin, dass die vorliegende Dissertation weder insgesamt noch ausschnittweise für die Erfüllung einer Auflage im Sinne von § 6, Absatz 2 und 5 der Promotionsordnung der Philosophischen Fakultät der Universität Rostock verwendet wurde und dass sie in keiner anderen akademischen oder staatlichen Prüfung vorgelegt wurde (§ 9, Absatz 7).

Rostock, den 04.06.2020

Christina Stuhr