

Originaldokument gespeichert auf dem Webserver der Universitätsbibliothek Bern



Dieses Werk ist unter einem
Creative Commons Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.5
Schweiz Lizenzvertrag lizenziert. Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/> oder schicken Sie einen Brief an
Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.

Aufgabenkomplexität und Intelligenz

Inauguraldissertation der Philosophisch-humanwissenschaftlichen Fakultät der Universität

Bern zur Erlangung der Doktorwürde vorgelegt von

Natalie Borter

Oberems (VS)

Bern, April 2016

Lizenz

Urheberrechtlicher Hinweis

Dieses Dokument steht unter einer Lizenz der Creative Commons
Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.5 Schweiz.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/>

Sie dürfen:



dieses Werk vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen

Zu den folgenden Bedingungen:



Namensnennung. Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen (wodurch aber nicht der Eindruck entstehen darf, Sie oder die Nutzung des Werkes durch Sie würden entlohnt).



Keine kommerzielle Nutzung. Dieses Werk darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden.



Keine Bearbeitung. Dieses Werk darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.

Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen die Lizenzbedingungen, unter welche dieses Werk fällt, mitteilen.

Jede der vorgenannten Bedingungen kann aufgehoben werden, sofern Sie die Einwilligung des Rechteinhabers dazu erhalten.

Diese Lizenz lässt die Urheberpersönlichkeitsrechte nach Schweizer Recht unberührt.

Eine ausführliche Fassung des Lizenzvertrags befindet sich unter
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/legalcode.de>

Danksagung

Ein herzlicher Dank gehört Professor Thomas Rammsayer und Professor Stefan Troche. Sie haben die Arbeit betreut und standen mir immer zur Seite. Sie haben mir Unterstützung geboten wo es nötig war, liessen mir aber auch die Freiheit, den Inhalt meiner Doktorarbeit selbst mitzubestimmen. Ebenfalls sehr geschätzt habe ich die offenen Diskussionen auf Augenhöhe.

Weiter möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern Anneliese und Heinz Borter bedanken, die für mich da waren, mich immer unterstützt haben in dem was ich tue und mir bei meiner Dissertation mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mathias Wellig und Sarah Furrer möchte ich danken für ihre Unterstützung, für die stundenlangen Diskussionen über Kleinigkeiten und Wichtigkeiten meiner Arbeit sowie für die kleinen und grossen Hilfestellungen bei formalen und technischen Problemen.

Ausserdem möchte ich auch meinem Team sowie Simeon Zürcher danken für die nützlichen Gespräche und Diskussionen sowie für alle anderen Hilfestellungen bei der Fertigstellung meiner Arbeit.

Ein grosses Dankeschön geht auch an alle, die bei der Datenerhebung mitgeholfen haben sowie an alle, die für mich da waren, wenn es mal etwas schwierig war.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	8
Die psychometrische Intelligenz	9
Aufgabenkomplexität in den Intelligenzmodellen	13
Der Mental-Speed-Ansatz	16
Definition und Operationalisierung der Aufgabenkomplexität	19
Die Komplexitätshypothese	21
Aufgabenkomplexität und Leistungsmasse	22
Kontrolle der Aufgabenkomplexität	24
Isolierung der Komplexität mit <i>Fixed-Links-Modellen</i>	29
Struktur von Reaktionszeiten und Fehlerraten verschieden komplexer Aufgaben . . .	32
Hypothesen	35
Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation . .	35
Isolierung einer komplexitätsabhängigen Komponente	36
Struktur von Reaktionszeiten und Fehlerraten verschieden komplexer Aufgaben	36
Methode	38
Versuchspersonen	38
Intelligenzmessung	38
Experimentelle Aufgaben	40
Hick-Aufgabe	40
Flanker-Aufgabe	43
Swaps-Aufgabe	46
Ablauf	48
Resultate	50
Stichprobengrösse	50
Reaktionszeiten und Fehlerraten	50
Kontrollvariablen	53
Operationalisierung der Aufgabenkomplexität	54

Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation	56
Stichprobenabhängigkeit	61
Zusätzliche Analysen: Fehlerraten	65
Isolierung der Komplexität	68
Zusätzliche Analysen: korrelierte Komponenten der Swaps-Aufgabe	76
Zusätzliche Analysen: Antwortmuster der Swaps-Aufgabe	77
Die Struktur der Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Bedin-	
gungen: manifeste Ebene	82
Zusätzliche Analysen: Multidimensionale Skalierung	87
Zusätzliche Analysen: Stichprobenabhängigkeit	90
Die Struktur der Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Bedin-	
gungen: latente Ebene	93
Diskussion	100
Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation	100
Hick-Aufgabe	101
Flanker-Aufgabe	102
Swaps-Aufgabe	107
Stichprobenabhängigkeit	112
Zusammenfassung	121
Isolierung der Komplexität	123
Hick-Aufgabe	123
Flanker-Aufgabe	124
Swaps-Aufgabe	126
Zusammenfassung	137
Struktur: manifest	138
Reaktionszeiten von wenig komplexen und Fehlerraten von komplexeren Bedin-	
gungen	138
Reaktionszeiten von wenig komplexen und komplexen Bedingungen	140
Stichprobenabhängigkeit der Struktur auf manifester Ebene	142

Zusammenfassung	143
Struktur: latent	144
Integration der Befunde	147
Zusammenfassung	156
 Literatur	 160
 Anhang	 175

Abkürzungsverzeichnis

AG	Arbeitsgedächtnis
AIC	Akaike Information Criterion
CFI	Comparative Fit Index
CFT 20-R	Grundintelligenzskala 20-R
cm	Zentimeter
dB	Dezibel
EKA	Elementare kongitive Aufgaben
G-Faktor	Allgemeiner Faktor extrahiert aus experimentellen Aufgaben
g_{CFT} -Faktor	Allgemeiner Faktor extrahiert aus dem CFT 20-R
g-Faktor	Allgemeiner Faktor extrahiert aus Intelligenztests
Hz	Hertz
IQ	Intelligenzquotient
M	Mittelwert
MDS	Multidimensionale Skalierung
ms	Millisekunden
RMSEA	Root Mean Square Error of Approximation
SD	Standardabweichung
SRMR	Standardized Root Mean Square Residual
Vp(n)	Versuchsperson(en)

Einführung

Eine kürzere Reaktionszeit in basalen, wenig komplexen kognitiven Aufgaben ist mit höherer Intelligenz assoziiert (Jensen, 2006). Entsprechend der Komplexitätshypothese verstärkt sich dieser negative Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang mit zunehmender Aufgabenkomplexität (Vernon & Jensen, 1984). Allerdings weisen erste Arbeiten darauf hin, dass das nur bis zu einer Aufgabenkomplexität gilt, die eine mittlere Reaktionszeit von einer Sekunde erforderlich macht (Jensen, 2006; Lindley, Wilson, Smith & Bathurst, 1995). Dauert die Verarbeitung einer Aufgabe mehr als eine Sekunde, schwächt sich der Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang wieder ab. Grundsätzlich sind aber Aufgaben mit einer Komplexität, die eine mittlere Reaktionszeit von etwa einer Sekunde erforderlich macht unzureichend untersucht (Dodonova & Dodonov, 2013; Vigneau, Blanchet, Loranger & Pépin, 2002). Bei komplexen Aufgaben, wie beispielsweise Aufgaben aus Intelligenztests, ist es nicht die Reaktionszeit, die signifikant mit der Intelligenz korreliert sondern die Fehlerrate (Vigneau et al., 2002). Dabei machen intelligentere verglichen mit weniger intelligenten Personen weniger Fehler.

In wenig komplexen kognitiven Aufgaben korreliert also die Reaktionszeit und in komplexen kognitiven Aufgaben die Fehlerrate mit der Intelligenz. Es bleibt aber weitgehend ungeklärt, wie es im Komplexitätsbereich dazwischen aussieht. Grundsätzlich fehlt eine umfassende Betrachtung des Reaktionszeit-Intelligenz- sowie des Fehlerraten-Intelligenz-Zusammenhangs über einen weiten Bereich des Komplexitätskontinuums. Auch die grundlegenden Prozesse, auf denen diese Zusammenhänge basieren, sowie die Struktur verschieden komplexer Aufgaben, wurden bisher kaum systematisch über einen weiten Bereich des Komplexitätskontinuums untersucht. Daher ist es Ziel dieser Arbeit, den Zusammenhang zwischen der Aufgabenkomplexität und der Intelligenz über einen weiten Bereich des Komplexitätskontinuums zu untersuchen. Diese umfassende Betrachtung soll sich dabei auf drei Teilbereiche beziehen: den Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität, die daran beteiligten Prozesse, sowie die Struktur verschieden komplexer Aufgaben. Die kognitiven Aufgaben wurden so ausgewählt, dass deren Komplexität systematisch manipuliert werden konnte. Diese Manipulation erlaubte eine gezielte Isolierung der komplexitätsabhängigen Komponenten und damit eine Trennung von Prozessen, die nicht von der Manipulation der

Komplexität beeinflusst wurden.

In einem ersten Schritt wird die Intelligenz aus dem psychometrischen Ansatz eingeführt. Dann wird auf die Aufgabenkomplexität im Rahmen von Intelligenzstrukturmodellen eingegangen und dabei insbesondere auf das Radex-Modell eingegangen. In einem zweiten Schritt wird der Mental-Speed-Ansatz vorgestellt und dabei auf die Isolierung von komplexitätsabhängigen Prozessen eingegangen. Wegen statistischer Mängel traditioneller Methoden zur Isolierung solcher Prozesse, wird dann eine alternative Methode vorgestellt. Zum Schluss wird die Struktur von Reaktionszeiten und Fehlerraten verschieden komplexer Aufgaben genauer betrachtet und mit der Struktur in Intelligenzmodellen in Beziehung gesetzt.

Die psychometrische Intelligenz

Die psychometrische Intelligenz wird mittels Intelligenztests erfasst (Eysenck, 1986). Sie ist eines der populärsten, bestuntersuchten und meist diskutierten Konstrukte der Psychologie (Mackintosh, 2011). Psychometrische Intelligenz ist zeitlich stabil (Deary, Bell, Bell, Campbell & Fazal, 2004; Mackintosh, 2011), hat eine erbliche Komponente (Plomin, DeFries, Knopik & Neiderheiser, 2013) und ist einer der besten Prädiktoren von schulischem und beruflichem Erfolg (Strenze, 2007). Trotzdem ist es bis heute schwierig, psychometrische Intelligenz zu definieren. Eine Gruppe von Experten, die sich in ihrer Forschung mit kognitiven Fähigkeiten auseinandersetzen, hat sich auf eine sehr allgemeine Definition geeinigt: „Intelligence is a very general mental capability that, among other things, involves the ability to reason, plan, solve problems, think abstractly, comprehend complex ideas... “ (Gottfredson, 1997, S. 13).

Trotz Definitionsschwierigkeiten kann psychometrische Intelligenz reliabel und valide gemessen werden (Mackintosh, 2011; Neisser et al., 1996). Vergleicht man Personen mit hoher und niedriger psychometrischer Intelligenz, zeichnen sich erstere dadurch aus, dass ihre Leistung in verschiedenen kognitiven Aufgaben besser ausfällt. Solche Aufgaben verlangen von den Versuchspersonen (Vpn) das bestmögliche Verhalten. Operationalisiert wird die Leistung typischerweise über die Anzahl korrekter Antworten und/oder über die benötigte Zeit für die Bearbeitung. Verglichen mit einer weniger leistungsstarken Person, löst eine leistungsstärkere Person mehr Aufgaben korrekt oder benötigt weniger Zeit um eine Aufgabe korrekt zu lösen.

Schon im neunzehnten Jahrhundert etablierte Galton (1869) die Idee, dass es interindividuelle Unterschiede in der kognitiven Leistungsfähigkeit gibt. Spearman (1904, 1927) belegte dann, dass interindividuelle Leistungsunterschiede in verschiedenen Aufgaben miteinander positiv zusammenhängen, also positiv korreliert sind. Er ging davon aus, dass die Ursache dafür interindividuelle Unterschiede in der mentalen Energie sind, welche die Leistung in allen kognitiven Aufgaben beeinflusst. Um aus den positiven Korrelationen dieses latente Konstrukt zu extrahieren, entwickelte Spearman (1904) die heute in vielen Bereichen der Psychologie eingesetzte Faktorenanalyse. Ein latentes Konstrukt ist im Gegensatz zu den gemessenen, manifesten Variablen nicht direkt sicht- und messbar. Die Faktorenanalyse macht es möglich, Korrelationen oder Kovarianzen zwischen verschiedenen Variablen auf einen Faktor oder mehrere Faktoren zu reduzieren. Diese Faktoren repräsentieren latente Konstrukte. Auf solche Faktoren basierende Intelligenzmodelle, welche die Struktur der menschlichen Intelligenz beschreiben, werden Intelligenzstrukturmodelle genannt (Mackintosh, 2011). Wie viele Faktoren notwendig sind, um Intelligenz adäquat zu repräsentieren, führte schon früh zu Uneinigkeit. Spearman (1914) selber ging von einem einzigen generellen Faktor (g-Faktor) aus. Nach seiner Zweifaktoren-Theorie setzt sich jede Leistung aus zwei Anteilen zusammen. Einem g-Anteil, der verantwortlich ist für die Korrelation zwischen verschiedenen kognitiven Aufgaben und einem spezifischen Anteil (s-Anteil), der unabhängig vom g-Faktor und von den s-Anteilen anderer Aufgaben ist. Während die Existenz des g-Faktors statistisch immer wieder nachgewiesen werden konnte und relativ unumstritten ist, herrscht kein Konsens darüber, was diese positive Korrelation zwischen verschiedenen kognitiven Aufgaben verursacht (Mackintosh, 2011).

Thurstone (1938) hingegen ging von sieben relativ unabhängigen Intelligenzfaktoren aus, den sogenannten Primärfaktoren der Intelligenz: mathematisches Denken, Sprachverständnis, Raumvorstellung, Gedächtnis, schlussfolgerndes Denken, Wortflüssigkeit und Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Für die widersprüchlichen Befunde der beiden Autoren gibt es mehrere Gründe. Neben Unterschieden in den untersuchten Stichproben und den eingesetzten Aufgaben, unterscheiden sich die Autoren auch in der statistischen Auswertung ihrer Daten (Mackintosh, 2011). Spearman (1904) extrahierte nur einen varianzstarken Faktor und beachtete etwaige andere Faktoren nicht, während Thurstone (1931) mehrere Faktoren extrahierte, die miteinander

korrelieren konnten. Für die Extraktion korrelierter Faktoren entwickelte er eine Rotationsmethode.

Mittlerweile gehen viele Autoren von einer Kombination beider Theorien aus (z.B. Burt, 1949; Carroll, 1993; Vernon, 1969). Die Rotationsmethode von Thurstone (1931) ermöglichte die Entwicklung von hierarchischen Faktorenanalysen. Aus den kognitiven Aufgaben werden wie bei Thurstone (1938) korrelierte Faktoren extrahiert. Da diese korreliert sind, können daraus auf zweiter Ebene wiederum korrelierte Faktoren extrahiert werden. Das wird solange weitergeführt bis an der Spitze der Hierarchie ein einzelner Faktor extrahiert werden kann, der mit dem g-Faktor von Spearman (1927) vergleichbar ist. Die auf erster Ebene extrahierten Faktoren, werden Faktoren erster Ordnung genannt, die auf zweiter Ebene extrahierten Faktoren, Faktoren zweiter Ordnung und so weiter. Eine hierarchische Faktorenanalyse ist in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt. Aus den 27 kognitiven Aufgaben, von denen jeweils drei Aufgaben (z.B. A1, A2, A3 oder G1, G2, G3) ähnliche Aspekte erfassen, wurden neun Faktoren erster Ordnung extrahiert (A bis I). Da jeweils drei dieser neun Faktoren wiederum ähnliche Aspekte erfassen (z.B. A, B und C), können daraus drei korrelierte Faktoren zweiter Ordnung extrahiert werden (ABC, DEF, GHI). Weil die Faktoren zweiter Ordnung nur noch durch den gemeinsamen g-Anteil miteinander korrelieren, kann daraus auf dritter Ebene ein g-Faktor extrahiert werden. Die Faktoren werden von Ebene zu Ebene allgemeiner, weil spezifische Varianzanteile, die nicht in allen Aufgaben vorkommen, jeweils herausgerechnet werden. Die hierarchischen Modelle belegen, dass entgegen der Annahme von Spearman (1927), die s-Anteile nicht immer unabhängig sind und entgegen der Annahme von Thurstone (1938), ein g-Faktor existiert.

Aus heutiger Sicht würden viele davon ausgehen, dass die Korrelationen zwischen verschiedenen kognitiven Aufgaben aus Intelligenztests einerseits auf gemeinsame Anteile durch spezifische Faktoren (z.B. Faktoren erster und zweiter Ordnung) und andererseits auf gemeinsame g-Anteile zurückzuführen sind (Burt, 1949; Carroll, 1993; Valerius & Sparfeldt, 2014; Vernon, 1950). Die Herausforderung besteht darin, diese beiden Anteile voneinander zu trennen. Extrahiert man nämlich einen allgemeinen Faktor aus Aufgaben, die alle Anteile von einem spezifischen Faktor zweiter Ordnung aufweisen, dann besteht dieser allgemeine Faktor aus Anteilen durch den g-Faktor und aus Anteilen durch spezifische Faktoren.

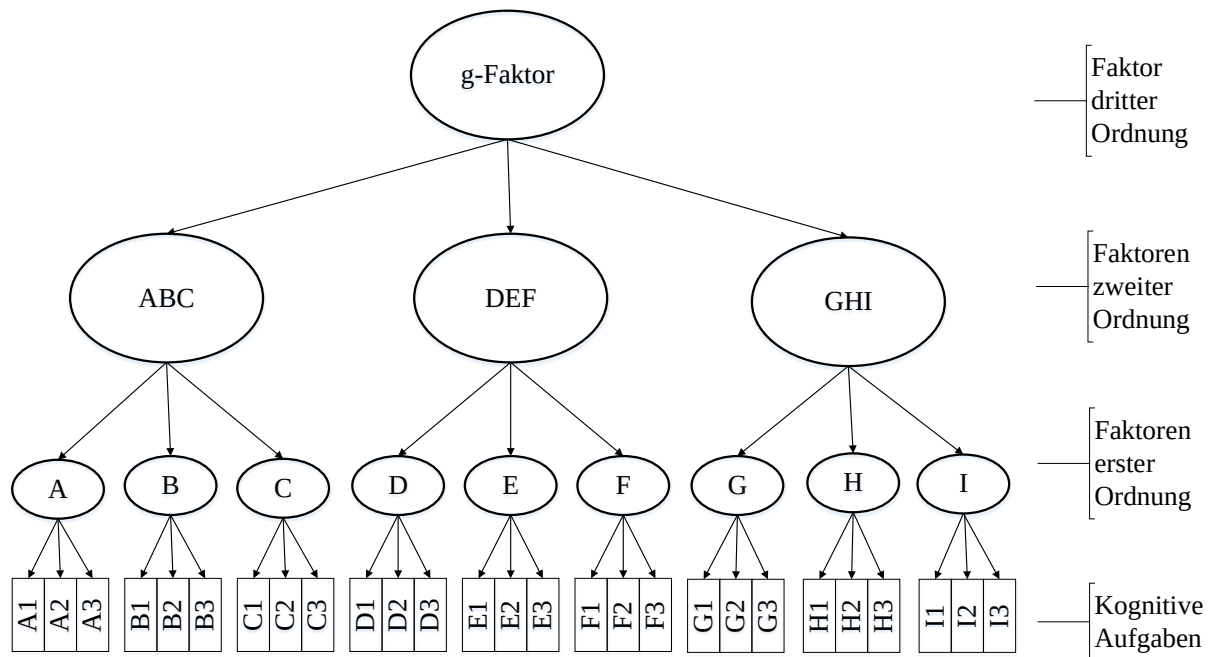


Abbildung 1. Schematische Darstellung einer hierarchischen Faktorenanalyse. Jeweils drei kognitive Aufgaben (1, 2, 3) messen dasselbe Konstrukt (A bis I). Von den extrahierten Faktoren erster Ordnung (Konstrukte A bis I) messen wiederum jeweils drei ähnliche Prozesse, weshalb sich daraus drei Faktoren zweiter Ordnung extrahieren lassen (ABC, DEF, GHI). Weil alle Faktoren zweiter Ordnung einen gewissen g-Anteil aufweisen, lässt sich daraus ein latenter g-Faktor dritter Ordnung extrahieren.

Deshalb ist die Voraussetzung für die Extraktion von einem g-Faktor, dass die Aufgaben der Testbatterie zahlreich und divers genug sind, damit sich gemeinsame Varianzanteile durch spezifische Faktoren herausrechnen lassen. Auf diese Weise sollte aus verschiedenen Testbatterien derselbe g-Faktor extrahiert werden können. Dementsprechend sollte der g-Faktor, extrahiert aus einer Testbatterie, innerhalb der Limitierung durch den Messfehler, immer identisch sein mit dem g-Faktor extrahiert aus einer anderen Testbatterie (Jensen, 1998a). Das haben Johnson, Bouchard und Krüger (2004) empirisch nachgewiesen. In ihrer Untersuchung korrelierten die g-Faktoren, extrahiert aus drei verschiedenen Testbatterien, zwischen .95 und 1 miteinander. Dieses Muster wurde in einer Folgestudie mit fünf unterschiedlichen Testbatterien bestätigt (Johnson, Nijenhuis & Bouchard, 2008).

In einem hierarchischen Modell werden also auf latenter Ebene sowohl spezifische Faktoren, die nur in manchen Aufgaben enthalten sind, als auch ein g-Faktor, der in allen Aufgaben enthalten ist, extrahiert. Ein wichtiger spezifischer Faktor, der stark mit dem g-Faktor korreliert, ist das logische Schlussfolgern. Dieser kommt in vielen Intelligenzmodellen, wenn auch unter

leicht abweichenden Namen, vor (z.B. Carroll, 1993; Cattell, 1971; Jäger, Süss & Beauducel, 1997; Thurstone, 1938). Logisches Schlussfolgern beinhaltet die Fähigkeit, Beziehungen zwischen verschiedenen Objekten oder Ideen zu sehen und daraus logische Schlüsse zu ziehen. Insbesondere abstrakte Problemstellungen sind ein gutes Mass für diesen Faktor (Penrose & Raven, 1936; Spearman & Jones, 1950). Figurales logisches Schlussfolgern wird oft mit sogenannten Matrizentests, wie z.B. den Progressiven Matrizen von Raven (1938) oder dem kulturfairen Intelligenztest (CFT) von Cattell (1940) erhoben. Ein Item eines Matrizentests besteht typischerweise aus einer Matrix mit figuralen Inhalten, die mittels logischem Schlussfolgern ergänzt oder fortgesetzt werden muss. Diese Matrizentests sind stark mit dem g-Faktor korreliert, weil sie kulturfair sind und damit keine erlernten sprachlichen Fähigkeiten zu deren Beantwortung notwendig sind. Sie sollen also insbesondere angeborene Unterschiede in der Leistungsfähigkeit repräsentieren. Cattell (1940) nannte diese angeborene Leistungsfähigkeit *fluide Intelligenz*. Die von der fluiden Intelligenz und dem kulturellen Hintergrund sowie der individuellen Lerngeschichte beeinflusste Intelligenz nannte er hingegen *kristalline Intelligenz*. Es wurde nachgewiesen, dass die fluide Intelligenz und der g-Faktor sehr hoch miteinander korrelieren (Johnson et al., 2008; Valerius & Sparfeldt, 2014). Es gab auch Vermutungen, dass die fluide Intelligenz und der g-Faktor dasselbe Konstrukt sind (Gustafsson, 1988). Weil Matrizentests reliabel und ökonomisch sind und stark mit dem g-Faktor korrelieren, wurde in der vorliegenden Arbeit ein solcher Test zur Operationalisierung der Intelligenz eingesetzt. In der Arbeit von Valerius und Sparfeldt (2014) korrelierte ein latenter Faktor, extrahiert aus den in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Skalen und dem Summenwert der Raven-Matrizen (Raven, 1938), zu $r = .88$ bis $r = 1$ mit den g-Faktoren extrahiert aus anderen Testbatterien. Auf den Test wird im Methodenteil genauer eingegangen.

Aufgabenkomplexität in den Intelligenzmodellen. Wie gross der g-Anteil einer Aufgabe zur Intelligenzmessung ist, hängt sehr stark von deren Komplexität ab. Aufgaben mit höherer Komplexität zeichnen sich durch einen höheren g-Anteil aus als Aufgaben mit niedrigerer Komplexität (Spearman, 1927). Solche Aufgaben mit hoher Komplexität sind zum Beispiel die oben erwähnten Matrizentests, aber auch Arbeitsgedächtnis-Aufgaben (AG-Aufgaben) (Conway, Cowan, Bunting, Theriault & Minkoff, 2002). Das AG wird als kognitives System be-

schrieben, welches es erlaubt, trotz konkurrierender Prozesse, Informationen im Kurzzeitgedächtnis aufrechtzuerhalten und mittels kontrollierter Aufmerksamkeit zu manipulieren (Engle, Tuholski, Laughlin & Conway, 1999). Ein Beispiel für eine AG-Aufgabe ist die Lesespanne-Aufgabe. Hier müssen die Probanden Sätze laut vorlesen, während sie unabhängige Wörter im Kopf behalten. Zusätzlich müssen sie den Inhalt der Sätze verstehen.

Eine gute Visualisierung des Zusammenhangs zwischen Komplexität und Intelligenz stellt das Radex-Modell von Guttman (1954) dar. Er hat mittels multidimensionaler Skalierung (MDS) die Korrelationen zwischen verschiedenen Intelligenztestaufgaben im zweidimensionalen Raum dargestellt. Die Distanz zwischen den Aufgaben entspricht in der MDS der invertierten Korrelation zwischen den Aufgaben. Hoch korrelierte Aufgaben werden also nahe beieinander positioniert, während die Distanz zwischen wenig korrelierten Aufgaben entsprechend grösser ist. Eine schematische Visualisierung des Radex-Modells ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Darstellung ist angelehnt an Abbildung 2.5 in Mackintosh (2011).

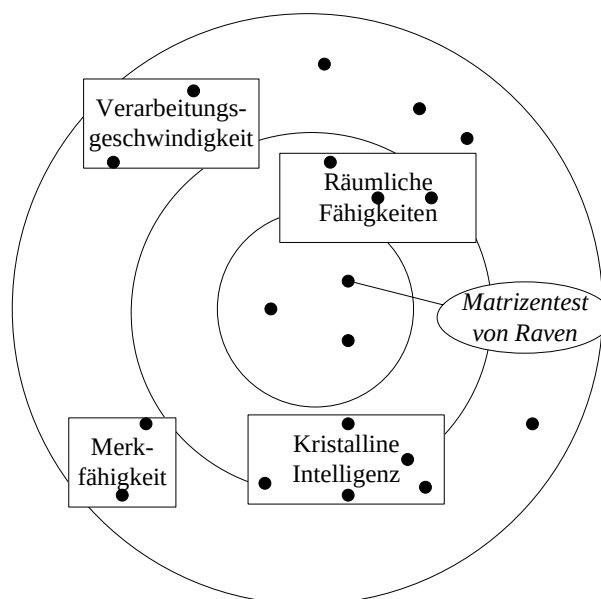


Abbildung 2. Schematische Darstellung des Radex Modells von Guttman (angelehnt an Abbildung 2.5 in Mackintosh (2011)). Die schwarzen Punkte stellen verschiedene Intelligenztests dar. Je kleiner die Distanz zwischen zwei Punkten, desto höher die Korrelation zwischen den verschiedenen Intelligenztests. Komplexe Intelligenztests wie der Matrizentest von Raven (Raven, 1938) sind nahe vom Zentrum positioniert. Tests im Zentrum korrelieren stärker mit allen anderen als Tests in der Peripherie. Tests die denselben spezifischen Faktor messen, befinden sich in demselben rechteckigen Rahmen.

Die schwarzen Punkte stellen verschiedene kognitive Aufgaben dar. Die kreisförmige Struktur, der sogenannte Radex, kann durch zwei Parameter beschrieben werden: die Nähe zum Mittelpunkt des Kreises und die Position auf dem Kreis. Je näher beim Mittelpunkt des Kreises eine kognitive Aufgabe positioniert ist, desto höher ihr g-Anteil. Weil besonders komplexe Aufgaben einen hohen g-Anteil aufweisen, ist der Matrizentest von Raven (Raven, 1938) nahe beim Zentrum positioniert. Solche kognitiven Aufgaben nahe beim Zentrum korrelieren durchschnittlich stärker mit allen anderen kognitiven Aufgaben als solche in der Peripherie des Radex. Deshalb ist ihre mittlere Distanz zu allen anderen kognitiven Aufgaben minimal. Aufgaben mit relativ tiefem g-Anteil und entsprechend niedriger Komplexität sind in der Peripherie des Radex positioniert. Ihre mittlere Distanz zu allen anderen Aufgaben ist nicht minimal. Sie korrelieren nicht mit allen anderen kognitiven Aufgaben, dafür aber insbesondere mit denen, die denselben spezifischen Faktor messen. Daraus ergibt sich die zweite Dimension des Radex-Modells, die Lage auf dem Kreis. So befinden sich z.B. Aufgaben des spezifischen Faktors *kristalline Intelligenz* im unteren Teil des Kreises, Aufgaben des spezifischen Faktors *räumliche Fähigkeiten* oben rechts, Aufgaben des spezifischen Faktors *Merkfähigkeit* unten links und Aufgaben des spezifischen Faktors *Verarbeitungsgeschwindigkeit* oben links. Rechteckige Balken umgeben Aufgaben, die typischerweise zur Erhebung eines spezifischen Faktors eingesetzt werden. Korrelationen zwischen kognitiven Aufgaben kommen also sowohl durch den gemeinsamen g-Anteil als auch durch Anteile des spezifischen Faktors oder der spezifischen Faktoren zustande.

Es gibt eine hohe Übereinstimmung zwischen der Struktur von hierarchischen Modellen und dem Radex-Modell (Marshalek, Lohman & Snow, 1983). Aufgaben mit höherer Komplexität sind assoziiert mit spezifischen Faktoren zweiter und dritter Ordnung, Aufgaben mit niedriger Komplexität mit spezifischen Faktoren erster Ordnung. In beiden Modellen sind es die komplexesten Aufgaben, die am höchsten mit der Intelligenz korreliert sind.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Zusammenhänge zwischen verschiedenen kognitiven Aufgaben sehr gut durch eine hierarchische Struktur repräsentiert werden. Dabei werden verschiedene, spezifische Faktoren und ein übergeordneter g-Faktor kombiniert. Zusätzlich laden komplexere Aufgaben stärker auf dem g-Faktor als weniger kom-

plexe Aufgaben. Die Ladung gibt an, wie stark die untersuchte manifeste Variable mit der extrahierten latenten Variable korreliert, wobei ein höherer Betrag der Ladung einem stärkeren Zusammenhang entspricht.

Der Mental-Speed-Ansatz

Doch welche Rolle spielt die Geschwindigkeit, mit der eine Person Informationen verarbeiten kann, für die Intelligenz? Die Rolle der sogenannten Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit wurde einerseits in der psychometrischen Tradition und andererseits im Mental-Speed-Ansatz untersucht. Daher wird der Begriff nicht einheitlich definiert. Allen Definitionen gemeinsam ist aber, dass es sich bei der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit um die Geschwindigkeit der Ausführung einer kognitiven Aufgabe oder Komponente handelt, die relativ wenig komplex ist und in der nur wenig Fehler vorkommen (Zebec, 2004). Im psychometrischen Ansatz handelt es sich bei der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit, wenn auch nicht immer unter demselben Namen, um einen Faktor in verschiedenen Intelligenzmodellen (z.B. Carroll, 1993; Jäger et al., 1997; Thurstone, 1938). Eine typische Aufgabe ist der *Zahlen-Verbindungs-Test* (Vernon & Weese, 1993). Im Zahlen-Verbindungs-Test müssen die Vpn scheinbar willkürlich angeordnete Zahlen so schnell wie möglich aufsteigend in der richtigen numerischen Reihenfolge verbinden. An diesem Ansatz wurde jedoch kritisiert, dass damit nicht nur die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit, sondern auch verschiedene andere Prozesse erfasst werden. Dies weil die Aufgabenausführung von vielen verschiedenen Prozessen abhängt und damit kein reines Mass für die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit ist (Johnson & Deary, 2011). Diese Aufgaben sind ziemlich komplex, was man auch an den relativ langen Antwortzeiten sehen kann. Deshalb wurden im Mental-Speed-Ansatz sehr basale Aufgaben untersucht, welche die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit sauberer messen sollten. Auf diese Weise konnten gezielt spezifische Komponenten untersucht und mit der Intelligenz in Verbindung gebracht werden (Deary, 2001; Johnson & Deary, 2011).

Auf der Suche nach dem kognitiven Prozess, welcher der Intelligenz zugrunde liegt, versuchte man im Mental-Speed-Ansatz elementare kognitive Prozesse der menschlichen Kognition zu isolieren und mit der Intelligenz in Beziehung zu setzen. Mit elementaren kognitiven

Prozessen sind z.B. Reiz-Wahrnehmung, Reiz-Enkodierung, Zugriff auf das Kurzzeitgedächtnis oder Langzeitgedächtnis, Reiz-Vergleich, Entscheidung und Antwortausführung gemeint (Jensen, 2006). Schon Galton (1907) ging davon aus, dass die Geschwindigkeit mit der jemand Informationen verarbeiten kann, Rückschlüsse auf dessen Intelligenz erlaubt. Intelligenter Personen benötigen einerseits weniger Zeit zur Ausführung einer kognitiven Aufgabe als weniger intelligente Personen und weisen andererseits weniger variable Reaktionszeiten auf (Jensen, 2006; Sheppard & Vernon, 2008). Die Reaktionszeit ist jeweils die Zeit zwischen dem Erscheinen des Reizes und der Antworteingabe der Vpn. Es gibt auch Autoren die der Meinung sind, dass interindividuelle Unterschiede in der Intelligenz auf interindividuelle Unterschiede in der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit zurückzuführen sind (Anderson, 1992, 2005; Jensen, 1998a, 2006). In einer Metanalyse aus 172 Studien mit 1146 Korrelationen wurde nachgewiesen, dass der Zusammenhang zwischen der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und der Intelligenz zwar sehr konsistent ist, aber mit einer Korrelation von $r = -.24$ nur moderat ausfällt (Sheppard & Vernon, 2008). Weil der Zusammenhang zwischen der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und der Intelligenz auch bei Intelligenztests ohne Zeitdruck nachgewiesen werden konnte, handelt es sich dabei nicht um einen artifiziellen Zusammenhang aufgrund von Zeitdruck (Vernon & Kantor, 1986; Vernon, Nador & Kantor, 1985).

Die elementaren Prozesse wurden mittels gezielter Aufgabenmanipulation spezifischer Elemente der Reaktionszeit isoliert (Deary, 2001). Dafür wurden elementare kognitive Aufgaben (EKA) entwickelt. EKA zeichnen sich dadurch aus, dass sie so einfach sind, dass jeder sie problemlos lösen kann, ohne Fehler zu machen (Jensen, 1998a). Weil der elementare Aspekt so basal ist und zu seiner Ausführung kein spezifisches Wissen notwendig ist, sollte er nicht durch den kulturellen Hintergrund, die Lernerfahrung oder Strategien beeinflusst werden. Deshalb kann er als Mass für die angeborene Leistungsfähigkeit angesehen werden (Jensen, 1998a). Der englische Begriff kommt von Carroll (1993). Er ging davon aus, dass man Leistungen in einzelne Komponenten zerlegen kann, um sie auf Prozessebene untersuchen zu können. Nach dem sogenannten Verunreinigungsproblem (*Impurity-Problem*), bestehen Leistungen nicht nur aus einem, sondern aus vielen verschiedenen Prozessen (Schweizer, 2006a). Durch gezielte

Manipulation der interessierenden, elementaren Komponente und gleichzeitiger Konstanthaltung aller anderen Prozesse, konnte mittels EKA die spezifische elementare Komponente isoliert werden. Diese elementare Komponente ist typischerweise in der ersten und einfachsten Bedingung nicht enthalten. In den darauf folgenden, komplexeren Bedingungen aber immer stärker. Damit diese elementaren Prozesse isoliert betrachtet werden können, werden die anderen Prozesse entweder mittels Regressionsgleichung (Jensen, 2006) oder mittels Subtraktion herausgerechnet (Donders, 1969). Auf die Nachteile dieser beiden Methoden und auf eine effizientere Lösung des Verunreinigungsproblems, wird im Verlauf dieser Arbeit noch genauer eingegangen.

Eine der meist eingesetzten EKA ist die Hick-Aufgabe (Hick, 1952). Die elementare Komponente, die man in der Hick-Aufgabe zu isolieren versuchte, ist die benötigte Zeit zur Ausführung einer binären Entscheidung. Diese Komponente ist in der ersten Bedingung nicht und in den darauf folgenden Bedingungen in zunehmendem Masse enthalten. Ziel in allen Bedingung ist es, mittels Tastendruck anzugeben, an welcher Position ein imperativer Reiz erschienen ist. In der ersten Bedingung ohne binäre Entscheidung erscheint der imperative Reiz immer an derselben Position. In der zweiten Bedingung erscheint er jeweils zufällig an einer von zwei (eine binäre Entscheidung) möglichen Positionen und in der dritten an einer von vier (zwei binären Entscheidungen) möglichen Positionen.

Der individuelle Anstieg der Regressionsgerade durch die Mittelwerte der drei Bedingungen ist linear. Die Zeit, die jemand für eine binäre Entscheidung benötigt, ist also konstant (Hick, 1952; Merkel, 1885). Roth (1964) und später auch Eysenck (1967) haben belegt, dass dieser Anstieg für Personen mit höherer psychometrischer Intelligenz, weniger steil ist als für Personen mit niedrigerer psychometrischer Intelligenz. Intelligenter Personen führen also binäre Entscheidungen schneller aus als weniger intelligente Personen. Jensen (1987) kam beim Zusammenfassen verschiedener Studien zum Schluss, dass dieser Anstieg insgesamt robust und moderat negativ mit psychometrischer Intelligenz korreliert ist. Gleichzeitig korrelierte aber nicht nur der Anstieg mit der Intelligenz, sondern auch die Schnittstelle der Regressionsgeraden mit der y-Achse. Dieser y-Achsenabschnitt hängt aber nicht von der manipulierten elementaren Komponente, der Ausführung von binären Entscheidungen, ab (Deary, Whalley,

Lemmon, Crawford & Starr, 2000). Zusätzlich korrelierte der Anstieg nur moderat mit der Intelligenz. Das stellte die Ausführung von binären Entscheidungen als Grundlage der Intelligenz in Frage (Deary et al., 2000; Sheppard & Vernon, 2008).

Es ist aber nicht klar, ob die Ausführung von binären Entscheidungen tatsächlich nur schwach mit der Intelligenz korreliert ist, oder ob die Steigung der Regressionsgerade nicht gut geeignet ist, um diese Komponente zu isolieren (Jensen, 1998b). Die Testwiederholungsreliabilität der Steigung der Regressionsgerade bei einem Intervall von zwei bis drei Tagen weist nämlich mit $r = .39$ eine niedrige Reliabilität auf (Jensen, 1998b). Zusätzlich sind die Fehler des y-Achsenabschnittes der Regressionsgeraden und die Fehler der Steigung der Regressionsgeraden negativ miteinander korreliert. Deshalb stellt der jeweils eine Parameter einen Suppressor für den Zusammenhang zwischen dem jeweils anderen Parameter und der Intelligenz dar (Jensen, 1998b). Die Korrelation zwischen dem Anstieg der Regressionsgerade und der Intelligenz wird also möglicherweise aufgrund von statistischen Artefakten unterschätzt (Jensen, 1998b). Eine alternative Methode zur Isolierung spezifischer Komponenten von Reaktionszeiten wird im Abschnitt „Die Isolierung der Komplexität“ genauer erörtert.

Die Isolierung elementarer Prozesse mittels EKA und die damit verbundene Manipulation verschiedener Bedingungen sind eng verknüpft mit der Komplexitätshypothese. Diese besagt, dass die Reaktionszeiten von komplexeren Aufgaben stärker mit der Intelligenz korrelieren als die Reaktionszeiten von weniger komplexen Aufgaben (Vernon & Jensen, 1984). Es handelt sich bei der Aufgabenmanipulation in EKA um eine systematische Komplexitätserhöhung, wobei die Manipulation den elementaren kognitiven Prozess betrifft, von dem erwartet wird, dass er mit der Intelligenz korreliert. So ergibt sich mit steigender Komplexität der obengenannten Hick-Bedingungen typischerweise ein Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation (Sheppard & Vernon, 2008). Um näher auf die Komplexitätshypothese eingehen zu können, muss die Komplexität zunächst definiert werden.

Definition und Operationalisierung der Aufgabenkomplexität. Im Mental-Speed-Ansatz werden kognitive Prozesse untersucht (Eysenck & Keane, 2010). Als Leistungsmass wird oft die Reaktionszeit eingesetzt. Zur Berechnung der individuellen Reaktionszeit werden mehrere Reize vorgegeben und Mittelwert, Median oder ein anderes Mass der zentralen Tendenz

der Reaktionszeiten auf diese Reize berechnet (Dodonov & Dodonova, 2011). Aus dieser Reaktionszeit lässt sich schliessen, wie schnell eine Person eine Aufgabe ausführen kann. Gemittelt über alle Vpn lässt sich aber auch eine Aussage darüber machen, wie anspruchsvoll eine Aufgabe ist. Vpn benötigen zur Ausführung von anspruchsvolleren Aufgaben mehr Zeit als zur Ausführung von weniger anspruchsvollen Aufgaben.

Das macht man sich bei der Operationalisierung der Komplexität zu Nutze. Die Manipulation der Komplexität bezieht sich je nach Aufgabe auf sehr unterschiedliche Prozesse. Deshalb ist es sehr schwierig, Komplexität im Allgemeinen zu definieren (Duncan et al., 2008). Zur Operationalisierung vorgeschlagen wurden z.B. die Zahl der Merkmale eines Reizes, die Anzahl mentaler Schritte zur Aufgabenausführung, die Tiefe der benötigten Verarbeitung, die Anzahl verschiedener Prozesse, die Anzahl kognitiver Operationen der Informationsverarbeitung, der Bedarf an exekutiver Kontrolle, die subjektive Einschätzung durch die Vpn, der Anstieg der Unsicherheit oder der Mittelwert der individuellen Reaktionszeit aller Vpn (Fernandez, Fagot, Dirk & de Ribaupierre, 2014; Jensen, 1998a, 2006; Schweizer, 1998). Nur wenige dieser Operationalisierungen eignen sich für einen weiten Komplexitätsbereich.

Der Mittelwert der individuellen Reaktionszeit aller Vpn ist einfach und objektiv erfassbar. Er ist ein Mass dafür, wie lange die untersuchte Stichprobe im Durchschnitt zur Ausführung der Aufgabe benötigt. Dieses Mass kann sowohl für relativ basale als auch für relativ komplexe Aufgaben eingesetzt werden, ohne dass man die beteiligten Prozesse genau kennen muss. Für Jensen (1986) stellt dieser Leistungsindikator den besten objektiven Index für die Aufgabenkomplexität dar. Die Reaktionszeit hat vorteilhafte mathematische Eigenschaften. Sie hat eine natürliche Masseinheit sowie einen natürlichen Nullpunkt, weist also Verhältnisskalenniveau auf. Zusätzlich kann sie nahezu beliebig genau aufgelöst werden. Das macht sie zu einem sehr guten Mass für die Untersuchung interindividueller Unterschiede (Jensen, 2006). Deshalb wird die Aufgabenkomplexität in der vorliegenden Arbeit wie in anderen Untersuchungen operational über die mittlere Reaktionszeit definiert (z.B. Crawford, 1991; Dodonova & Dodonov, 2013; Jensen, 1982; Stankov & Crawford, 1993).

Bei Aufgaben mit niedriger Komplexität ist typischerweise die Reaktionszeit mit der Intelligenz korreliert, bei Aufgaben mit hoher Komplexität hingegen die Fehlerrate (Dodonova

& Dodonov, 2013; Schweizer, 1996). Damit stellt sich die Frage, ob die mittlere Reaktionszeit auch bei komplexen Aufgaben ein valides Mass zur Operationalisierung der Komplexität darstellt, oder ob die Fehlerrate dafür besser geeignet ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass die beiden Masse über verschiedene Aufgaben hinweg, fast perfekt miteinander korreliert sind (Elliott & Murray, 1977). In Aufgaben, zu deren Ausführung man im Durchschnitt länger braucht, kommen also im Durchschnitt auch mehr Fehler vor. Wegen der vorteilhaften Eigenschaften der Reaktionszeit empfiehlt Jensen (2006) die Reaktionszeit gegenüber der Fehlerrate zu präferieren. So kann auch die Komplexität ganz basaler Aufgaben bestimmt werden, bei denen keine Fehler vorkommen. In der vorliegenden Arbeit soll zunächst überprüft werden, ob die Reaktionszeiten und die Fehlerraten der verschieden komplexen Aufgaben tatsächlich hoch korreliert sind. Ist das der Fall, wird die Komplexität über die Reaktionszeit operationalisiert. Ist das nicht der Fall, werden beide Operationalisierungen verglichen.

Die Komplexitätshypothese. Mit verschiedenen EKA haben Vernon und Jensen (1984) erstmals nachgewiesen, dass der Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit der Aufgabenkomplexität nahezu perfekt linear ansteigt. In der Folge wurde dieser Zusammenhang, bekannt unter der Komplexitätshypothese, wiederholt bestätigt (z.B. Ackerman & Cianciolo, 2002; Cohn, Carlson & Jensen, 1985; Larson & Saccuzzo, 1989; Levine, Preddy & Thorndike, 1987; Lindley, Smith & Thomas, 1988; Neubauer & Fink, 2003; Stankov, 2000; Unsworth, Redick, Lakey & Young, 2010; Vernon & Weese, 1993). Allerdings kamen auch Zweifel an der Stabilität und Generalität der Komplexitätshypothese auf. Vernon (1987) untersuchte 11 EKA und fand lediglich eine Korrelation zwischen der Aufgabenkomplexität und dem Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von $r = .33$. Andere Autoren fanden keine solche Beziehung (Frey, 2011; Knorr & Neubauer, 1996). Auch in der Metaanalyse der empirischen Studien zum Zusammenhang zwischen der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und der Intelligenz von Sheppard und Vernon (2008) wurde die Komplexitätshypothese nur teilweise bestätigt. In der Hick-Aufgabe z.B. ergab sich ein Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von der einfachsten Bedingung, ohne binäre Entscheidung, zur Bedingung mit zwei binären Entscheidungen. Bei mehr als zwei binären Entscheidungen nahm der Zusammenhang aber nicht mehr weiter zu. Ein Grund für die inkonsistenten Befunde zur Komplexitätshypo-

these könnte also darin zu sehen sein, dass der Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang nicht über den gesamten Komplexitätsbereich ansteigt.

Aufgabenkomplexität und Leistungsmasse. Lindley et al. (1995) fanden einen kurvilinearen Verlauf der Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Intelligenz in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität. Der Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang nahm, beginnend mit sehr wenig komplexen Aufgaben, mit steigender Komplexität stetig zu. Bei einer Komplexität von etwa einer Sekunde wird der Zusammenhang maximal und nimmt danach wieder ab (Jensen, 2006). Die maximale Korrelation ist jeweils am Übergang zwischen Aufgaben, die von allen fehlerfrei gelöst werden können und solchen, bei denen vermehrt Fehler vorkommen (Jensen, 2006). Dieser kurvilineare Verlauf wird auch *Test-Speed-Paradoxon* genannt (Jensen, 1982). In Abbildung 3 ist der theoretisch zu erwartende Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation dargestellt. Er ist an Abbildung 9.13 in Jensen (2006) angelehnt. Die Korrelationen mit der Intelligenz sind normalerweise negativ, weshalb aus Gründen der Übersichtlichkeit der Betrag der Korrelation dargestellt ist.

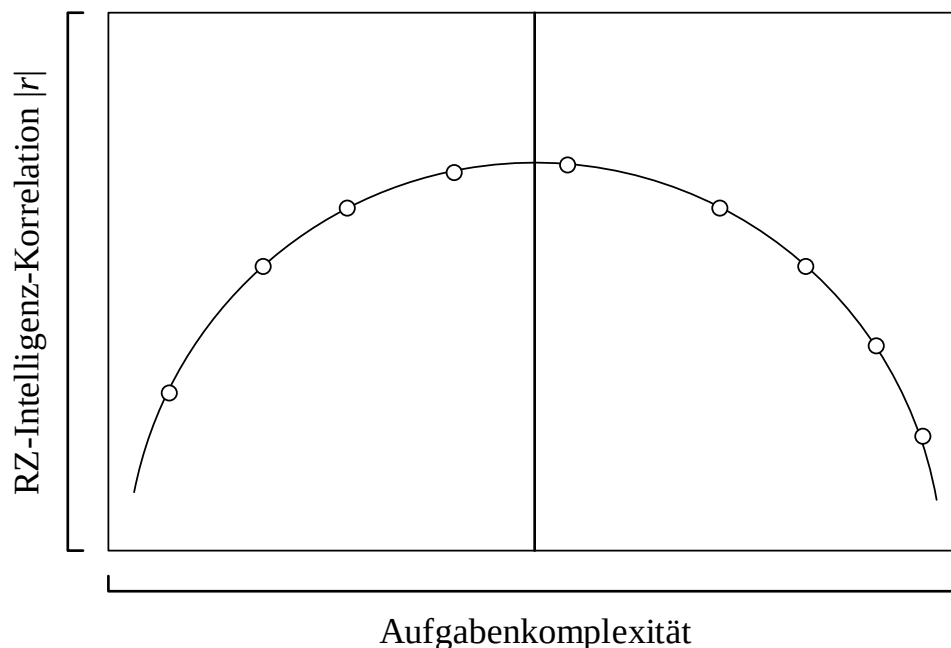


Abbildung 3. Theoretisch zu erwartender Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität (angelehnt an Jensen (2006)). Auf der x-Achse ist die Aufgabenkomplexität und auf der y-Achse der Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation abgetragen. Die Kreise stellen verschiedene Aufgaben dar. Der Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation wird beginnend mit wenig komplexen Aufgaben zunehmend grösser, nimmt aber ab einer gewissen Komplexität wieder kontinuierlich ab.

Bei welcher Komplexität die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation maximal ist, hängt von der untersuchten Stichprobe ab (Jensen, 2006). Bei Studenten war das Maximum bei einer Komplexität von einer Sekunde erreicht (Lindley et al., 1995) und bei Kindern bei einer Komplexität von zwei bis drei Sekunden (Jensen, 2006). Jensen (2006) geht davon aus, dass der Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation grundsätzlich bei Stichproben aus einer weniger intelligenten Population bei einer höheren Komplexität maximal ist als bei Stichproben aus einer intelligenteren Population. Durch diese Stichprobenabhängigkeit würde man eine Rechts- oder Linksverschiebung der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation-Kurve in Abbildung 3 erwarten. Bei weniger intelligenten Vpn ist der Scheitelpunkt der Kurve bei einer höheren Komplexität erreicht als bei intelligenteren Vpn (Jensen, 2006).

Weil die Komplexität, bei der die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation maximal ist, stichprobenabhängig ist, geht Jensen (2006) davon aus, dass es schwierig ist, eine Aufgabe zu finden, die für Personen aus verschiedenen Fähigkeitsbereichen optimal differenziert. Er weist aber darauf hin, dass zusätzliche Forschung notwendig ist, um diese Annahme empirisch zu überprüfen (Jensen, 2006). Die Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Intelligenz hängt also insbesondere von zwei Variablen ab: der Aufgabenkomplexität und der Höhe der Intelligenz der untersuchten Stichprobe (Jensen, 2006). Allerdings basieren diese Befunde in erster Linie auf der Untersuchung eines sehr eingeschränkten Komplexitätsbereichs (Dodonova & Dodonov, 2013; Vigneau et al., 2002). Der Grund dafür ist, dass die Komplexitätshypothese primär im Kontext vom Mental-Speed-Ansatz und damit von sehr wenig komplexen EKA untersucht wurde. Darüber, wie der Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang in anderen Komplexitätsbereichen aussieht, ist noch wenig bekannt. Gut untersucht ist aber, dass am anderen Ende des Komplexitätskontinuums, bei sehr komplexen Aufgaben wie z.B. AG-Aufgaben, die Fehlerraten mit der Intelligenz korreliert sind (Conway et al., 2002; Oberauer, Schulze, Wilhelm & Süß, 2005). Im bislang wenig untersuchten Komplexitätsbereich zwischen diesen sehr komplexen AG-Aufgaben und den sehr wenig komplexen EKA, muss also der Übergang von der Reaktionszeit als signifikanter Prädiktor der Intelligenz hin zu der Fehlerrate als signifikanter Prädiktor stattfinden. So hat Schweizer (1996) belegt, dass bei Aufgaben, die schon etwas komplexer sind, bei denen also eine nicht zu vernachlässigende Anzahl von Fehlern vorkommt,

beide Leistungsmasse, Reaktionszeit und Fehlerrate mit der Intelligenz korreliert sind. Es ist anzunehmen, dass ab einer gewissen Komplexität die Fehlerrate stärker mit der Intelligenz assoziiert ist als die Reaktionszeit. Es sollte also einen Tradeoff zwischen der Reaktionszeit und der Fehlerrate als Korrelat der Intelligenz geben (Jensen, 2006). Damit ist zu erwarten, dass der Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Aufgabenkomplexität kurvilinear ist, wobei die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit einer Zunahme sowohl der Fehlerrate als auch der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einhergeht (Schweizer, 1996).

Zusammengefasst bezieht sich also die Komplexitätshypothese aus dem Mental-Speed-Ansatz eigentlich primär auf die Reaktionszeit von wenig komplexen Aufgaben. In der vorliegenden Arbeit soll aber dieser eingeschränkte Komplexitätsbereich auf komplexere Aufgaben erweitert werden. Weil zu erwarten ist, dass abhängig von der Aufgabenkomplexität sowohl die Reaktionszeit als auch die Fehlerrate mit der Intelligenz korreliert (Schweizer, 1996), sollen in der vorliegenden Arbeit sowohl Reaktionszeiten als auch Fehlerraten von komplexeren Aufgaben untersucht werden. Es kann also erwartet werden, dass individuelle Unterschiede in der Reaktionszeit von wenig komplexen Aufgaben sich einerseits in Reaktionszeiten und andererseits in Fehlerraten von komplexeren Aufgaben transformieren (Schweizer, 1996). Um aber die Komplexität gezielt untersuchen zu können, muss diese systematisch manipuliert werden.

Kontrolle der Aufgabenkomplexität. In der Vergangenheit wurden zur Untersuchung der Komplexitätshypothese oft viele verschiedene Aufgaben eingesetzt, die sich nicht nur in ihrer Komplexität, sondern auch in anderen Eigenschaften unterschieden (z.B. Ackerman & Cianciolo, 2002; Jensen, 2006; Lindley et al., 1995; Vernon & Jensen, 1984). So können zwei Aufgaben vergleichbar komplex sein, eine aber stärker mit der Intelligenz korrelieren, weil sie andere Prozesse beinhaltet. Das kann z.B. dadurch zustande kommen, dass die eine Aufgabe zu einem erheblich grösseren Anteil motorische, nicht mit der Intelligenz korrelierte Anteile aufweist oder dass die Aufgaben verschiedene Prozesse enthalten, die unterschiedlich stark mit der Intelligenz assoziiert sind (Mayr & Kliegl, 1993; Verhaeghen, Kliegl & Mayr, 1997). Nicht jede Komplexitätsmanipulation resultiert in einer höheren Korrelation mit der Intelligenz (Neubauer, 1995; Stankov, 2000). Es können sogar gewisse Prozesse positiv und gewisse nega-

tiv mit der Intelligenz zusammenhängen (Schweizer, 1989, 1991; Sternberg, 1977). Personen mit höherer Intelligenz brauchten z.B. verglichen mit weniger intelligenten Personen weniger Zeit für die Entscheidungs- und Reaktions-Komponente aber länger für die Wahrnehmungs- und Vergleichs-Komponente (Schweizer, 1989).

Grundsätzlich bleibt also unklar, ob unterschiedliche Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen in verschiedenen komplexen Aufgaben durch quantitative Unterschiede in der Aufgabenkomplexität oder durch qualitative Unterschiede der beteiligten Prozesse zustande kommen (Frey, 2011). Trifft nun die Komplexitätshypothese zu, weiss man nicht sicher, worauf das zurückzuführen ist. Gilt diese nur, weil in der Aufgabe mit relativ niedriger Komplexität ein Prozess enthalten ist, der in unerwarteter Richtung mit der Intelligenz assoziiert ist und deshalb die eigentlich höhere Korrelation zwischen den anderen Prozessen dieser Aufgabe und der Intelligenz unterdrückt?

Damit wäre es theoretisch möglich, dass die Reaktionszeit einer Aufgabe nicht mit der Intelligenz korreliert ist, bestimmte darin enthaltene Reaktionszeit-Komponenten aber schon. Um mögliche Fehlschlüsse zu verhindern, ist es deshalb wichtig mit einer geeigneten Methode die interessierende, von der Komplexitätsmanipulation abhängige Komponente zu isolieren.

Dafür müssen homogene Aufgaben konstruiert werden, die sich nur in der Komplexität unterscheiden ansonsten aber identisch sind (Schweizer, 2006a). Eine solche Aufgabe ist die bereits vorgestellte Hick-Aufgabe aus dem Mental-Speed-Ansatz, welche auch in der vorliegenden Arbeit eingesetzt wurde. Alle drei Bedingungen sind genau gleich, ausser dass die Komplexität systematisch ansteigt. Zusätzlich wurden zwei weitere derartige Aufgaben untersucht, von denen mindestens eine Bedingung klar komplexer war als die Hick-Aufgabe, um insgesamt einen weiten Komplexitätsbereich untersuchen zu können.

Eine dieser Aufgaben ist die Flanker-Aufgabe. Die Flanker-Aufgabe wurde von Eriksen und Eriksen (1974) zur Erhebung von Inhibition einer automatischen Antwort entwickelt. Die eingesetzte Version ist an Scheres et al. (2003) angelehnt. Kane und Engle (2002) identifizierten die Aufgabe als Mass für kontrollierte Aufmerksamkeit. Kontrollierte Aufmerksamkeit wird als Fähigkeit definiert, Repräsentationen trotz Interferenz mental aktiv zu halten (Engle et al., 1999). In der Aufgabe wird jeweils ein Pfeil präsentiert, der entweder nach links oder

nach rechts zeigt. Die Vpn müssen die Richtung dieses Pfeils angeben. In der kongruenten Bedingung wird der Pfeil jeweils auf beiden Seiten von zwei kongruenten Pfeilen umgeben (>>>> oder <<<<), in der inkongruenten Bedingung von zwei inkongruenten Pfeilen (<<>< oder >><>). Die vier jeweils kongruenten oder inkongruenten Pfeile werden Flanker genannt. Sie aktivieren eine automatische Antwort, die durch Fokussieren der selektiven Aufmerksamkeit auf den imperativen Reiz in der Mitte entweder ausgeführt (kongruent) oder unterdrückt (inkongruent) werden muss (Eriksen & Eriksen, 1974). Die Aufgabe wird erst dadurch komplex, dass die Durchgänge der beiden Bedingungen zufällig durchmischt, innerhalb eines Aufgabenblockes präsentiert werden (Rinkenauer, Osman, Ulrich, Müller-Gethmann & Mattes, 2004). Dabei müssen die Vpn abhängig vom Reiz zwischen ausführen und unterdrücken der automatisch aktivierten Antwort hin und her wechseln.

Die Flanker-Aufgabe wurde zur Isolierung der komplexitätsabhängigen Komponente mit zwei weiteren, schrittweise weniger komplexen Bedingungen ergänzt. In beiden Bedingungen wurde jeweils nur ein Pfeil, der entweder nach links oder nach rechts zeigte, präsentiert. In der Bedingung, die nicht von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst wurde, wurden die Vpn instruiert, eine Taste zu drücken sobald ein Pfeil erscheint, unabhängig davon, ob er nach links oder nach rechts zeigte. In der nächst komplexeren Bedingung mussten sie mit der entsprechenden Taste angeben, ob der Pfeil nach links oder nach rechts zeigte.

Typischerweise wird die Leistung der Flanker-Aufgabe über den sogenannten Flanker-Effekt operationalisiert. Dieser stellt ein Mass für die Inhibition (Eriksen & Eriksen, 1974) oder die kontrollierte Aufmerksamkeit (Unsworth & Spillers, 2010) dar. Dafür wird die Differenz zwischen der inkongruenten und der kongruenten Bedingung berechnet und zwar entweder basierend auf der Reaktionszeit oder der Fehlerrate.

Die Befunde zum Zusammenhang zwischen dem Flanker-Effekt (Inhibition) und der Intelligenz sind inkonsistent. Je nach Studie hängen die beiden Konstrukte zusammen (Bexkens, Van der Molen, Collot d'Escury-Koenigs & Huizenga, 2014; Unsworth & Spillers, 2010) oder nicht (Friedman et al., 2006; van Leeuwen, van den Berg, Hoekstra & Boomsma, 2007).

Die inkonsistenten Befunde können mit der niedrigen Reliabilität von Differenzmassen zusammenhängen. Diese sind jeweils weniger reliabel als die beiden Leistungsmasse auf denen

sie basieren, weil sich die Fehler darin kumulieren (Miller & Ulrich, 2013). So betrug bei Kindern die Testwiederholungsreliabilität des Flanker-Effektes basierend auf der Reaktionszeit $r_{tt} = .48$ und basierend auf der Fehlerrate $r_{tt} = .29$ (van Leeuwen et al., 2007). Die Reliabilität war also für beide Masse unbefriedigend. Damit stellt sich die Frage, ob Inhibition nicht oder nur gering mit der Intelligenz korreliert ist, oder ob die Subtraktionsmethode keine adäquate Methode zur Isolierung der Inhibition ist.

Im Gegensatz zum Flanker-Effekt korrelierte aber die Reaktionszeit sowohl der kongruenten als auch der inkongruenten Bedingung bei Kindern (van Leeuwen et al., 2007) und die Reaktionszeit der inkongruenten Bedingung bei Erwachsenen (Colom, Escorial, Shih & Privado, 2007) mit der Intelligenz. Das kann auf die höhere Reliabilität verglichen mit Differenzmassen zurückgeführt werden, oder aber darauf, dass diese Bedingungen mit der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit konfundiert sind. Es gibt auch Arbeiten, in denen die Flanker-Aufgabe zur Operationalisierung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit eingesetzt wurde (Kail, 1991; Ridderinkhof & Van der Molen, 1997). Allerdings korrelierte auch hier die inkongruente Bedingung entsprechend der Komplexitätshypothese stärker mit der Intelligenz als eine traditionelle, wenig komplexe Informationsverarbeitungsgeschwindigkeits-Aufgabe (Colom et al., 2007). Zusammengefasst kann also erwartet werden, dass die Komplexitätshypothese in der Flanker-Aufgabe zutrifft. Allerdings sind die Resultate zum Flanker-Effekt inkonsistent und der Flanker-Effekt ist unreliabel. Zusätzlich könnte die Leistung in der Flanker-Aufgabe mit basalen Informationsverarbeitungsgeschwindigkeits-Komponenten konfundiert sein. Aus diesen Gründen ist eine statistische Methode zur Isolierung der komplexitätsabhängigen Komponente notwendig.

Eine weitere Aufgabe, deren Komplexität sich systematisch manipulieren lässt ist die Swaps-Aufgabe (Stankov, 2000). Sie ist anspruchsvoller als die Hick- und die Flanker-Aufgabe. Sie wurde zur Operationalisierung verschiedener Konstrukte wie Intelligenz (Stankov, 2000), AG (Schweizer & Moosbrugger, 2004) und Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit (O'Connor & Burns, 2003) eingesetzt. Das deutet wie in der Hick und Flanker-Aufgabe darauf hin, dass auch in der Swaps-Aufgabe verschiedene Prozesse enthalten sind, die nicht alle von der Komplexitätsmanipulation abhängen.

In allen Bedingungen werden jeweils drei Buchstaben präsentiert. Die Aufgabe der Vpn besteht darin, die Position dieser Buchstaben jeweils ein oder mehrmals mental auszutauschen. Die Aufgabenkomplexität wird über die Anzahl solcher mentaler Positionswechsel manipuliert. Mit steigender Komplexität der Bedingung kommt jeweils ein zusätzlicher Positionswechsel hinzu. In der Bedingung mit der niedrigsten Komplexität muss nur ein Positionswechsel durchgeführt werden, in der komplexesten Bedingung müssen nacheinander vier Positionswechsel durchgeführt werden. Bei mehr als einem Positionswechsel muss diese Zwischenlösung jeweils im Kopf behalten werden, um daran den nächsten Positionswechsel ausführen zu können.

Die Swaps-Aufgabe wurde zur Isolierung der komplexitätsabhängigen Komponente mit einer weiteren, systematisch weniger komplexen Bedingung ergänzt. In dieser Bedingung erschienen ebenfalls drei Buchstaben, die Vpn mussten diese aber nur abtippen.

Diese Bedingung erlaubt es, den komplexitätsbedingten Anstieg der Reaktionszeit aufgrund von mentalen Positionswechseln von den anderen Prozessen zu bereinigen, die nicht von der Komplexitätsmanipulation abhängen. Die Komplexitätsmanipulation bezieht sich also auf die Ausführung von mentalen Positionswechseln.

Je nach Fragestellung wurde/n in anderen Arbeiten für die Swaps-Aufgabe die Reaktionszeit (O'Connor & Burns, 2003; Schweizer & Moosbrugger, 2004; Stankov, 2000; Stankov & Schweizer, 2007) und/oder die Fehlerrate als Leistungsmass eingesetzt (Schweizer & Moosbrugger, 2004; Stankov, 2000; Stankov & Crawford, 1993; Stankov & Schweizer, 2007). Ein Effekt der Komplexitätsmanipulation auf sowohl die Reaktionszeit als auch auf die Fehlerrate konnte empirisch nachgewiesen werden (Stankov & Crawford, 1993). Dabei ergab sich für die Fehlerrate, nicht aber für die Reaktionszeit, eine signifikante Interaktion mit der Intelligenz der Stichprobe und der Komplexität (Stankov & Crawford, 1993). Der Anstieg der Fehlerrate durch die Komplexitätsmanipulation war für weniger intelligente Personen steiler als für intelligentere Personen. Betrachtet man die Korrelationen mit der Intelligenz, so ergaben sich signifikante Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen (z.B. Schweizer & Moosbrugger, 2004; Stankov, 2000; Stankov & Crawford, 1993). Eine Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation wurde nicht gefunden (Stankov & Crawford, 1993; Stankov & Schweizer, 2007). Allerdings korrelierte die Reaktionszeit in der Arbeit von O'Connor und Burns (2003) sehr stark mit einem

generellen Geschwindigkeitsfaktor (Gs). Obwohl in dieser Arbeit (O'Connor & Burns, 2003) die Intelligenz nicht untersucht wurde, weiss man aus anderen Arbeiten, dass Gs mit dem g-Faktor korreliert ist (Carroll, 1993). Doch warum ergaben sich in den anderen Arbeiten keine signifikanten Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen? Eine Erklärung dafür kann sein, dass in den anderen Arbeiten alle Reaktionszeiten miteinbezogen wurden, auch die Reaktionszeiten von falsch beantworteten Durchgängen. Fehlreaktionen reflektieren andere kognitive Prozesse als korrekte Antworten und können damit die mittlere Reaktionszeit verunreinigen haben (Lohman, 1989). Darum schlagen verschiedene Autoren vor, nur Reaktionszeiten von korrekt beantwortete Durchgänge in die Berechnung der Reaktionszeit einzubeziehen (z.B. Dodonova & Dodonov, 2013; Jensen, 2006; Lavergne & Vigneau, 1997). Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit nur Reaktionszeiten von korrekt beantworteten Durchgängen untersucht. Zusammengefasst korrelieren also in der Swaps-Aufgabe möglicherweise sowohl die Fehlerraten als auch die Reaktionszeiten der korrekt beantworteten Durchgänge mit der Intelligenz. Allerdings sind auch in der Swaps-Aufgabe verschiedene Komponenten enthalten, die nicht nur von der Komplexitätsmanipulation abhängen. Aus diesem Grund ist auch für diese Aufgabe eine Methode zur Isolierung der komplexitätsabhängigen Komponente notwendig.

Sowohl die Hick- als auch die Flanker und die Swaps-Aufgabe bestehen aus homogenen Bedingungen, die sich nur in der Komplexität unterscheiden. Doch wie kann damit die Komplexität gezielt isoliert werden?

Isolierung der Komplexität mit *Fixed-Links-Modellen*. Im Kontext von EKA wurden elementare kognitive Prozesse mit Hilfe von linearen Regressionen (Jensen, 2006) oder der Subtraktionsmethode (Donders, 1969) isoliert. Beide Methoden wurden aber auf Grund des hohen Fehleranteils kritisiert (Jensen, 1998b; Miller & Ulrich, 2013).

Eine Möglichkeit, Messwerte vom Messfehler zu bereinigen, besteht darin, sie auf latenter Ebene zu modellieren (Raykov & Marcoulides, 2000). Gleichzeitig erlaubt das, eine gezielte Isolierung der Reaktionszeit-Komponente, die von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst wird (Schweizer, 2006b). Die sogenannten Fixed-Links-Modelle sind eine spezielle Form von latenten Wachstumskurven (Dodonova & Dodonov, 2013). Das Spezielle an diesen Modellen ist, dass die Ladungen der manifesten Variablen auf den latenten Variablen nicht frei geschätzt,

sondern entsprechend der Komplexitätsmanipulation fixiert werden. Damit erlaubt diese Methode die Separierung einer komplexitätsabhängigen Komponente von einer komplexitätsunabhängigen Komponente. Abbildung 4 a visualisiert diese Komponentenaufteilung an den fünf Bedingungen der Swaps-Aufgabe.

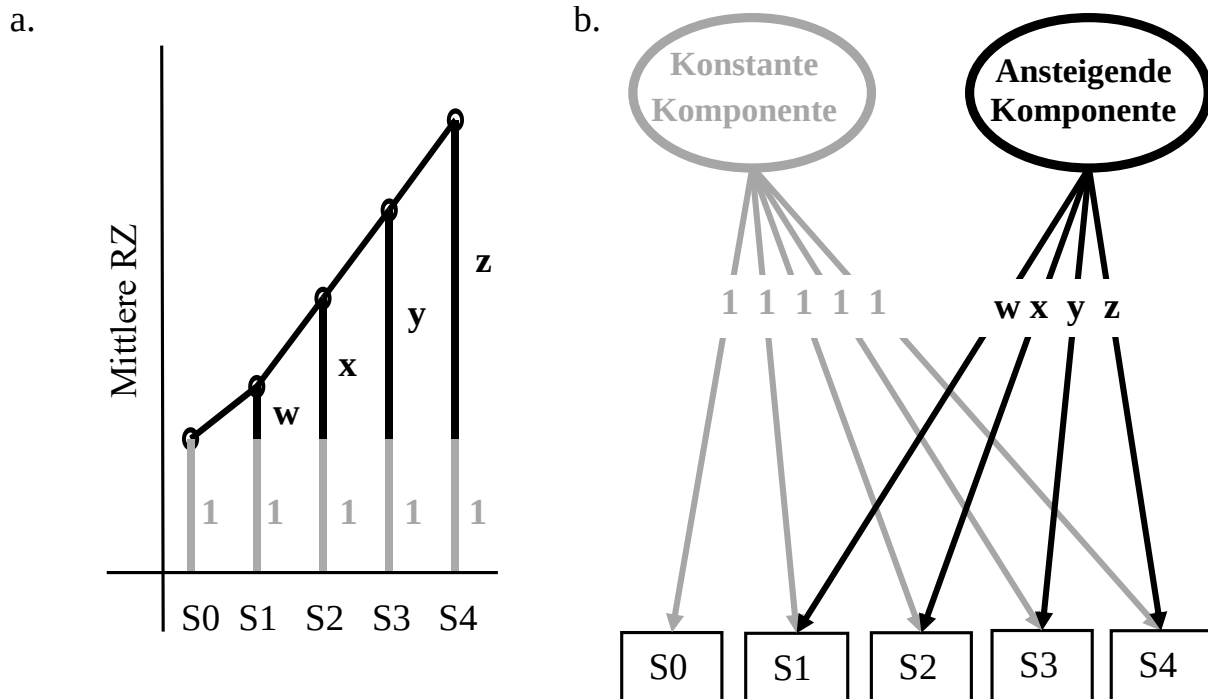


Abbildung 4. Schematische Darstellung der (a) Mittelwert- und (b) Varianz-Zerlegung von fünf homogenen Swaps-Bedingungen (S0-S4). Die Reaktionszeiten werden in eine konstante (grau) und eine ansteigende (schwarz) Komponente zerlegt. Die konstante Komponente (grau) ist in allen Bedingungen gleichermassen enthalten. Deswegen werden die Ladungen auf der konstanten Komponente auf eins fixiert. Die ansteigende Komponente ist nur in den von der Komplexitätsmanipulation beeinflussten Bedingungen (w, x, y, z) enthalten. Diese Ladungen werden entsprechend der Komplexitätsmanipulation fixiert.

Die Bedingungen werden mit S0 bis S4 abgekürzt, wobei sie entsprechend der Komplexität aufsteigend nummeriert sind. Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten der fünf homogenen Bedingungen mit steigender Komplexität. Die am wenigsten komplexe Bedingung (S0), bei der lediglich die drei Buchstaben abgetippt werden müssen, wird nicht von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst. Deshalb enthält sie ausschliesslich die konstante, graue Komponente, die in allen Bedingungen gleichermassen vorkommt und von der Manipulation unabhängig ist. Die komplexeren Bedingungen (S1-S4) hingegen bestehen neben der konstanten grauen Kom-

ponente zusätzlich zu einem immer grösseren Anteil aus der komplexitätsabhängigen schwarzen Komponente.

Neben den Mittelwerten in Abbildung 4 a, wird auch die Varianz-Kovarianz-Matrix, wie in Abbildung 4 b dargestellt, in diese beiden Komponenten zerlegt. Diese Matrix basiert auf interindividuellen Unterschieden. Es wird also erwartet, dass die Komplexitätsmanipulation die mittlere Reaktionszeit und interindividuelle Unterschiede in den Reaktionszeiten gleichermaßen beeinflusst. Die Aufgabenkomplexität wird über die mittlere Reaktionszeit operationalisiert. Wenn diese Manipulation die Korrelation mit der Intelligenz beeinflusst, dann muss sie einen direkten Einfluss auf interindividuelle Unterschiede in den Reaktionszeiten haben.

Die Abbildung ist eine vereinfachte Darstellung. Neben den beiden extrahierten Komponenten enthält jede Bedingung zusätzlich noch einen nicht erklärten Fehleranteil. Weil die konstante graue Komponente in allen Bedingungen gleichermaßen vorkommt, werden die unstandardisierten Ladungen aller fünf Bedingungen auf dieser Komponente auf eins fixiert (Abbildung 4). Die schwarze, ansteigende Komponente hingegen repräsentiert ausschliesslich die von der Komplexitätsmanipulation abhängigen Prozesse. Weil S0 keine mentalen Positionswechsel enthält und damit nicht von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst wird, lädt sie nicht auf der ansteigenden Komponente, ihre Ladung ist also null. Die anderen Bedingungen (S1 bis S4) laden entsprechend ihrer Komplexität auf der ansteigenden Komponente. Dabei wird jeweils vom Mittelwert der Bedingung der Mittelwert von S0 subtrahiert, weil dieser einer Komplexität von null entspricht. Die unstandardisierten Ladungen werden dann auf diese Werte fixiert. Somit entsprechen diese Fixierungen dem Komplexitätsanstieg, operationalisiert über die jeweiligen Mittelwerte der Reaktionszeiten. Eine solche Fixierung garantiert, dass mit der ansteigenden schwarzen Komponente die Prozesse abgebildet werden, die mit der Aufgabenkomplexität manipuliert wurden. Mit diesem Vorgehen sollte in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Komplexitätsmanipulation in der ansteigenden Komponente isoliert werden. Damit kann der Zusammenhang zwischen dieser komplexitätsabhängigen, ansteigenden Komponente und der Intelligenz untersucht werden. Auf diese Weise kann die Komplexitätshypothese auf statistische Signifikanz geprüft werden. Hängt nämlich die ansteigende Komponente signifikant mit der Intelligenz zusammen, hat die Komplexitätsmanipulation zu einer signifikanten

Korrelation mit der Intelligenz geführt. Das ist auf manifester Ebene schwierig, weil sich zwei Korrelationskoeffizienten stark unterscheiden müssen, um signifikant unterschiedlich zu sein. Bei einer Stichprobe von 200 Vpn müssen sich zwei Korrelationskoeffizienten um mehr als $r = .15$ unterscheiden, damit der Unterschied statistisch signifikant wird. Ein so grosser Unterschied ist aber bei relativ kleinen Komplexitätsunterschieden nicht zu erwarten. Deshalb wird auf manifester Ebene typischerweise nur das Muster der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität untersucht (Vernon & Weese, 1993). Hier ergab sich beispielsweise in der Hick-Aufgabe trotz fehlender Signifikanz ein relativ konsistentes Muster, welches die Komplexitätshypothese bestätigt. Trotzdem ist eine Signifikanzprüfung, wie sie mittels Fixed-Links-Modellen ermöglicht wird wünschenswert, um diese Muster auch statistisch nachweisen zu können.

In der vorliegenden Arbeit werden also Fixed-Links-Modelle eingesetzt, um die komplexitätsabhängige Komponente zu isolieren und mit der Intelligenz in Verbindung zu setzen. Damit wird einerseits das Verunreinigungsproblem gelöst und andererseits kann die Komplexitätshypothese auf Signifikanz geprüft werden. Allerdings wird damit die Aufgabenkomplexität sehr isoliert betrachtet, weil jeweils nur eine Aufgabe untersucht werden kann. Es stellt sich aber auch die Frage, wie verschieden komplexe Aufgaben miteinander zusammenhängen und ob jene Aufgaben, die besonders stark mit der Intelligenz zusammenhängen, auch miteinander stark korreliert sind. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Struktur verschieden komplexer Aufgaben näher untersucht.

Struktur von Reaktionszeiten und Fehlerraten verschieden komplexer Aufgaben

In weniger komplexen Aufgaben korreliert die Reaktionszeit mit der Intelligenz und in komplexeren Aufgaben die Fehlerrate (Vigneau et al., 2002). Doch wie stehen diese beiden Korrelate der Intelligenz miteinander in Beziehung? Nach Schweizer (1996) sagt die Reaktionszeit in Aufgaben mit relativ niedriger Komplexität die Fehlerrate in Aufgaben mit relativ hoher Komplexität voraus, wobei beide Leistungsmasse mit der Intelligenz korreliert sind. Die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation der Aufgaben mit relativ hoher Komplexität reduzierte sich um 30% bis 40%, wenn diese für den Einfluss der Reaktionszeiten der Aufgaben mit relativ

niedriger Komplexität kontrolliert wurde.

Es ist aber auch interessant zu wissen, wie die Reaktionszeiten verschieden komplexer kognitiver Aufgaben miteinander zusammenhängen. Es wurde nämlich nachgewiesen, dass auch die Reaktionszeiten in Aufgaben mit relativ niedriger Komplexität mit den Reaktionszeiten in Aufgaben mit höherer Komplexität korrelieren (Carroll, 1993; Roberts & Stankov, 1999). Weil im Mental-Speed-Ansatz, in dem oft mit Reaktionszeiten gearbeitet wird, der Fokus primär auf der Untersuchung von ausgewählten elementaren kognitiven Prozessen liegt, hat man sich wenig mit der faktoriellen Struktur von verschiedenen Informationsverarbeitungsgeschwindigkeits-Aufgaben beschäftigt (Jensen, 2006). Wenn die Struktur untersucht wurde, gab es aber oft Hinweise darauf, dass ein starker gemeinsamer Faktor extrahiert werden kann (Carroll, 1993; Danthiir, Wilhelm & Roberts, 2012; Hale & Jansen, 1994; Johnson & Deary, 2011; Kyllonen, 1985; Neubauer & Bucik, 1996; Roberts & Stankov, 1999). Jensen (2006) schlägt vor, diesen generellen, gemeinsamen Faktor G-Faktor zu nennen, um ihn nicht mit dem g-Faktor von Spearman (1927), extrahiert aus verschiedenen Aufgaben eines Intelligenztests, zu verwechseln. Obwohl auf oberster Ebene der Hierarchie oft ein G-Faktor extrahiert werden konnte, war die Struktur verschiedener Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit-Aufgaben genauso komplex und hierarchisch wie die Struktur von Aufgaben zur Erhebung der Intelligenz (Stankov & Roberts, 1997). Allerdings ist noch nicht eindeutig klar, durch welche korrelierten Faktoren erster Ordnung die Korrelationen zwischen verschieden komplexen Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit-Aufgaben am besten repräsentiert werden (Carroll, 1993). Wie in den Intelligenzstrukturmodellen könnte auch bei der Struktur von Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit-Aufgaben die Komplexität eine zentrale Rolle spielen (Jensen, 2006).

In der Arbeit von P. A. Vernon (1989) korrelierte der G-Faktor extrahiert aus verschiedenen EKA in fünf verschiedenen Stichproben zwischen $r = -.26$ und $r = -.67$ mit dem g-Faktor, extrahiert aus verschiedenen Aufgaben aus Intelligenztests. In der Arbeit von Johnson und Deary (2011) waren der G-Faktor und der g-Faktor mit $r = -.94$ fast perfekt korreliert. Diese sehr hohe Korrelation erklärten die Autoren damit, dass sie die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit einerseits, wie im Mental-Speed-Ansatz üblich, über die Reaktionszeit von EKA und andererseits, wie im psychometrischen Ansatz üblich, über die Anzahl korrekt beantworteter

Items pro Zeit operationalisierten. Das spricht dafür, dass für die Extraktion eines G-Faktors sowohl Reaktionszeiten als auch Fehlerraten eingesetzt werden sollten, wenn dieser stark mit dem g-Faktor korrelieren soll. Gleichzeitig spricht das auch für die zentrale Rolle der Aufgabenkomplexität, weil Reaktionszeiten typischerweise die Leistung in wenig komplexen und Fehlerraten die Leistung in komplexeren Aufgaben operationalisieren.

Das widerspricht auch nicht den Annahmen von Spearman (1927). Aus seiner Sicht kommt nämlich für die Extraktion des g-Faktors die Leistung in jeder kognitiven Aufgabe in Frage, weil alle kognitiven Leistungen einen bedeutenden g-Anteil aufweisen. Grundsätzlich sollten also auch experimentelle Aufgaben aus dem Mental-Speed-Ansatz, wie die Hick-Aufgabe, einen gewissen g-Anteil aufweisen und deshalb einerseits mit dem g-Faktor und andererseits mit anderen kognitiven Aufgaben, die ja auch einen g-Anteil aufweisen, korrelieren.

Es ist also durchaus möglich, dass der G-Faktor, extrahiert aus verschiedenen experimentellen und der g-Faktor, extrahiert aus verschiedenen Aufgaben aus Intelligenztests, grundsätzlich ein sehr ähnliches Konstrukt messen. Dafür spricht auch, dass die komplexe Struktur der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit in ein hierarchisches Intelligenzmodell eingegliedert werden konnte, an dessen Spitze ein einziger g-Faktor extrahiert wurde (Roberts & Stankov, 1999).

In der vorliegenden Arbeit sollte die Struktur der mit der Intelligenz korrelierten Reaktionszeiten und/oder Fehlerraten von Aufgaben, die einen sehr weiten Komplexitätsbereich abdecken untersucht werden. Zunächst wurde der Frage nachgegangen, ob sich die Leistungsmasse auf wenige Faktoren reduzieren lassen. Dabei wurde ein einfaktorielles Modell mit einem Modell mit Aufgabenfaktoren (Hick, Flanker, Swaps) verglichen. Wenn sich die Leistungsmasse auf wenige Faktoren reduzieren lassen, sollte in einem nächsten Schritt untersucht werden, ob sich daraus ein hierarchisches Modell ergibt. In diesem Modell sollte insbesondere beschrieben werden, welche Rolle die systematisch manipulierte Komplexität für die Struktur des hierarchischen Modelles spielt. Zusätzlich sollte der Frage nachgegangen werden, wie diese Struktur mit dem g-Faktor extrahiert aus den Skalen eines Matrizentests zusammenhängen. Im Folgenden werden alle Hypothesen dieser Arbeit dargestellt.

Hypothesen

Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation. Ziel dieser Arbeit war eine umfassende Untersuchung der Beziehung zwischen der Komplexität einer Aufgabe und ihrer Korrelation mit der Intelligenz. Dabei wurden sowohl Reaktionszeiten als auch Fehlerraten als Leistungsmasse untersucht.

Die Komplexitätshypothese besagt, dass die Reaktionszeit in komplexeren Aufgaben stärker mit der Intelligenz korreliert als die Reaktionszeit in weniger komplexen Aufgaben. Allerdings weisen einzelne Arbeiten darauf hin, dass das nur bis zu einer Aufgabenkomplexitätsgrenze gilt, die eine mittlere Reaktionszeit von etwa einer Sekunde notwendig macht. Ausserdem scheint diese Grenze stichprobenabhängig zu sein, wobei bei Stichproben mit niedrigerer Intelligenz von einer Grenze bei einer höheren Aufgabenkomplexität als einer Sekunde ausgegangen werden muss. Wenn diese Grenze überschritten wird, nimmt die Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Intelligenz wieder kontinuierlich ab, dafür nehmen aber die Fehlerrate sowie die Korrelation zwischen der Fehlerrate und der Intelligenz kontinuierlich zu. Viele der obengenannten Erwartungen basieren aber auf einzelnen empirisch Studien und können bisher nur unzureichend belegt werden. Der Grund dafür ist, dass in bisheriger Forschung primär entweder nur relativ wenig komplexe Aufgaben oder nur relativ komplexe Aufgaben untersucht wurden. In den relativ wenig komplexen Aufgaben korrelierte nur die Reaktionszeit mit der Intelligenz und in den relativ komplexen Aufgaben nur die Fehlerrate. Ausserdem wird die Vergleichbarkeit der Resultate aus verschiedenen Arbeiten dadurch erschwert, dass die eingesetzten Aufgaben sich in vielerlei Hinsicht unterschieden (z.B. Stimulusmaterial, Instruktionen usw.). Die Aufgabenkomplexität wurde also meist nicht systematisch manipuliert.

Um also oben genannte Erwartungen systematisch untersuchen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit einerseits Aufgaben eingesetzt, die einen weiten Komplexitätsbereich abdecken und andererseits wurde die Aufgabenkomplexität in drei verschiedenen Aufgaben systematisch manipuliert. Mit diesen Aufgaben sollten die folgenden Hypothesen untersucht werden:

1. Der Betrag der negativen Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation nimmt mit wachsender Aufgabenkomplexität zunächst kontinuierlich zu und geht dann wieder kontinuierlich zurück.

2. Mit dem Rückgang des Betrages der negativen Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit wachsender Aufgabenkomplexität geht eine Zunahme der Fehlerrate einher.

3. Mit dem Rückgang des Betrages der negativen Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit wachsender Aufgabenkomplexität geht eine Zunahme des Betrages der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher.

4. Das Maximum des Betrags der negativen Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation ist in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität erreicht als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz.

Isolierung einer komplexitätsabhängigen Komponente. Die Untersuchung der ersten Hypothesen erlaubt aber nur eine Beschreibung des Einflusses der Aufgabenkomplexität auf die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation aber keine Prüfung, ob der Einfluss der Komplexitätsmanipulation signifikant ausfiel. Ausserdem kann damit der Einfluss der Komplexitätsmanipulation nicht isoliert betrachtet werden, weil die Bedingungen der jeweiligen Aufgaben auch von anderen Prozessen beeinflusst werden und nicht nur von der Komplexitätsmanipulation. Aus diesen beiden Gründen wurde in einem nächsten Schritt der Einfluss der Komplexitätsmanipulation isoliert und mit der Intelligenz in Verbindung gesetzt. Damit sollte die folgende Hypothese untersucht werden:

1. Die aus den homogenen Bedingungen mit steigender Komplexität extrahierte Komponente, die ausschliesslich von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst wird, korreliert signifikant mit der Intelligenz, wobei intelligendere Personen einen weniger starken komplexitätsabhängigen Anstieg aufweisen als weniger intelligente Personen.

Struktur von Reaktionszeiten und Fehlerraten verschieden komplexer Aufgaben. Nachdem in obigen Analysen in erster Linie auf spezifische Aufgaben sowie die gezielte Isolierung einer komplexitätsabhängigen Komponente geachtet wurde, soll im dritten Teil der Analyse eine allgemeinere Betrachtung vorgenommen werden. Es hat sich gezeigt, dass Reaktionszeiten in weniger komplexen Aufgaben mit sowohl Reaktionszeiten als auch Fehlerraten von komplexeren Aufgaben zusammenhängen. Damit stellt sich die Frage nach der Struktur von Reak-

tionszeiten und Fehlerraten verschieden komplexer Aufgaben und wie diese Struktur mit der Intelligenz zusammenhängt. Es soll untersucht werden, ob alle Aufgaben sich auf einige wenige latente Variablen reduzieren lassen und welche Rolle dabei die Aufgabenkomplexität spielt. Zusätzlich soll die Frage beantwortet werden, wie stark diese fehlerbereinigten latenten Variablen mit der Intelligenz zusammenhängen. Des Weiteren soll versucht werden, aus diesen latenten Variablen erster Ordnung einen G-Faktor zweiter Ordnung zu extrahieren und dann zu untersuchen, wie hoch dieser G-Faktor mit der Intelligenz zusammenhängt. Dementsprechend wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

1. Die Reaktionszeiten in den Bedingungen mit relativ niedriger Komplexität korrelieren positiv mit den Fehlerraten der Bedingungen mit relativ hoher Komplexität.
2. Die Reaktionszeiten in den Bedingungen mit relativ niedriger Komplexität korrelieren positiv mit den Reaktionszeiten der Bedingungen mit relativ hoher Komplexität.
3. Die Zusammenhänge zwischen den mit der Intelligenz korrelierten kognitiven Aufgaben lassen sich auf wenige korrelierte Faktoren reduzieren.
4. Aus diesen Faktoren lässt sich ein G-Faktor extrahieren, der stark mit dem g-Faktor extrahiert aus dem Intelligenztest korreliert.

Methode

Versuchspersonen

Insgesamt nahmen 271 Vpn an der Studie teil. Die Daten wurden zwischen 2012 und 2014 erhoben. Weil sie nicht alle Aufgaben bearbeitet haben wurden 67 Vpn aus den Analysen ausgeschlossen. Es wurde ein relativ homogener Altersbereich untersucht, weil das Alter einen Effekt auf die Reaktionszeit hat und Alterseffekte vermieden werden sollten (Salthouse, 1996). Deshalb wurden vier weitere Personen von den Analysen ausgeschlossen, weil sie nicht zwischen 17 und 30 Jahre alt waren.

So ergab sich eine Stichprobe von insgesamt 200 Vpn. Das Durchschnittsalter der 133 Frauen und 67 Männer betrug 22.6 Jahre, mit einer Standardabweichung (*SD*) von 2.5 Jahren. Es gaben 74.5% an einen Maturitätsabschluss zu haben und 90% Rechtshänder zu sein.

Die Vpn wurden aus dem Versuchspersonenpool der Universität Bern oder durch persönliches Ansprechen rekrutiert. Die Vpn aus dem Versuchspersonenpool waren Psychologiestudenten/innen im ersten bis vierten Semester und erhielten für ihre Teilnahme eine Versuchspersonenstunde attestiert. Alle übrigen Vpn durften an einer Verlosung eines iPod Shuffle 4 teilnehmen. Zudem hatten alle Vpn die Möglichkeit ihre Mailadresse zu hinterlassen, um am Ende der Studie die Ergebnisse zu erhalten.

Die Teilnahme war freiwillig und durfte ohne Nennung eines Grundes jederzeit abgebrochen werden. Die Studie wurde durch die Ethikkommission der Phil.-hum. Fakultät der Universität Bern bewilligt. Die Daten wurden mittels Versuchspersonennummer pseudonymisiert und die Vpn gaben ihr schriftliches Einverständnis an der Studie teilzunehmen.

Intelligenzmessung

Die psychometrische Intelligenz wurde mit der Kurzversion der deutschsprachigen Adaptation des kulturfaireren Intelligenztest (CFT 20-R) erhoben (Weiss, 2006). Der CFT 20-R ist im Altersbereich von 8.5 bis 60 Jahren normiert. Durchführung und Instruktionen entsprachen exakt den Vorgaben im Manual. Die Kurzversion besteht aus dem ersten Teil des CFT 20-R und setzt sich aus vier Skalen zusammen. Alle Items sind figural. Die ersten drei Skalen bestehen aus 15 Items und die letzte aus 11 Items. Bei den Items handelt es sich um *Multiple-*

Choice-Aufgaben mit fünf Antwortalternativen, von denen eine korrekt ist. Pro Skala steigt die Schwierigkeit der Items jeweils an.

Für die erste Skala, das Reihenfortsetzen, mussten die Vpn diejenige Antwort auswählen, die eine bestehende Reihe am besten logisch ergänzt. Für die zweite Skala, die Klassifikationen, mussten sie jene Antwort auswählen, die nicht zu den anderen passt. Für die dritte Skala, die Matrizen, mussten sie diejenige Antwort auswählen, welche die vorgegebene Matrix am besten vervollständigt. Für die vierte Skala, die Topologien, mussten sie die Antwort auswählen, bei welcher die topologische Anordnung von Punkten in Bezug auf bestimmte Objekte derjenigen in der Vorlage entspricht.

Die Bearbeitungszeit für die Skalen betrug jeweils vier Minuten für die ersten beiden Skalen und drei Minuten für die anderen beiden Skalen. Diese Testdauer entspricht der im Manual vorgegebenen Zeit ohne Testverlängerung (Weiss, 2006).

Die abhängigen Variablen waren die Summen der korrekt beantworteten Items pro Skala. Es gab zwei Arten von Fehlern: falsche Antworten und Auslassungen. Diese wurden in einer Analyse auch als abhängige Variablen eingesetzt. Aus den Summen der korrekt beantworteten Items pro Skala wurden drei verschiedene Kennwerte abgeleitet: die Rohwertsumme, der Intelligenzquotient und der g_{CFT} -Faktor. Die Rohwertsumme ist die Summe aus den vier Skalensummen. Der Intelligenzquotient entspricht den alterskorrigierten Normen aus dem Manual (Weiss, 2006). Der g_{CFT} -Faktor ist der Faktor, der mittels konfirmatorischer Faktorenanalyse aus den vier Skalensummenwerten extrahiert wurde. Die Rohwertsumme und der Intelligenzquotient wurden nur für die Beschreibung der Stichprobe eingesetzt, für alle anderen Analysen wurde jeweils der g_{CFT} -Faktor verwendet. Der Grund dafür ist, dass latente Variablen im Gegensatz zu manifesten Variablen vom Messfehler bereinigt sind und somit das jeweilige zugrunde liegende Konstrukt reliabler messen können (Raykov & Marcoulides, 2000).

Die eingesetzte Version des CFT 20-R weist ein Cronbach's Alpha von .92 und eine unkorrigierte Testwiederholungsreliabilität über drei Monate von $r_{tt} = .80$ bis $r_{tt} = .82$ auf (Weiss, 2006). Die externe Validität, operationalisiert über die Korrelation mit anderen Begabungs- und Intelligenztests beträgt $r = .75$ bis $r = .78$ (Weiss, 2006). Die Konstruktvalidität des g_{CFT} -Faktors wurde über sehr hohe Korrelationen (.77 bis 1.0) mit den g-Faktoren extrahiert aus anderen

Intelligenztestbatterien nachgewiesen (Johnson et al., 2008; Valerius & Sparfeldt, 2014).

Experimentelle Aufgaben

Hick-Aufgabe. Die Hick-Aufgabe war an die Aufgabe von Rammsayer und Brandler (2007) angelehnt.

Untersuchungsgeräte. Die Aufgabe wurde mit einem PC der Marke Dell (Optiplex 760) und einem 19 Zoll Bildschirm der Marke Belinea (Modell: 10 19 02) präsentiert. Die Bildaufbaufrequenz betrug 60 Hz. Die Distanz zwischen der Versuchsperson (Vp) und dem Bildschirm war mittels Kopfstütze auf 55 cm fixiert. Die Aufgabe wurde in E-Prime Professional 2.0 programmiert (Schneider, Eshman & Zuccolotto, 2002). Der Feedbackton wurde über Kopfhörer (Sony MDR-NC500D) präsentiert. Die Antworteingabe erfolgte über eine Antworttastatur (Cedrus RB-830 Response Pad). Die Antworterfassung hatte eine zeitliche Auflösung von plus/minus 1 ms.

Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung der Antworttastatur. Die Anordnung der Tasten auf der Antworttastatur entsprach der Anordnung der Rechtecke in den Hick-Bedingungen (vgl. Abbildung 6). Es wurden nur die grau oder schwarz eingefärbten Tasten verwendet. Mit l sind die Tasten markiert, die mit der linken Hand betätigt wurden und mit r jene, die mit der rechten Hand betätigt wurden.

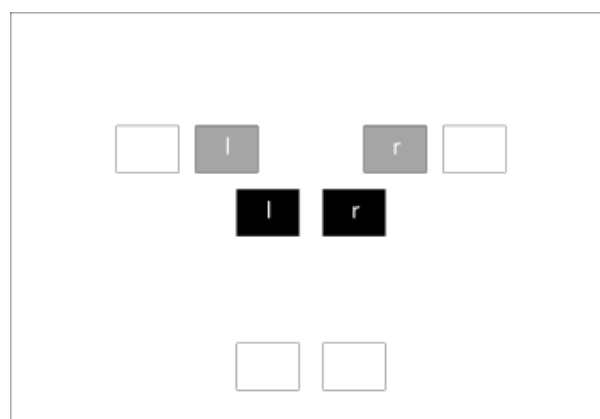


Abbildung 5. Schematische Darstellung der Antworttastatur für die Hick- und Flanker-Aufgabe.

Reizmaterial. Das Reizmaterial waren 1.9 cm lange und 1.5 cm hohe Rechtecke und 0.8 cm lange und 0.8 cm hohe Pluszeichen, die auf dem Bildschirm präsentiert wurden. Wenn zwei Rechtecke nebeneinander präsentiert wurden, betrug die Distanz zwischen den Rechtecken 3.3 cm. Wenn vier Rechtecke präsentiert wurden, betrug die Distanz zwischen den unteren beiden und den oberen beiden Rechtecken 0.7 cm. Zusätzlich waren die oberen beiden Rechtecke 4.1 cm auseinander und die unteren beiden 1.1 cm. Der Feedbackton war ein 200 ms langer 1000 Hz Ton mit einer Lautstärke von 56 dB.

Das Reizmaterial wurde weiss auf schwarzem Hintergrund mit der Schrift Courier New, fett, mit Grösse 28 auf dem Bildschirm präsentiert. Die verschiedenen Reize sind in Abbildung 6 dargestellt.

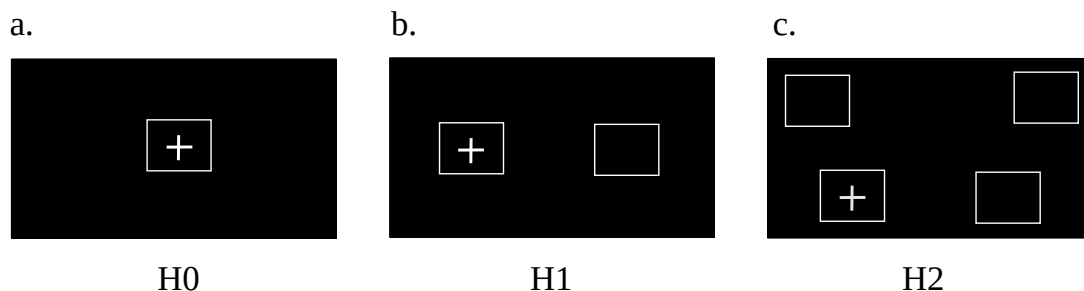


Abbildung 6. Darstellung der drei Hick-Bedingungen. (a) H0: Der imperative Reiz kann an einer Position erscheinen. (b) H1: Der imperative Reiz kann an zwei Positionen erscheinen. (c) H2: Der imperative Reiz kann an vier Positionen erscheinen.

Verfahren. Die Aufgabe setzte sich aus drei experimentellen Bedingungen und damit drei Aufgabenblöcken zusammen.

Für die erste Bedingung (H0) war der Ablauf eines Durchgangs wie folgt: Zuerst war der Bildschirm für eine Sekunde schwarz. Dann erschien in der Mitte des Bildschirms ein Rechteck (siehe Abbildung 6). In diesem erschien nach einer variablen Vorperiode von 1000, 1333, 1666 oder 2000 ms der imperative Reiz, das Pluszeichen. Die Länge des Intervalls war entsprechend einer Zufallsfolge definiert, wobei jedes Intervall gleich häufig vorkam. Die Aufgabe der Vpn bestand darin, sobald das Pluszeichen erschienen war, so schnell und genau wie möglich die entsprechende Taste auf der Antworttastatur zu drücken. Die Vpn benutzten den Zeigefinger ihrer dominanten Hand zum Antworten. Linkshänder betätigten mit ihrem linken Zeigefinger

die schwarze Taste l und Rechtshänder mit ihrem rechten Zeigefinger die schwarze Taste r (siehe Abbildung 5).

Der Reiz blieb bis zur Antworteingabe auf dem Bildschirm. Wenn vor dem Erscheinen des Pluszeichens geantwortet wurde, wurde das als Fehler registriert und der Feedbackton präsentiert. Nach der Antworteingabe oder nach dem Feedbackton wurde der Bildschirm für eine Sekunde schwarz und dann startete der nächste Durchgang.

Der Ablauf eines Durchgangs der zweiten Bedingung (H1) war fast identisch mit der ersten Bedingung, ausser dass zwei Rechtecke nebeneinander präsentiert wurden. Nach der variablen Vorperiode wurde der imperative Reiz in einem der beiden Rechtecke dargeboten. Die Reihenfolge der Positionen war eine Zufallsfolge, wobei das Pluszeichen pro Bedingung in jedem Rechteck gleich häufig auftauchte. Vergleichbar damit wurden in der dritten Bedingung (H2) vier Rechtecke präsentiert, zwei in der oberen Reihe und zwei in der unteren Reihe. Auch hier wurde der imperative Reiz zufällig in einem der Rechtecke präsentiert, wobei er in jedem Rechteck gleich häufig vorkam. Die Aufgabe der Vpn bestand darin, auf die der Position entsprechende Taste auf der Antworttastatur zu drücken. Für H1 benutzten die Vpn den linken Zeigefinger für die schwarze Taste l und den rechten Zeigefinger für die schwarze Taste r. Für H2 benutzten die Vpn zusätzlich zu den Zeigefingern den linken Mittelfinger für die graue Taste l und den rechten Mittelfinger für die graue Taste r (siehe Abbildung 5). Wenn vor dem Erscheinen des imperativen Reizes geantwortet wurde oder die Antwort falsch war, wurde ein Feedbackton präsentiert.

Um zu verhindern, dass Unterschiede in der Aufgabe die Komplexität beeinflussen, war sie für alle Vpn identisch. Sowohl die Darbietung der Reize als auch die Abfolge der Hick-Bedingungen wurde über die Vpn konstant gehalten. Zuerst wurde die erste, dann die zweite und zum Schluss die dritte Bedingung präsentiert. Jeder Aufgabenblock bestand aus acht Übungsdurchgängen und 32 Durchgängen.

Die gesamte Aufgabe dauerte etwa 10 Minuten. Vor jeder Bedingung wurden am Bildschirm zunächst die Instruktionen präsentiert. Diese können Anhang A entnommen werden. Wenn die Vpn die Instruktionen verstanden hatten, konnten sie durch betätigen einer Taste der Antworttastatur Übungs- und Experimentalblöcke starten. Wenn sie noch Fragen hatten, konn-

ten sie sich an den Versuchsleiter wenden. Damit die Voraussetzungen für alle Vpn identisch waren, mussten sie während allen Übungs- und Experimentalblöcken die Finger auf der/den entsprechenden Antworttaste/n platzieren.

Die abhängigen Variablen waren der Mittelwert der Reaktionszeiten der korrekt beantworteten Durchgänge sowie die Fehlerrate. Dabei gab es zwei Arten von Fehlern, die Anzahl falscher Antworten und die Anzahl zu früh abgegebener Antworten. In die Fehlerrate gingen nur die falschen Antworten ein. Um die Wahrscheinlichkeit für Ausreisser zu reduzieren und trotzdem zu gewährleisten, dass die mittlere individuelle Reaktionszeit auf möglichst vergleichbar vielen individuellen Antworten basiert, wurden die Reaktionszeiten auf den ersten und den langsamsten korrekt gelösten Durchgang ausgeschlossen. Zusätzlich wurde im Anschluss eine visuelle Ausreisserbetrachtung vorgenommen, um verbleibende extreme Werte ausschliessen zu können. Diese wird im Resultateteil genauer erörtert.

Flanker-Aufgabe. Die Flanker-Aufgabe war an die Aufgabe von Scheres et al. (2003) angelehnt.

Untersuchungsgeräte. Die Untersuchungsgeräte entsprachen denjenigen der Hick-Aufgabe. In der Flanker-Aufgabe wurden allerdings nur die beiden schwarzen Tasten der Antworttastatur (siehe Abbildung 5) benutzt.

Reizmaterial. Das Reizmaterial waren 0.4 cm breite und 0.6 cm hohe Pfeile, die auf dem Bildschirm präsentiert wurden. Es ist im ober Teil von Abbildung 7 dargestellt. Wenn fünf Pfeile nebeneinander präsentiert wurden, war der gesamte Reiz 3.6 cm breit, wobei die Pfeile gleichabständig waren. Zusätzlich wurde ein 0.8 cm auf 0.8 cm grosses Fixationskreuz eingesetzt. Der Feedbackton war ein 200 ms langer 1000 Hz Ton mit einer Lautstärke von 56 dB. Die Reize waren weiss auf schwarzem Hintergrund und wurde mit der Schrift Courier New, fett, mit Grösse 28 präsentiert.

Verfahren. Die Aufgabe setzte sich aus vier experimentellen Bedingungen zusammen. Die erste (F0) und die zweite (F1) Bedingung wurden in separaten Aufgabenblöcken vorgegeben. Die Durchgänge der dritten (F2*) und die vierten (F3*) Bedingung wurden in einem Aufgabenblock in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Um zu betonen, dass die beiden Bedingungen in einem Aufgabenblock präsentiert wurden, sind beide jeweils mit einem Stern

markiert.

Für die erste Bedingung (F0) war der Ablauf eines Durchgangs wie folgt: Der Bildschirm war zunächst jeweils für eine Sekunde schwarz. Dann erschien für 200 ms ein Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms. Darauf folgte nach einer variablen Vorperiode von 1000, 1333, 1666 oder 2000 ms in der Mitte des Bildschirms der imperative Reiz. Die Länge des Intervalls war entsprechend einer Zufallsfolge definiert, wobei jedes Intervall gleich häufig vorkam. Der Pfeil zeigte gleich häufig entweder nach rechts oder nach links, wobei die Pfeilrichtung zufällig variierte. Die Aufgabe der Vpn bestand darin, so schnell und genau wie möglich die richtige Taste zu drücken, sobald der imperative Reiz erschienen war, ohne dabei die Pfeilrichtung zu beachten. Die Vpn benutzten zum Antworten den Zeigefinger ihrer dominanten Hand. Wenn sie Linkshänder waren, benutzten sie die linke Hand für die schwarze Taste l und wenn die Rechtshänder waren die rechte Hand für die schwarze Taste r.

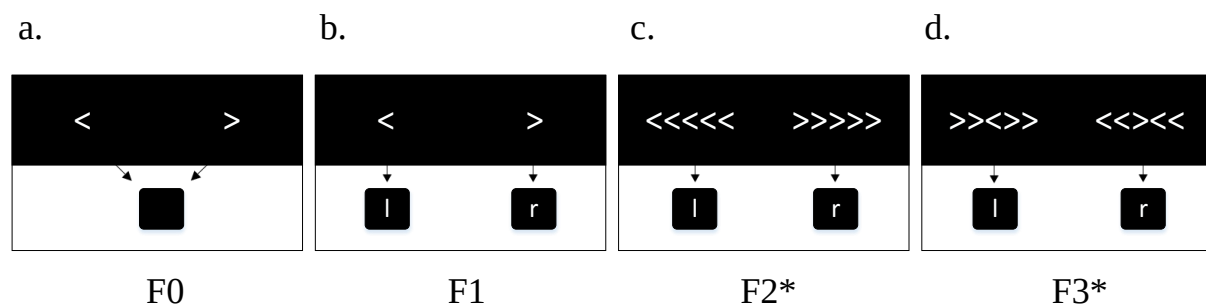


Abbildung 7. Darstellung der vier Flanker-Bedingungen. In der ersten Zeile sind jeweils die beiden möglichen Reize dargestellt, darunter die entsprechenden korrekten Antworten. (a) Eine Taste muss gedrückt werden sobald einer der Reize erscheint. (b) Die linke Taste muss gedrückt werden, wenn der Pfeil nach links zeigt, die rechte wenn er nach rechts zeigt. (c) (d) Die linke Taste muss gedrückt werden wenn der Pfeil in der Mitte nach links zeigt, die rechte wenn er nach rechts zeigt. Die mit * gekennzeichneten Bedingungen wurden zusammen in einem Aufgabenblock präsentiert.

Der imperative Reiz blieb auf dem Bildschirm, bis die Antworteingabe erfolgte. Wenn vor dem Erscheinen des imperativen Reizes geantwortet wurde, wurde das als Fehler registriert und der Feedbackton präsentiert. Nach dem Feedbackton oder nach der Antworteingabe wurde der Bildschirm für eine Sekunde schwarz und der nächste Durchgang startete.

Der Ablauf eines Durchgangs der zweiten Bedingung (F1) war vergleichbar mit der ersten

Bedingung. Allerdings änderte sich die Aufgabe der Vpn. Sie mussten mit der entsprechenden Taste angeben, in welche Richtung der imperative Reiz zeigte. Die verschiedenen Reize sind im oberen Teil von Abbildung 7 dargestellt und die entsprechenden korrekten Antworten im unteren Teil. Die Vpn drückten mit dem linken Zeigefinger die schwarze Taste l wenn der imperative Reiz nach links zeigte und die schwarze Taste r wenn er nach rechts zeigte. Wenn vor dem Erscheinen des imperativen Reizes geantwortet wurde oder die Antwort falsch war, wurde ein Feedbackton präsentiert.

Der Ablauf eines Durchgangs der dritten und vierten Bedingung war vergleichbar mit der zweiten Bedingung. Allerdings war der Pfeil beidseitig von jeweils zwei Pfeilen umgeben. Diese zeigte in der dritten Bedingung in dieselbe Richtung wie der Pfeil in der Mitte und in der vierten Bedingung in die entgegengesetzte Richtung. Die Vpn mussten mit dem linken Zeigefinger die schwarze Taste l drücken wenn der Pfeil in der Mitte nach links zeigte und die schwarze Taste r drücken, wenn er nach rechts zeigte.

Um zu verhindern, dass Unterschiede in der Aufgabe die Komplexität beeinflussen können, war sie für alle Vpn identisch. Sowohl die Darbietung der Reize als auch die Abfolge der Flanker-Bedingungen wurde über die Vpn konstant gehalten. Zuerst wurde die erste, dann die zweite und zum Schluss wurden die dritte und die vierte Bedingung zusammen in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Jede Bedingung bestand aus acht Übungsdurchgängen und 32 Durchgängen.

Die gesamte Aufgabe dauerte etwa 12 Minuten. Vor jeder Bedingung wurden am Bildschirm zunächst die Instruktionen präsentiert. Diese können Anhang A entnommen werden. Wenn die Vpn die Instruktionen verstanden hatten, konnten sie durch betätigen einer Taste der Antworttastatur Übungs- und Experimentalblöcke starten. Wenn sie noch Fragen hatten, konnten sie sich an den Versuchsleiter wenden. Damit die Voraussetzungen für alle Vpn identisch waren, mussten sie während allen Übungs- und Experimentalblöcken die Finger auf der/den entsprechenden Antworttaste/n platzieren.

Die abhängigen Variablen waren der Mittelwert der Reaktionszeiten der korrekt beantworteten Durchgänge sowie die Fehlerrate. Es gab zwei Arten von Fehlern, eine falsche Antwort und eine zu früh abgegebene Antwort. In die Fehlerrate gingen nur die falschen Antworten ein.

Um die Wahrscheinlichkeit für Ausreisser zu reduzieren und trotzdem zu gewährleisten, dass die mittlere individuelle Reaktionszeit auf möglichst vergleichbar vielen individuellen Antworten basiert, wurden die Reaktionszeiten auf den ersten und den langsamsten korrekt gelösten Durchgang ausgeschlossen. Zusätzlich wurde im Anschluss eine visuelle Ausreisserbetrachtung vorgenommen, um verbleibende extreme Werte ausschliessen zu können. Diese wird im Resultateteil genauer erörtert.

Swaps-Aufgabe. Die Aufgabe ist an die Swaps-Aufgabe von Stankov (2000) angelehnt.

Untersuchungsgeräte. Die Beschreibung der Untersuchungsgeräte entspricht derjenigen der Hick und der Flanker-Aufgabe. Allerdings erfolgte die Antworteingabe für die Swaps-Aufgabe mit einer Standard-Tastatur (Dell: CN-0DJ399-71616). Die Tastatur bestand nur aus den drei Buchstaben J, K und L sowie der Leertaste. Der Rest der Tastatur wurde mit einem Karton abgedeckt, wobei die Tasten darunter entfernt wurden.

Reizmaterial. Das Reizmaterial waren die jeweils 1.0 cm hohen und 0.8 cm breiten Buchstaben J, K und L, die gleichzeitig in zufälliger Reihenfolge in der Mitte des Bildschirms präsentiert wurden (für ein Beispiel siehe Abbildung 8). Die Distanz zwischen den Buchstaben betrug 1.9 cm. Zusätzlich wurden bis zu vier Anweisungen am oberen Bildschirmrand nebeneinander dargeboten. Sie bestanden jeweils zufällig aus zwei unterschiedlichen Ziffern zwischen eins und drei sowie einem *und* zwischen den Ziffern (z.B. 1 und 3). Die Höhe einer solchen Anweisung betrug jeweils 0.8 cm und die Breite 3.2 cm. Die Distanz zum oberen Bildschirmrand, die Distanz zwischen dem linken Bildschirmrand und der ersten Anweisung sowie die Distanz zwischen den einzelnen Anweisungen betrug jeweils 4.2 cm. Der Feedbackton war ein 200 ms langer 1000 Hz Ton mit einer Lautstärke von 56 dB. Die Reize wurden weiss auf schwarzem Hintergrund in der Schriftart Arial präsentiert. Die Schriftgrösse betrug 28 für den imperativen Reiz und 20 für die Anweisungen.

Verfahren. Die Aufgabe setzte sich aus fünf experimentellen Bedingungen zusammen, die in zwei Aufgabenblöcken präsentiert wurden. Die Durchgänge der ersten Bedingung wurden im ersten Aufgabenblock präsentiert. Die Durchgänge der zweiten, dritten, vierten und fünften Bedingung wurden im zweiten Aufgabenblock in randomisierter Reihenfolge dargeboten.

In einem Durchgang der ersten Bedingung erschienen zunächst die drei Buchstaben auf dem Bildschirm. Die Aufgabe bestand darin, die drei Buchstaben abzutippen. Dafür benutzten die Vpn den Zeigefinger ihrer dominanten Hand. Der imperative Reiz blieb solange auf dem Bildschirm, bis der dritte und letzte Buchstabe von den Vpn abgetippt wurde oder bis eine falsche Taste gedrückt wurde. Wenn die Vpn einen Fehler machten, wurde der Durchgang abgebrochen und es folgte ein 200 ms langer 1000 Hz Feedbackton über die Kopfhörer. Nach der Antworteingabe oder nach dem Feedbackton war der Bildschirm für eine Sekunde schwarz und der nächste Durchgang startete.

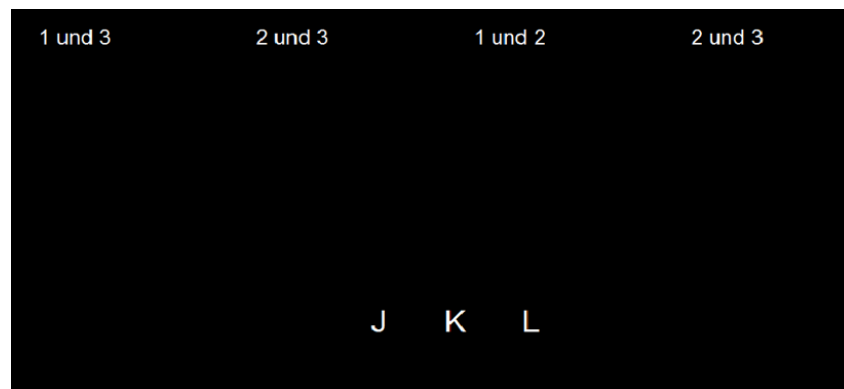


Abbildung 8. Beispielfhafte Darstellung des Reizmaterials der Swaps-Aufgabe der komplexesten Bedingung (S4). Unten in der Mitte die Buchstabenfolge und oben links die vier Anweisungen für die Positionen, die der Reihe nach ausgetauscht werden mussten.

Der Ablauf eines Durchgangs der zweiten bis fünften Bedingung war vergleichbar. Allerdings bestand die Aufgabe der Vpn darin, ein bis vier Mal die Positionen von jeweils zwei der drei Buchstaben entsprechend den Anweisungen am oberen Bildschirmrand (siehe Abbildung 8) mental auszutauschen. Diese Anweisungen mussten von links nach rechts eine nach der anderen durchgeführt werden. Ein solcher mentaler Positionsaustausch wird ein Swap genannt. In der zweiten Bedingung musste ein Swap durchgeführt werden, in der dritten mussten zwei, in der vierten drei und in der fünften vier Swaps durchgeführt werden. Bei mehr als einem Swap musste die Zwischenlösung jeweils im Kopf behalten werden und an dieser Zwischenlösung dann der nächste Swap durchgeführt werden. Das soll am Beispieldurchgang aus S4 in Abbildung 8 aufgezeigt werden. Wie am oberen Rand der Abbildung ersichtlich, mussten zu-

nächst Position 1 und Position 3 ausgetauscht werden. Aus JKL wurde also LKJ. Dann folgte der Austausch von Position 2 und 3. Aus LKJ wurde also LJK. Im Anschluss folgten noch Position 1 und 2 sowie Position 2 und 3. Aus LJK wurde also JLK und aus JLK dann zum Schluss JKL. Diese Abfolge war die Antwort und musste mittels Tastatur eingetippt werden.

Um zu verhindern, dass Unterschiede in der Aufgabe die Komplexität beeinflussen können, war die Aufgabe für alle Vpn identisch. Die beiden Aufgabenblöcke wurden jeweils mit steigender Komplexität vorgegeben. Die Reize der vier Bedingungen im zweiten Aufgabenblock wurden einer Zufallsfolge entsprechend präsentiert. Die Reihenfolge der drei Buchstaben sowie die Positionen, welche in S1 bis S4 ausgetauscht werden mussten, entsprachen ebenfalls einer Zufallsfolge. Jede Bedingung bestand aus 12 Durchgängen. Damit wurden im ersten Aufgabenblock 12 und im zweiten 48 Durchgänge aus vier Bedingungen in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Im ersten Aufgabenblock wurden davor vier Übungsdurchgänge dargeboten. Im zweiten Aufgabenblock wurden acht dargeboten, zuerst zwei von der zweiten, dann zwei von der dritten, zwei von der vierten und zwei von der fünften Bedingung.

Die gesamte Aufgabe dauerte etwa 17 Minuten. Vor jedem Aufgabenblock wurden am Bildschirm zunächst die Instruktionen präsentiert. Diese können Anhang A entnommen werden. Wenn die Vpn die Instruktionen verstanden hatten, konnten sie durch betätigen einer Taste der Tastatur Übungs- und Experimentalblöcke starten. Wenn sie noch Fragen hatten, konnten sie sich an den Versuchsleiter wenden.

Die abhängigen Variablen waren der Mittelwert der Reaktionszeit der korrekt beantworteten Durchgänge sowie die Fehlerrate. Die Reaktionszeit war dabei die Zeit zwischen dem Erscheinen des imperativen Reizes und dem Eintippen des dritten Buchstaben.

Ablauf

Die gesamte Testung dauerte etwa 70 Minuten und fand in einer Einzelsitzung in einem Laborraum der Universität Bern statt. Die Vpn unterschrieben zunächst die Einverständniserklärung und beantworteten Fragen bezüglich Alter, Geschlecht, Händigkeit und Bildung. Bezüglich der Händigkeit wurden sich gefragt, ob sie Links- oder Rechtshänder sind und bezüglich der Bildung ob sie eine Matura haben oder nicht. Alle Vpn führten dann den CFT 20-R durch.

Im Anschluss folgten die drei experimentellen Aufgaben in vollständig ausbalancierter Reihenfolge. Für jede Aufgabe wurde jeweils die entsprechende Tastatur vor den Vpn positioniert. Alle Instruktionen wurden am PC schriftlich präsentiert. In verschiedenen Arbeiten wurde gezeigt, dass ob in der Instruktionen ein stärkeres Gewicht auf die Geschwindigkeit oder die Genauigkeit der Antworten gelegt wurde, einen Einfluss auf die Korrelation zwischen der Leistung in der Aufgabe und der Intelligenz hatte (Jensen, 1982; Neubauer, Bauer & Höller, 1992). Deshalb wurden die Instruktionen diesbezüglich in der vorliegenden Arbeit über die untersuchten experimentellen Aufgaben (Hick, Flanker, Swaps) konstant gehalten. Die Instruktion lautete: "Antworten Sie so schnell wie möglich, versuchen Sie aber auch Fehler zu vermeiden. Wenn Sie einen Fehler machen ertönt ein Warnsignal."

Resultate

Stichprobengrösse

Um herauszufinden, ob eine Stichprobe von 200 Vpn gross genug ist, um die erwarteten Effekte zuverlässig entdecken zu können, wurde eine Poweranalyse durchgeführt. Dafür wurde ein einseitiger Test mit einem Alpha-Fehler von 5% eingesetzt. In der Metaanalyse von Sheppard und Vernon (2008) wurde der Zusammenhang zwischen der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und der Intelligenz auf einen Betrag von $r = .24$ geschätzt. Mit einer Stichprobe von 200 Vpn und einer erwarteten Korrelation von $r = .24$ beträgt die Power 96.4%. Es ist also sehr wahrscheinlich, dass ein Effekt dieser Grössenordnung mit dieser Stichprobengrösse entdeckt wird. Für Strukturgleichungsmodelle werden Stichproben von 200 Vpn empfohlen (Kline, 2010).

Reaktionszeiten und Fehlerraten

Alle Analysen der vorliegenden Arbeit wurden mit SPSS 22 oder R Version 3.2.0 durchgeführt. Für die Hick- und Flanker-Bedingungen waren grundsätzlich zwei Arten von Fehlern möglich, eine Antworteingabe vor dem Erscheinen des Stimulus (Fehler erster Art) oder eine falsche Antwort (Fehler zweiter Art). Für die Berechnung der Fehlerraten wurden nur die Fehler zweiter Art berücksichtigt, weil nur in diesen Trials auf den Stimulus reagiert wurde. Bei den Fehlern erster Art handelte es sich nicht um eine Reaktion auf einen Stimulus, sondern eine vorschnelle, impulsive Antwort. Solche Fehler waren nicht Fokus dieser Arbeit. Für die Berechnung der mittleren Reaktionszeit wurden die Trials beider Fehlerarten ausgeschlossen, weil sie beide zu nicht validen Reaktionszeiten führen (Lohman, 1989). Im Anhang B sind für die verschiedenen Bedingungen jeweils die über alle Vpn gemittelten Fehlerraten für beide Arten von Fehlern dargestellt.

In der Hick- und der Flanker-Aufgabe gab es für jede Bedingung und jede Vp jeweils 30 individuelle Reaktionszeiten. Aus den 6000 Reaktionszeiten (200 Vpn * 30 Trials) pro Bedingung wurden zunächst alle falsch beantworteten Trials ausgeschlossen. Im Anschluss wurde eine visuelle Ausreisserkontrolle durchgeführt. Im Anhang C ist diese pro Bedingung dargestellt. Die Grenzwerte für den Ausschluss bestimmter Reaktionszeiten wurden auf Basis dieser

Visualisierung so gewählt, dass nur auffällig hohe und auffällig niedrige Werte betroffen waren. Die untere Grenze lag für alle Bedingungen bei 100 ms, die obere für alle Bedingungen ausser der komplexesten Flanker-Bedingung bei 1100 ms. Für die komplexeste Flanker-Bedingung musste eine höhere Grenze gewählt werden, weil es die komplexeste Flanker-Bedingung war und mit einer Grenze von 1100 wahrscheinlich nicht nur Ausreisser, sondern auch valide Reaktionszeiten ausgeschlossen worden wären. Dafür sprach die relativ hohe Anzahl von Werten über 1100 ms. Die obere Grenze lag deshalb in dieser Bedingung entsprechend der visuellen Betrachtung bei 2000 ms. Der Anteil der Ausreisser an allen Antworten der 200 Vpn ist in Anhang D dargestellt. Diese überschritt für keine der Bedingungen ein halbes Prozent.

Weil es sich bei der Swaps-Aufgabe nicht um eine traditionelle Mental-Speed-Aufgabe sondern um eine komplexe AG-Aufgabe handelte, wurde keine Ausreisserkontrolle vorgenommen. In solchen Aufgaben kann nämlich z.B. eine besonders lange Reaktionszeit bedeuten, dass sich die Vp besonders viel Mühe gegeben hat und deswegen lange überlegt hat.

Für die Berechnung von Pearson-Korrelationen sollte bivariate Normalverteilung vorliegen. Weil diese Voraussetzung schwierig zu prüfen ist, wird oft getestet, ob die beteiligten Variablen annähernd normalverteilt sind. Die Normalverteilung ist auch eine Voraussetzung für andere parametrische Tests wie *t*-Tests für gepaarte Stichproben und einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung.

Alle Reaktionszeiten und Fehlerraten der Hick-, Flanker- und Swaps-Bedingungen wichen entsprechend dem Saphiro-Wilk-Test signifikant von der Normalverteilung ab ($W < .98$, $p < .05$). Nur der Rohwert des CFT 20-R wich mit $W = .98$, $p = .05$ knapp nicht von der Normalverteilung ab. Allerdings wird dieser Test bei grossen Stichproben schon bei kleinen Abweichungen signifikant. Deshalb schlägt Kline (2010) für die Verteilung von annähernd normalverteilten Daten einen Wertebereich von -3 bis +3 für die Schiefe und von -10 bis +10 für die Kurtosis vor. In Tabelle 1 sind für die Verteilungen aller untersuchten Variablen Schiefe und Kurtosis dargestellt. Die meisten Werte befinden sich im akzeptablen Bereich. Um sicher zu gehen, dass die eingesetzten Korrelationen, *t*-Tests und einfaktoriellen Varianzanalysen der vorliegenden Arbeit von der Abweichung der Normalverteilung nicht beeinflusst wurden, wurden die Analysen jeweils auch nicht-parametrisch gerechnet. Angaben dazu sind bei den jeweiligen

Analysen zu finden. χ^2 und Standardfehler der Strukturgleichungsmodelle wurden jeweils mittels Satorra-Bentler-Korrektur für den Einfluss der Nicht-Normalverteilung korrigiert (Satorra & Bentler, 1988).

In Tabelle 1 sind Mittelwert (*M*), Standardabweichung (*SD*), Minimum (*Min*), Maximum (*Max*), Schiefe, Kurtosis und interne Konsistenz (Cronbach's Alpha) für alle Reaktionszeiten und Fehlerraten dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind der Rohwert des CFT 20-R (Summe aller korrekt beantworteten Trials) sowie der Intelligenzquotient (IQ).

Tabelle 1
Beschreibende Statistik aller Leistungsvariablen

Aufgabe			<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	Schiefe	Kurtosis	α
IQ	CFT 20-R		109.50	14.40	70	145	0.13	-0.29	
	CFT 20-R		42.64	5.35	25	54	-0.31	-0.22	.76
RZ	Hick	0	265	51	208	562	3.28	14.30	.99
		1	322	49	238	622	2.18	8.99	.99
		2	403	71	224	712	1.34	3.20	.99
	Flanker	0	308	69	198	616	1.57	3.77	.96
		1	381	57	281	711	2.50	10.39	.96
		2	456	67	333	705	0.98	1.41	.97
		3	574	108	398	1068	1.69	4.53	.99
	Swaps	0	1871	390	948	3484	1.29	2.55	.97
		1	4434	1116	2500	11266	1.84	7.27	.96
		2	10431	3593	4064	31131	1.97	6.78	.92
		3	17878	6179	2357	45224	1.23	2.86	.96
		4	22782	7988	1256	56227	1.16	3.36	.98
Fehler	Hick	0	-	-	-	-	-	-	-
		1	.01	.01	.00	.07	2.17	3.92	.02
		2	.02	.03	.00	.13	1.49	2.37	.09
	Flanker	0	-	-	-	-	-	-	-
		1	.03	.04	.00	.30	2.35	9.72	.46
		2	.01	.01	.00	.10	4.44	26.12	.16
		3	.05	.06	.00	.30	1.98	4.61	.64
	Swaps	0	.08	.09	.00	.42	1.34	-0.29	.22
		1	.09	.10	.00	.83	2.52	-0.22	.37
		2	.19	.17	.00	.83	1.39	3.77	.63
		3	.26	.21	.00	.91	1.05	10.39	.61
		4	.27	.23	.00	.92	1.13	1.41	.74

Anmerkungen. *N* = 200, α = Cronbach's Alpha. IQ = Intelligenzquotient, RZ = Reaktionszeit. Alle Reaktionszeiten sind in ms angegeben, alle Fehler in Fehlerraten.

Für die interne Konsistenz der Reaktionszeiten wurden zunächst Ausreisser und Fehler ausgeschlossen. Dann wurde Cronbach's Alpha mit paarweisem Fallausschluss berechnet. Die interne Konsistenz der Reaktionszeit-Masse fiel für alle Bedingungen sehr hoch aus (Cronbach's Alpha zwischen .90 und .99). Für die Fehlerraten reichte sie von einem Cronbach's Alpha von .02 bis zu einem Cronbach's Alpha von .74. Gerade bei Bedingungen mit einer mittleren Fehlerrate von unter .03 fiel sie sehr gering aus (Cronbach's Alpha zwischen .02 und .16). Die höchste interne Konsistenz wiesen die komplexeste Flanker-Bedingung und die drei komplexesten Swaps-Bedingungen auf (Cronbach's Alpha zwischen .61 und .74). Für die Intelligenz betrug Cronbachs $\alpha = .76$ wenn alle Items einzeln in die Analyse eingingen und Cronbach's Alpha = .70 wenn die Analyse auf den vier Skalensummenwerten basierte.

Der IQ lag mit $M = 109.5$ über dem normierten Durchschnitt von 100 und mit $SD = 14.4$ leicht unter der normierten SD von 15. Mit einem Minimum von 70 und einem Maximum von 145 wurde in der vorliegenden Arbeit ein relativ breiter Intelligenzbereich untersucht.

Kontrollvariablen

Zuerst wurde mittels t -Test für unabhängige Stichproben untersucht, ob es Geschlechtsunterschiede in den 12 Reaktionszeiten und 10 Fehlerraten (ohne die erste Hick- und Flanker-Bedingung, da es hier keine falschen Antworten gab) der verschiedenen Bedingungen sowie im g_{CFT} -Faktor gab. Details zu diesem g_{CFT} -Faktor folgen bei der Betrachtung des Verlaufes der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität. Das Alpha-Niveau wurde jeweils für multiples Testen (Anzahl: 23 Vergleiche) mittels einer Bonferroni-Korrektur angepasst ($p = .002$). Wegen ungleicher Stichprobengröße und teilweise nicht vorhandener Varianzhomogenität wurden Welchs t -Tests berechnet. Zusätzlich wurden nicht-parametrische Wilcoxon-Tests durchgeführt. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Männern und Frauen (siehe Anhang E).

Im Anschluss wurde untersucht, ob dieselben 23 Variablen mit dem Alter korreliert waren. Erneut wurde das Alpha-Niveau für multiples Testen mittels Bonferroni-Korrektur angepasst ($p = .002$). Die Pearson-Korrelationen mit dem Alter fielen für keine der Variablen signifikant aus. Um zu untersuchen, ob die Verletzung der Normalverteilung einen Einfluss auf die Resul-

tate hatte, wurden nicht-parametrische Spearman-Korrelationen berechnet. Hier ergab sich eine signifikante Korrelation zwischen der Fehlerrate der dritten Hick-Bedingung und dem Alter $r = -.24$, $p < .001$. Ältere Personen machten also weniger Fehler. Alle anderen Korrelationen mit dem Alter waren mit $.15 > r > -.15$ und $p > .05$ nicht signifikant. Für die Fehlerrate der dritten Hick-Bedingung fiel also die Korrelation unterschiedlich aus abhängig davon, ob parametrisch oder nicht-parametrisch gerechnet wurde. Deshalb werden in diesem Fall nur die nicht-parametrischen Resultate interpretiert. Allerdings gilt zu beachten, dass der Unterschied zwischen den beiden Analysen nicht hoch ausfiel. Die Pearson-Korrelation zwischen der Fehlerrate der dritten Hick-Bedingung und der Intelligenz betrug $r = -.20$ ($p = .004$) und die Spearman-Korrelation $r = -.24$ ($p = .0007$).

Operationalisierung der Aufgabenkomplexität

Es wurde zunächst untersucht, ob die mittlere Reaktionszeit für alle Bedingungen ein valides Mass zur Operationalisierung der Komplexität darstellt. Der Grund dafür war, dass in komplexeren Aufgaben typischerweise die Fehlerrate mit der Intelligenz korreliert war (Dodonova & Dodonov, 2013; Schweizer, 1996). Damit stellte sich die Frage, ob die mittlere Reaktionszeit auch bei komplexen Aufgaben ein valides Mass zur Operationalisierung der Komplexität darstellt, oder ob die Fehlerrate dafür besser geeignet ist. Aus diesem Grund wurde die Korrelation zwischen der mittleren Reaktionszeit und der mittleren Fehlerrate über die verschiedenen Bedingungen berechnet. Aus der Analyse ausgeschlossen wurden jeweils die erste Hick- und Flanker-Bedingung, weil in diesen beiden Bedingungen keine Fehler vorkamen. Die Korrelation war mit $r = .97$, $p < .001$ fast eins und entsprach damit den Analysen von Elliott und Murray (1977). Je länger die Vpn zur Ausführung einer Bedingung im Durchschnitt benötigten, desto mehr Fehler machten sie im Durchschnitt in dieser Bedingung. Weil die mittleren Fehlerraten und die mittleren Reaktionszeiten über die Bedingungen so stark miteinander korrelierten, wurde in der vorliegenden Arbeit die Aufgabenkomplexität von allen Bedingungen über die mittlere Reaktionszeit operationalisiert, weil Reaktionszeiten vorteilhafte Eigenschaften aufweisen (Jensen, 2006) und auf diese Weise auch die Komplexität ganz basaler Aufgaben bestimmt werden kann, bei denen keine Fehler vorkommen. Im Folgenden wurde die Aufga-

benkomplexität also über die mittlere Reaktionszeit operationalisiert unabhängig davon, welche Bedingung betrachtet wurde und unabhängig davon, ob Fehlerraten oder Reaktionszeiten untersucht wurden.

Weiter wurde pro Aufgabe ermittelt, ob die Komplexitätsmanipulation immer in einem signifikanten Anstieg der Aufgabenkomplexität resultierte. Dafür wurde pro Aufgabe jeweils eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Die unabhängige Variable waren die unterschiedlich komplexen Bedingungen pro Aufgabe und die abhängige Variable die Reaktionszeiten. Die unabhängige Variable hatte für die Hick-Bedingungen drei Stufen, für die Flanker-Bedingungen vier Stufen und für die Swaps-Bedingung fünf Stufen. Von Sphärizität konnte entsprechend dem Test von Mauchly in keiner der drei Aufgaben ausgegangen werden (Hick: $\chi^2(2) = 68, p < .001$; Flanker: $\chi^2(5) = 183, p < .001$; Swaps: $\chi^2(9) = 809, p < .001$). Darum wurden die Freiheitsgrade entsprechend der Greenhouse-Geisser-Schätzung korrigiert (Hick: $\varepsilon = 0.78$; Flanker: $\varepsilon = 0.62$; Swaps: $\varepsilon = 0.43$). Die Ergebnisse zeigen, dass die Manipulation der Komplexität in allen drei Aufgaben zu einem signifikanten Anstieg der Reaktionszeit geführt hat (Hick: $F(1.55, 309) = 953.11, p < .001, \eta_p^2 = .83$; Flanker: $F(1.86, 370) = 1006.54, p < .001, \eta_p^2 = .84$; Swaps: $F(1.73, 344) = 1042.62, p < .001, \eta_p^2 = .84$). Mit $t(199) > 13$, und $p < .001$ waren auch alle paarweisen Vergleiche mittels nach Bonferroni korrigierten t -Tests für abhängige Stichproben signifikant. Die systematische Komplexitätsmanipulation resultierte also in allen Aufgaben in einem signifikanten Anstieg der mittleren Reaktionszeit von Bedingung zu Bedingung und damit in der darüber operationalisierten Aufgabenkomplexität.

Um zu untersuchen, ob die Abweichung von der Normalverteilung einen Einfluss auf die Resultate hatte, wurden zusätzlich nicht-parametrische Analysen durchgeführt. Anstelle der Varianzanalysen mit Messwiederholung wurden Friedman-Tests gerechnet und anstelle der paarweisen Vergleiche mittels t -Tests für abhängige Stichproben Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests. Die Resultate blieben unverändert und alle paarweisen Vergleiche waren ebenfalls mit $p < .001$ signifikant.

Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob der Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit wachsender Aufgabenkomplexität zunächst kontinuierlich zunimmt und danach wieder kontinuierlich zurückgeht. Dafür wurden die Reaktionszeiten jeweils von null subtrahiert und damit invertiert. Auf diese Weise geht eine bessere Leistung mit einem höheren Wert einher. Damit werden positive Korrelationen zwischen der Reaktionszeit und der Intelligenz erwartet, was die Interpretation erleichtert. Zur Operationalisierung der Intelligenz wurde aus den vier Skalensummenwerten des CFT 20-R mittels konfirmatorischer Faktorenanalyse der g_{CFT} -Faktor extrahiert. Alle Strukturgleichungsmodelle der vorliegenden Arbeit wurde mit dem R-Paket lavaan (Rosseel, 2012) durchgeführt.

Wenn das spezifizierte Strukturgleichungsmodell gut zu den Daten passt, unterscheiden sich die empirischen Daten und das spezifizierte Modell entsprechend dem Satorra-Bentler korrigierten χ^2 nicht signifikant voneinander. Allerdings wird das χ^2 bei grossen Stichproben schon bei geringen Abweichungen signifikant, weshalb weitere Fitindikatoren verwendet wurden. Der CFI sollte möglichst nahe bei 1 sein, wobei Modelle ab .95 als gut angesehen werden (Hu & Bentler, 1999). Der RMSEA und der SRMR sollten möglichst nahe bei 0 sein, wobei für den RMSEA Werte unter .06 und für den SRMR Werte unter .08 (Hu & Bentler, 1999) als gut erachtet werden. Der AIC ist nur sinnvoll, wenn verschiedene Modelle verglichen werden, wobei das bessere Modell jenes mit dem niedrigeren Wert ist. Für eine Einführung in Strukturgleichungsmodelle siehe Raykov und Marcoulides (2000). Das einfaktorielle Messmodell extrahiert aus den Skalensummenwerten des CFT 20-R passte mit $SB\chi^2(2) = 0.31$, $p = .86$, $CFI = 1$, $RMSEA = 0$, $SRMR = .01$, $AIC = 3148.87$ sehr gut zu den Daten. Es ist in Abbildung 9 dargestellt.

Die rechteckigen Kasten stellen die manifesten Variablen, die Kreise die latenten Variablen dar. Alle frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .001$ signifikant. Es sind jeweils die standardisierten Ladungen angegeben. Mit einem kleinen Pfeil an den manifesten Variablen ist die nicht aufgeklärte Varianz angegeben. Die folgenden Strukturgleichungsmodelle dieser Arbeit sind auf dieselbe Weise dargestellt. Im Folgenden bezieht sich die Intelligenz, wenn nicht anders angegeben, immer auf diesen extrahierten g_{CFT} -Faktor.

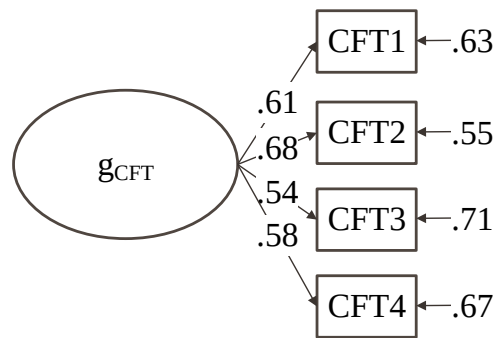


Abbildung 9. Messmodell des CFT 20-R. Aus den vier Skalensummenwerten des CFT 20-R wurde ein g_{CFT} -Faktor extrahiert. $N = 200$.

Eine Visualisierung der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität findet sich in Abbildung 10.

Auf der x-Achse ist die Komplexität abgetragen, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit die mittlere Reaktionszeit logarithmiert wurde. Der natürliche Logarithmus von 1000 ms beträgt 6.91. Weil Jensen (2006) davon ausging, dass die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation bei etwa einer Komplexität von 1000 ms, also einer Sekunde, am stärksten ausfällt, ist diese Grenze in Abbildung 10 durch eine senkrechte, gestrichelte Linie markiert. Wie vorhergesagt zeigte sich mit steigender Komplexität zunächst ein Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation und danach wieder eine Abnahme. Allerdings hing dieser Verlauf auch von der untersuchten Aufgabe ab. Die Flanker-Bedingungen korrelierten z.B. trotz teilweise vergleichbarer Aufgabenkomplexität stärker mit der Intelligenz als die Hick-Bedingungen. Aus diesem Grund werden die drei Aufgaben einzeln weiter analysiert. Für die drei Hick-Bedingungen verlief die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität linear ansteigend. Für die Flanker-Bedingungen verlief sie bis zur dritten Bedingung auch ansteigend, nahm danach aber wieder ab. Für die Swaps-Bedingungen nahm der Zusammenhang mit steigender Komplexität bis zur zweiten Bedingung zu, danach aber kontinuierlich ab.

Weil sowohl die Reaktionszeit als auch die Intelligenz so codiert waren, dass ein höherer Wert mit einer besseren Leistung einhergeht, bedeutet diese Korrelation, dass intelligentere Vpn in den Bedingungen schneller reagierten als weniger intelligente Vpn.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob mit dem Rückgang der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit wachsender Aufgabenkomplexität eine Zunahme der Fehlerrate ein-

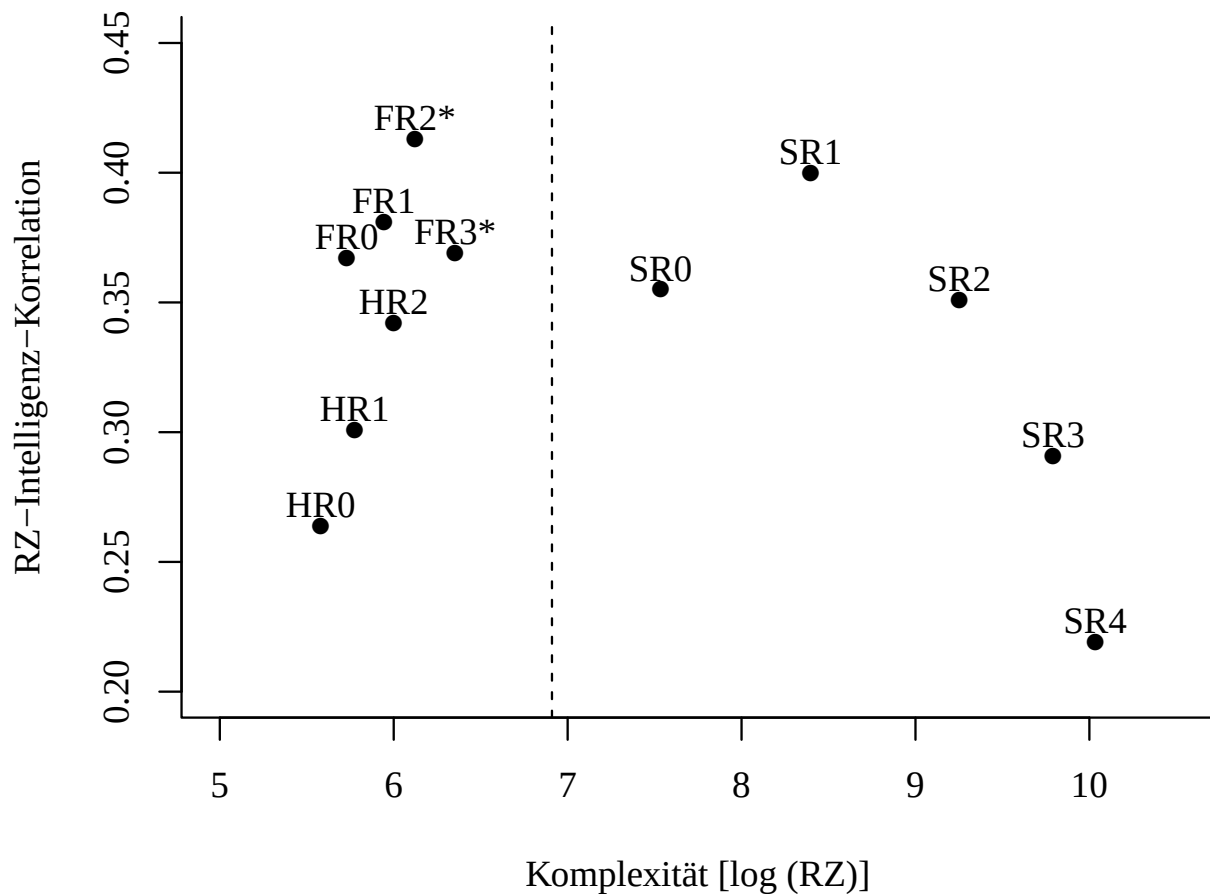


Abbildung 10. Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität. Auf der x-Achse ist die Komplexität (Logarithmus der mittleren Reaktionszeit) abgetragen und auf der y-Achse die Korrelation mit dem g_{CFT} -Faktor. Die Reaktionszeiten wurden invertiert, damit höhere Werte mit einer besseren Leistung einhergingen. Die gestrichelte senkrechte Linie zeigt eine Komplexität von einer Sekunde an. RZ = Reaktionszeit, HR = RZ der Hick-Bedingungen, FR = RZ der Flanker-Bedingungen, SR = RZ der Swaps-Bedingungen, wobei diese entsprechend der Komplexität aufsteigend nummeriert sind. Die dargestellten Korrelationen waren mit $p < .01$ signifikant. * = in einem Aufgabenblock präsentierte Bedingungen, $N = 200$.

herging. Diese Analysen betrafen nur die Flanker- und die Swaps-Aufgabe, weil nur in diesen Aufgaben ein Rückgang der Korrelation vorkam.

In der Flanker-Aufgabe ging die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von der dritten zur vierten Bedingung (F2* nach F3*) mit einem signifikanten Anstieg der Fehlerraten einher ($t(199) = 10.56, p < .001$). Die entsprechenden Deskriptivstatistiken können Tabelle 1 entnommen werden.

Für die Swaps-Aufgabe ging die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von der zweiten zur dritten Bedingung (S1 nach S2) ($t(199) = 7.82, p < .001$) sowie von der dritten

zur vierten Bedingung (S2 nach S3) ($t(199) = 6.52, p < .001$) mit einem signifikanten Anstieg der Fehlerrate einher. Einzig von der vierten zur fünften Bedingung (S3 nach S4) stieg die Fehlerrate nicht mehr weiter an ($t(199) = 0.62, p = .53$). Die entsprechenden Deskriptivstatistiken können ebenfalls Tabelle 1 entnommen werden.

Mit einer Ausnahme ging also der Rückgang der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit wachsender Aufgabenkomplexität jeweils mit einer Zunahme der Fehlerrate einher.

Im Anschluss wurde untersucht, ob mit dem Rückgang der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit wachsender Aufgabenkomplexität eine Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einherging. Die Fehlerrate wurden jeweils von null subtrahiert und damit so umcodiert, dass höhere Werte einer besseren Leistung entsprachen. Es wurden erneut nur die Flanker- und die Swaps-Aufgabe betrachtet. Für die Flanker-Aufgabe ergab sich mit der Abnahme der RZ-Intelligenz-Korrelation zwischen der dritten und vierten Bedingung keine Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation, da die vierte Bedingung nicht signifikant mit der Intelligenz assoziiert war ($r = -.02, p = .79$).

Für die Swaps-Aufgabe ging die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von der zweiten zur fünften Bedingung teilweise mit einer höheren Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Die zweite Bedingung (S1) korrelierte zu $r = .19, p < .01$, die dritte (S2) zu $r = .18, p < .05$, die vierte (S3) zu $r = .25, p < .01$ und die fünfte (S4) zu $r = .26, p < .01$ mit der Intelligenz.

Die Fehlerraten der zweiten und dritten Bedingung (S1, S2) korrelierten also vergleichbar stark und signifikant mit der Intelligenz. Die Fehlerraten der beiden komplexesten Bedingungen (S3 und S4) korrelierten etwas stärker und ebenfalls vergleichbar stark mit der Intelligenz. Weil alle Variablen so codiert waren, dass höhere Werte einer besseren Leistung entsprechen, bedeuten die positiven Korrelationen, dass bei intelligenteren Vpn weniger Fehler vorkamen als bei weniger intelligenten Vpn. Insgesamt betrachtet (Abbildung 11) ging die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation tendenziell mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher.

In der zweiten Swaps-Bedingung (S1) korrelierte die Fehlerrate weniger stark mit der Intelligenz als die Reaktionszeit. Diese Differenz wurde immer kleiner bis in der komplexesten

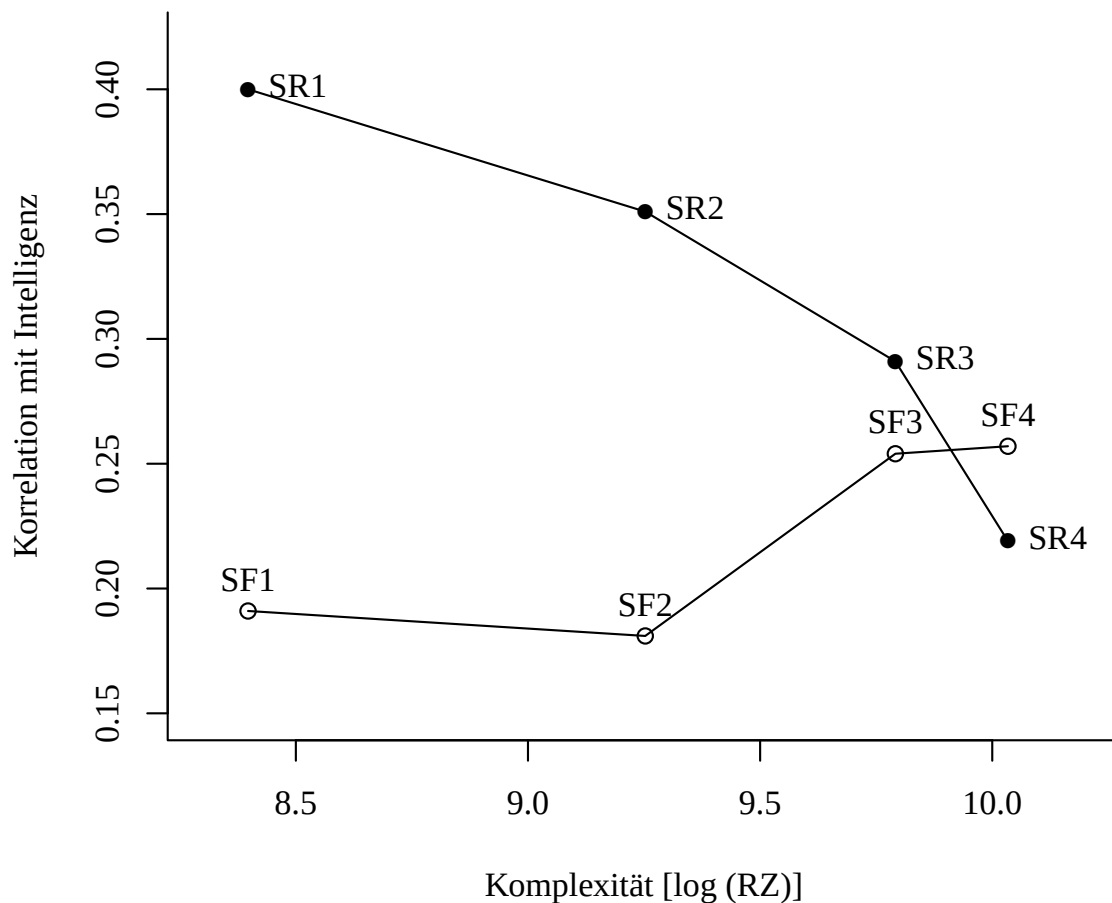


Abbildung 11. Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität in der Swaps-Aufgabe. Auf der x-Achse ist die Komplexität (Logarithmus der mittleren Reaktionszeit) abgetragen und auf der y-Achse der die Korrelation mit dem g_{CFT} -Faktor. Die Reaktionszeiten und Fehlerraten wurden invertiert, damit höhere Werte mit einer besseren Leistung einhergingen. RZ = Reaktionszeit, SR = Swaps RZ, SF = Swaps Fehlerraten. Die dargestellten Korrelation sind mit $p < .05$ signifikant. $N = 200$.

Swaps-Bedingung (S4) die Fehlerrate leicht stärker mit der Intelligenz korreliert war. Interessant ist, dass auch schon in der zweiten Swaps-Bedingung, in der Bedingung in welcher die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation maximal war, eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation auftrat.

Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation ging also in der Flanker-Aufgabe nicht und in der Swaps-Aufgabe teilweise mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Der Vollständigkeit halber sind in Anhang F in der ersten Spalte die Reaktionszeit-Intelligenz- sowie die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen aller untersuchter Bedingungen inklusive entsprechender p -Werte dargestellt.

Um sicher zu gehen, dass die RZ-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen

durch die Abweichung von der Normalverteilung nicht beeinflusst wurden, wurden diese Korrelationen zusätzlich auch nicht-parametrisch mit dem Rangkorrelationskoeffizienten von Spearman berechnet. Im Anhang G sind die Reaktionszeit-Intelligenz- sowie die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen dargestellt. Der Betrag der Abweichung zwischen den beiden Korrelationskoeffizienten war für alle 22 Leistungsmasse nicht gross ($M = .03$, $Max = .1$). Weil die Korrelationen durch die Abweichung von der Normalität nicht stark beeinflusst wurden und parametrische Verfahren einerseits mehr Power aufweisen, und andererseits Schlüsse über lineare Zusammenhänge zulassen, werden die Reaktionszeit-Intelligenz- sowie die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen in der vorliegenden Arbeit parametrisch gerechnet.

Stichprobenabhängigkeit. In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität erreicht war als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Dafür wurde die Stichprobe entsprechend den Faktorwerten auf dem g_{CFT} -Faktor in drei Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe bestehend aus den 80 Vpn mit der höchsten Intelligenz, eine Gruppe bestehend aus den 80 Vpn mit der niedrigsten Intelligenz und eine Gruppe mit den verbleibenden 40 Vpn. In den folgenden Analysen wurden nur die 80 Vpn mit der höchsten und die 80 Vpn mit der niedrigsten Intelligenz verglichen. In Tabelle 2 sind jeweils M und SD der Intelligenz, der Reaktionszeiten und der Fehlerraten aller Bedingungen getrennt für beide Stichproben dargestellt. In dieser Tabelle wurde zusätzlich jeweils mittels t -Test für unabhängige Stichproben getestet, ob es einen signifikanten Stichprobenunterschied in den untersuchten Variablen gab.

Die Stichprobe mit der höheren Intelligenz brauchte für alle Bedingungen signifikant weniger Zeit als die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Zusätzlich kamen in dieser Stichprobe in den beiden komplexesten Swaps-Bedingungen signifikant weniger Fehler vor. In den anderen Fehlerraten ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Der mittlere IQ der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz lag mit 95.5 im durchschnittlichen Bereich (Mackintosh, 2011). Der IQ der Stichprobe mit der höheren Intelligenz lag hingegen mit 123.6 im überdurchschnittlichen Bereich (Mackintosh, 2011).

Um zu untersuchen, ob das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der

Tabelle 2

Vergleich der 80 Personen mit niedrigerer Intelligenz (Intelligenz-) und höherer Intelligenz (Intelligenz+)

		Intelligenz -			Intelligenz +					
		<i>M</i>	<i>SD</i>		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	
CFT 20-R	IQ		95.50	7.10		123.60	8.30	-23.05	***	-3.64
	Rohwert		37.34	3.28		47.78	2.10	-.22.93‘	***	-3.79
RZ	Hick	0	277	60		255	34	2.79	**	0.45
		1	337	60		309	38	3.50	**	0.56
		2	428	79		386	57	3.89	***	0.61
	Flanker	0	331	79		286	55	4.23‘	***	0.66
		1	400	70		364	38	4.06‘	***	0.64
		2	481	70		433	53	4.88	***	0.77
	Swaps	3	612	127		545	86	3.93	***	0.62
		0	2019	460		1727	291	4.80‘	***	0.76
		1	4795	1292		4072	910	4.09‘	***	0.65
		2	11982	4430		9134	2259	5.12‘	***	0.81
		3	19754	7383		16250	4799	3.56‘	**	0.56
		4	24606	9965		21157	6062	2.64‘	**	0.42
Fehlerrate	Hick	0	-	-		-	-	-	-	-
		1	.01	.01		.01	.01	0.20	.85	0.00
		2	.02	.03		.02	.03	-0.78	.44	0.00
	Flanker	0	-	-		-	-	-	-	-
		1	.03	.05		.03	.03	0.44	.66	0.00
		2	.01	.01		.01	.01	0.92	.35	0.20
	Swaps	3	.04	.06		.04	.06	-0.17	.87	0.00
		0	.08	.09		.07	.08	1.09	.28	0.12
		1	.11	.12		.08	.08	1.51	.13	0.29
		2	.21	.19		.07	.15	1.65	.10	0.23
		3	.32	.22		.22	.18	3.31	**	0.50
		4	.32	.24		.23	.21	2.35	*	0.40

Anmerkungen. *df* = 158, *t*-Werte von Bedingungen ohne Varianzhomogenität (Levene's-Test) sind mit [‘] markiert. Für diese Bedingungen wurden die *df* mit der Welch-Satterthwaite-Methode entsprechend korrigiert. RZ = Reaktionszeit [ms], *d* = Cohen's *d*. * *p* < .05. ** *p* < .01. *** *p* < .001.

Stichprobe mit der höheren Intelligenz bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität erreicht war als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz, wurde der Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität in beiden Stichproben getrennt betrachtet. Die Resultate sind in Abbildung 12 dargestellt.

Im oberen Teil der Abbildung sind die Korrelationen für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz dargestellt und im unteren für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Die Aufgabenkomplexität wurde pro Stichprobe über die mittlere Reaktionszeit operationalisiert. Die mittleren Reaktionszeiten der einzelnen Bedingungen, getrennt für die beiden Stichproben

können Tabelle 2 entnommen werden. Die Komplexität wurde erneut zur besseren Veranschaulichung logarithmiert.

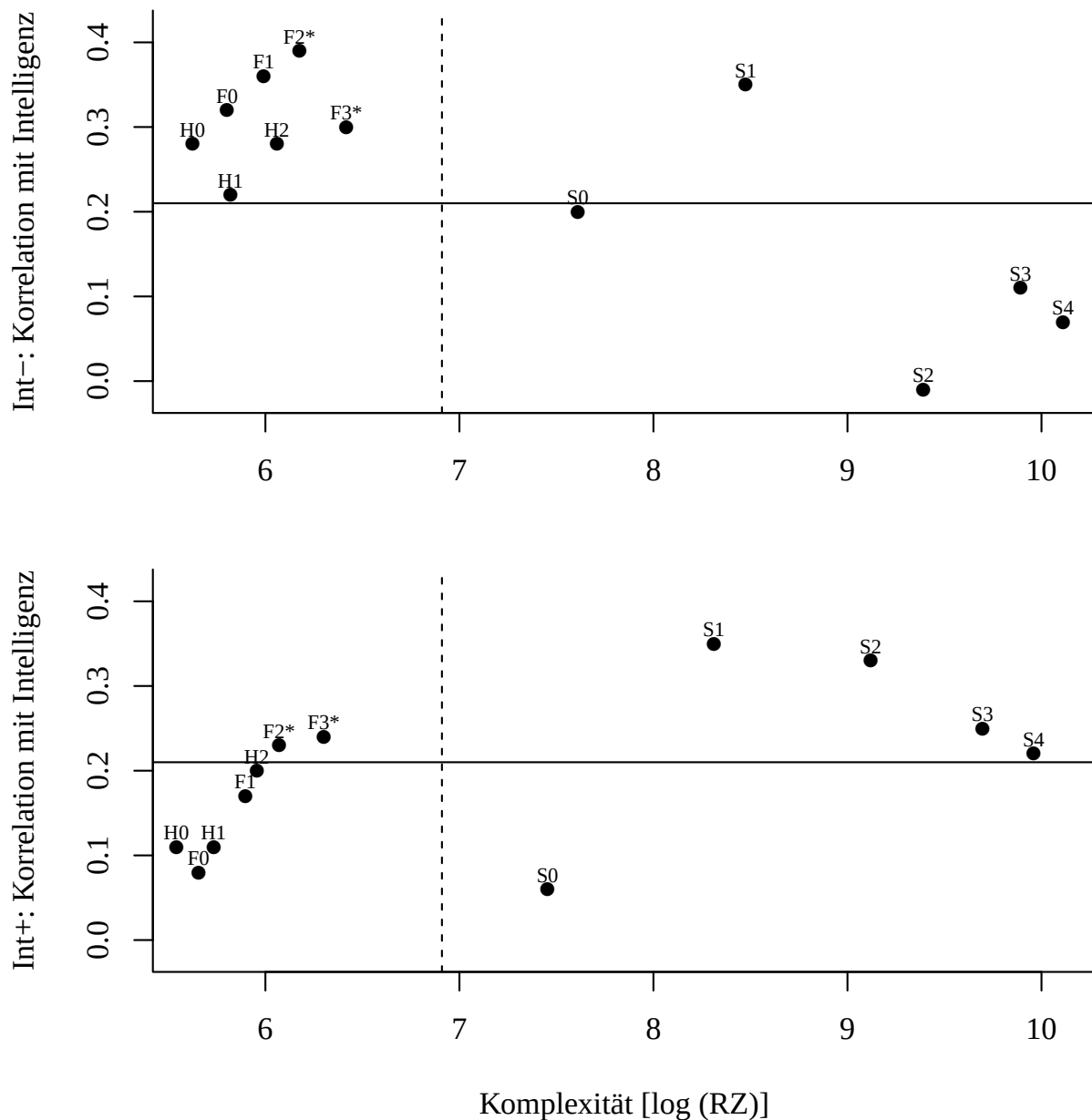


Abbildung 12. Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen abhängig von der stichprobenspezifischen Aufgabenkomplexität getrennt für die Stichprobe mit der niedrigeren (Int-) und die Stichprobe mit der höheren Intelligenz (Int+). Die Hick (H)-, Flanker (F)- und Swaps (S)-Bedingungen sind entsprechend der Komplexität aufsteigend nummeriert. [log (RZ)] = natürlicher Logarithmus der mittleren Reaktionszeit. Koeffizienten oberhalb der schwarzen horizontalen Linie waren mit $p < .05$ signifikant. Die senkrechte gestrichelte Linie entspricht einer Aufgabenkomplexität von 1s. $N = 80$. * = in einem Aufgabenblock präsentierte Bedingungen.

Die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation war bei der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz bei der dritten Flanker-Bedingung (F2*) und damit einer logarithmierten stichprobenabhängigen Aufgabenkomplexität von 6.18 maximal. Das entspricht einer Aufgabenkomplexität von 481 ms. Bei der Stichprobe mit der höheren Intelligenz war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation bei der zweiten Swaps-Bedingung (S1) und einer logarithmierten stichprobenabhängigen Aufgabenkomplexität von 8.31 maximal. Das entspricht einer Aufgabenkomplexität von 4072 ms.

Das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation war also nicht wie erwartet in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität erreicht als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Im Gegenteil war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität maximal (481 ms) als in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz (4072 ms).

Zusätzlich wurde untersucht, ob sich die Korrelationen zwischen der Reaktionszeit und der Intelligenz in den verschiedenen komplexen Bedingungen jeweils in den beiden Stichproben statistisch voneinander unterschieden. Ein signifikanter Unterschied wurde nur in der dritten Swaps-Bedingung gefunden ($z = -2.15, p < .05$), wobei diese in der intelligenteren Stichprobe stärker mit der Intelligenz korrelierte als in der weniger intelligenten Stichprobe. Die entsprechenden Analysen können Anhang F entnommen werden.

Insgesamt fiel auf, dass bei der weniger intelligenten Stichprobe primär die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen mit der Intelligenz assoziiert waren (Hick- und Flanker-Bedingungen sowie die zweite Swaps-Bedingung) waren. Bei der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen waren nur die Aufgaben mit der Intelligenz korreliert, welche komplexere Konstrukte wie Inhibition und AG erfassen (die beiden komplexesten Bedingungen der Flanker- sowie die vier komplexesten Bedingungen der Swaps-Aufgabe.). In beiden Stichproben signifikant mit Intelligenz assoziiert waren nur die beiden komplexesten Flanker-Bedingungen sowie die zweite Swaps-Bedingung.

Das spricht dafür, dass weniger komplexe Aufgaben besser im mittleren Intelligenzbereich differenzierten und komplexere Aufgaben besser im oberen Intelligenzbereich. Um zu unter-

suchen, ob diese Hypothese auch auf die Fehlerraten der Swaps-Aufgabe zutraf, wurde die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation ebenfalls getrennt für die beiden Stichproben betrachtet.

Zusätzliche Analysen: Fehlerraten. Wenn bei den Reaktionszeiten weniger komplexe Bedingungen besser im mittleren Leistungsbereich differenzieren und komplexere im oberen Leistungsbereich, dann könnte das auch auf die Fehlerraten zutreffen.

Weil nur die Fehlerraten der vier komplexesten Swaps-Bedingungen in der Gesamtstichprobe eine signifikante Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation aufwiesen (siehe Anhang F), wurden diese vier Bedingungen getrennt für die beiden Stichproben untersucht. Die Korrelationen für die beiden Stichproben sind in Abbildung 13 dargestellt.

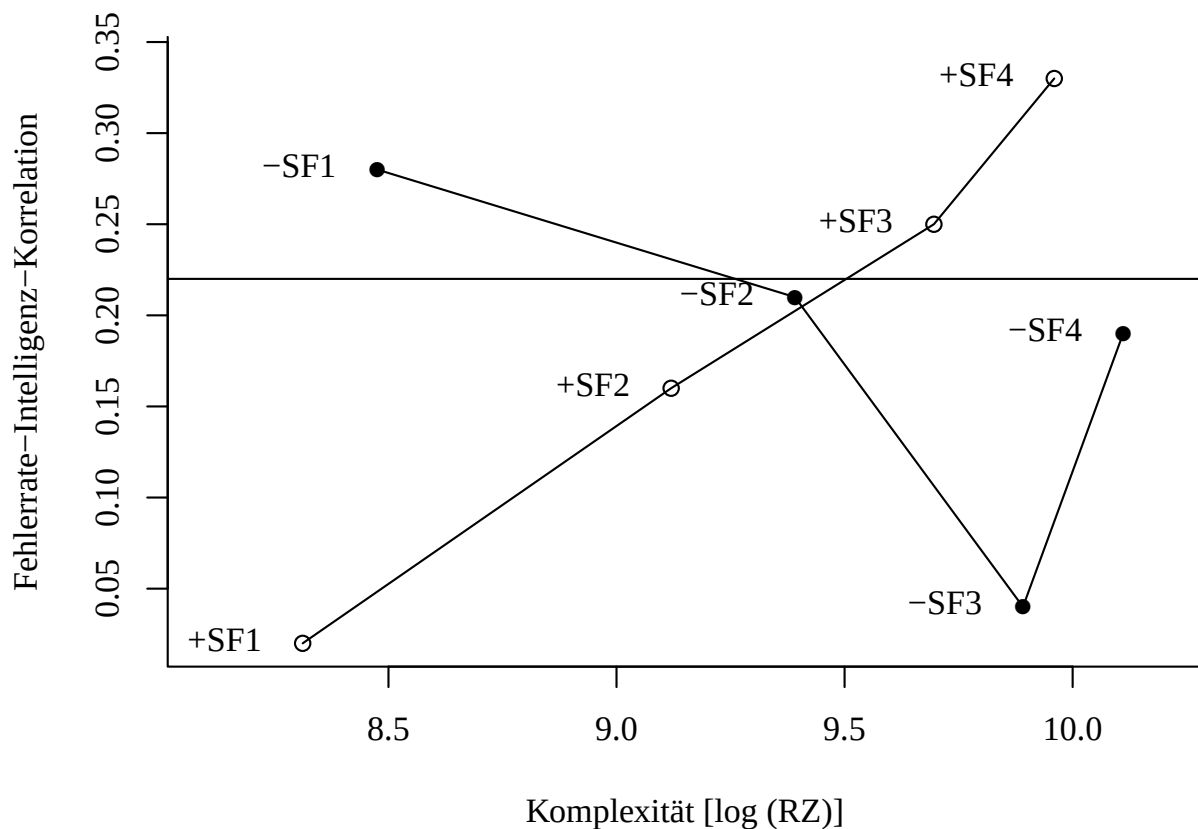


Abbildung 13. Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen in Abhängigkeit von der stichprobenspezifischen Aufgabenkomplexität getrennt für die Stichprobe mit der niedrigeren (-) und der höheren Intelligenz (+). Auf der x-Achse ist die Komplexität (Logarithmus der Reaktionszeit) abgetragen und auf der y-Achse die Korrelation mit dem g_{CFT} -Faktor. Die Fehlerraten wurden invertiert, damit höhere Werte mit einer besseren Leistung einhergingen. SF = Swaps-Fehlerraten, entsprechend der Komplexität aufsteigend nummeriert. Alle Korrelationen oberhalb der horizontalen schwarzen Linie waren mit $p < .05$ signifikant. RZ = Reaktionszeit, $N = 80$ pro Stichprobe.

Die Komplexität für die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation wurde ebenfalls über die mittlere Reaktionszeit operationalisiert, weil die mittlere Reaktionszeit und die mittlere Fehlerrate über die verschiedenen Bedingungen sehr stark korreliert waren und weil es für die Interpretation der Resultate einfacher ist, wenn die Masseinheit der Komplexität immer dieselbe ist.

Insgesamt zeigte sich bei den Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen ein ähnliches Bild wie bei den Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen. Weniger komplexe Bedingungen korrelierten stärker in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz mit der Intelligenz und komplexere Bedingungen in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Obwohl das Muster in Abbildung 13 relativ konsistent ausfiel, unterschieden sich die Korrelationskoeffizienten der beiden Stichproben nicht statistisch signifikant voneinander (Anhang F).

Die Korrelationen oberhalb der horizontalen schwarzen Linie waren statistisch signifikant von null verschieden. Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz war das die Fehler-rate der zweiten, wenig komplexen Swaps-Bedingung und für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz waren es die beiden komplexesten Swaps-Bedingungen. Insgesamt spricht das also dafür, dass auch bei den Fehlerraten weniger komplexe Bedingungen stärker in der Stichprobe mit der niedrigen und komplexere stärker in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz korreliert waren.

Wenn man die Analysen in Anhang F näher betrachtet, zeigte sich ein zusätzliches unerwartetes Resultat. Der Vollständigkeit halber wurde auch die erste Swaps-Bedingung aufgeführt, obwohl diese in der gesamten Stichprobe nicht mit der Intelligenz zusammenhing ($r = .06$, $p = .44$). Die Bedingung korrelierte in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz signifikant höher mit der Intelligenz als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz ($z = -2.86$, $p < .05$). Weil die Bedingung aber in der Gesamtstichprobe nicht mit der Intelligenz korreliert war, eine mittlere Fehlerrate von unter 10% aufwies und mit einem Cronbach's Alpha von .22 eine sehr niedrige interne Konsistenz aufwies, wurde von einem Ergebnis durch Zufall ausgegangen. Deshalb wurde diese Korrelation nicht weiteruntersucht.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz nahm die RZ-Intelligenz-Korrelation in der Swaps-Aufgabe mit steigender Komplexität zunächst zu und danach wieder ab. Die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation hingegen stieg innerhalb der vier komplexesten Swaps-Bedingungen

(S1 bis S4) kontinuierlich an. Es gab also Bedingungen bei denen sowohl die Fehlerrate als auch die Reaktionszeit signifikant mit der Intelligenz assoziiert waren. Damit stellte sich die Frage, wie viel Varianz an der Intelligenz die verschiedenen Bedingungen voraussagten, wenn pro Bedingung jeweils sowohl die Reaktionszeit als auch die Fehlerrate als Prädiktor verwendet wurde. Weil in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz nur die Reaktionszeit und die Fehlerrate der zweiten Swaps-Bedingung signifikant mit der Intelligenz korreliert waren, erübrigte sich diese Analyse in der Stichprobe. Es war offensichtlich, dass die zweite Swaps-Bedingung in dieser Stichprobe am meisten Varianz der Intelligenz aufklären musste.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz wurde pro Bedingung die Intelligenz jeweils mittels einer multiplen linearen Regression aus der Reaktionszeit sowie der Fehlerrate vorhergesagt. Alle Regressionen vielen signifikant aus (zweite Bedingung : $F(2,77) = 4.31, p < .05$; dritte Bedingung : $F(2,77) = 4.99, p < .01$, vierte Bedingung : $F(2,77) = 5.92, p < .01$, fünfte Bedingung : $F(2,77) = 7.25, p < .01$). Mit einem $R^2 = .10$ für die zweite Bedingung, einem $R^2 = .11$ für die dritte Bedingung, einem $R^2 = .13$ für die vierte Bedingung und einem $R^2 = .16$ für die fünfte Bedingung, stieg die aufgeklärte Varianz mit der Aufgabenkomplexität der Bedingungen kontinuierlich an.

Für die Swaps-Aufgabe ergab sich also in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz ein kontinuierlicher Anstieg der aufgeklärten Varianz der Intelligenz mit steigender Aufgabenkomplexität, wenn jeweils Fehlerrate und Reaktionszeit in der Vorhersage kombiniert wurden. Obwohl die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz zunächst mit steigender Komplexität zu und dann wieder abnahm, zeigte sich wenn Reaktionszeit und Fehlerrate in der Vorhersage kombiniert wurden ein kontinuierlicher Anstieg der aufgeklärten Varianz. Dementsprechend waren in dieser Stichprobe insgesamt komplexere Swaps-Bedingungen stärker mit der Intelligenz assoziiert als weniger komplexe. In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz hingegen, stieg die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Swaps-Aufgabe zunächst an und nahm danach wieder ab, wobei der Zusammenhang in der zweiten Bedingung maximal war.

Zusammengefasst war also entgegen der Erwartung die maximale Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Stichprobe mit der tieferen Intelligenz bei einer niedrigeren Komplexi-

tät erreicht als in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Dabei zeigte sich insgesamt, dass sowohl bei den Reaktionszeiten als auch bei den Fehlerraten weniger komplexe Bedingungen in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz stärker mit der Intelligenz assoziiert waren und komplexere Bedingungen stärker in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Wurden in der Swaps-Aufgabe Reaktionszeiten und Fehlerraten in der Vorhersage der Intelligenz kombiniert, stieg die aufgeklärte Varianz der Intelligenz in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz kontinuierlich bis zur komplexesten Bedingung an.

Isolierung der Komplexität

In einem nächsten Schritt wurde auf latenter Ebene untersucht, ob eine aus den homogenen Bedingungen mit steigender Komplexität extrahierte Komponente, die ausschliesslich von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst wird, signifikant mit der Intelligenz korrelierte. Zur Isolierung der von der Komplexitätsmanipulation beeinflussten Komponente, wurden die in der Einleitung vorgestellten Fixed-Links-Modelle eingesetzt.

Modelliert wurden jeweils pro Aufgabe die Reaktionszeiten der verschiedenen Bedingungen. Zusätzlich wurden in der Swaps-Aufgabe auch die Fehlerraten modelliert. Der Grund dafür ist, dass diese Aufgabe so komplex war, dass sich für die vier komplexesten Bedingungen eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation ergab. Die Fehlerrate der am wenigsten komplexen Bedingung war aber nicht signifikant mit der Intelligenz korreliert. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Komplexitätsmanipulation in der Swaps-Aufgabe nicht nur die Reaktionszeit-Intelligenz- sondern auch die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation beeinflusst hat. Die Fehlerraten der Hick- und Flanker-Bedingungen wurden nicht modelliert weil mit einer mittleren Fehlerrate von .05 relativ wenig Fehler vorkamen, weil die Fehlerraten entsprechend der internen Konsistenz unreliabel waren und weil sie alle nicht mit der Intelligenz zusammenhingen.

Fixed-Links-Modelle zeichnen sich, wie in der Einleitung bereits erwähnt, dadurch aus, dass die Ladungen der manifesten Variablen auf den latenten Variablen entsprechend theoretischen Erwartungen fixiert werden (Schweizer, 2006b). Weil die von der Komplexitätsmanipulation unabhängige, konstante Komponente in allen Bedingungen gleichermassen vorkam, wurden die entsprechenden unstandardisierten Ladungen auf dieser Komponente auf eins fixiert.

Die unstandardisierten Ladungen auf der komplexitätsabhängigen, ansteigenden Komponente hingegen, wurden entsprechend der Aufgabenkomplexität fixiert. Dabei wurde die unstandardisierte Ladung der ersten Bedingung auf null fixiert, weil sie von der Komplexitätsmanipulation nicht beeinflusst wurde. Um den Komplexitätsanstieg in den anderen Bedingungen repräsentieren zu können, wurde jeweils die Komplexität dieser ersten, nicht komplexitätsabhängigen Bedingung subtrahiert und die unstandardisierten Ladungen auf der ansteigenden Komponente auf diesen Differenzwert fixiert. Wenn z.B. die Komplexität der ersten Bedingung 300 ms betrug und die Komplexität der zweiten Bedingung 360 ms, dann wurde die unstandardisierte Ladung der ersten Bedingung auf null und jene der zweiten auf 60 fixiert.

Während für die Modellierung der Fehlerraten in der Swaps-Aufgabe nur die Varianz-Kovarianz-Matrix betrachtet wurde, wurden für die Reaktionszeiten der verschiedenen Bedingungen noch zusätzlich die Mittelwerte modelliert, weil darüber die Aufgabenkomplexität operationalisiert wurde. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die extrahierten Komponenten auch tatsächlich diese Komplexitätsmanipulation repräsentierten (Raykov & Marcoulides, 2000).

Für jede Aufgabe wurde zusätzlich zum Fixed-Links-Modell ein einfaktorielles Modell berechnet. Dieses wurde präferiert, wenn es gut zu den Daten passte. In diesem Fall hat nämlich die Manipulation der Komplexität nicht zu zwei trennbaren Komponenten geführt, weshalb keine varianzstarke, komplexitätsabhängige Komponente isoliert werden konnte. Ausserdem wurde das einfaktorielle Modell präferiert, wenn eine Komponente der Fixed-Links-Modelle keine signifikante Varianz aufwies und damit nicht geeignet war, um interindividuelle Unterschiede zu repräsentieren.

Zunächst wurde also pro Aufgabe jeweils eine latente Variable für die Reaktionszeiten und in der Swaps-Aufgabe eine latente Variable für die Fehlerraten extrahiert. Die Ladungen der manifesten auf der latenten Variablen im einfaktoriellen Modell wurden im Gegensatz zu den Fixed-Links-Modellen frei geschätzt.

Ausserdem wurden auch im einfaktoriellen Modell für die Reaktionszeiten nicht nur die Varianz-Kovarianz-Matrizen modelliert, sondern auch die Mittelwerte der Reaktionszeit. Damit wurde auch im einfaktoriellen Modell sichergestellt, dass die extrahierte Komponente die

Komplexitätsmanipulation repräsentierte.

In Tabelle 3 sind die Fitstatistiken der verschiedenen Messmodelle der Reaktionszeiten und gegebenenfalls der Fehlerraten getrennt für die drei Aufgaben aufgeführt. Ein Messmodell bezieht sich im Gegensatz zu einem Strukturmodell auf die Beziehungen zwischen den manifesten und den latenten Variablen. Ein Strukturmodell hingegen bezieht sich auf die Beziehungen zwischen verschiedenen latenten Variablen. Es wird vorgeschlagen immer zuerst die einzelnen Messmodelle zu testen und diese dann in einem nächsten Schritt im Strukturmodell miteinander zu kombinieren (Raykov & Marcoulides, 2000).

Tabelle 3

Fitstatistiken für die Messmodelle der Reaktionszeiten und Fehlerraten der drei untersuchten Aufgaben sowie das Strukturmodell der Reaktionszeiten und Fehlerraten der Swaps-Aufgabe

Modell	Aufgabe	Struktur	SB χ^2	df	<i>p</i>	CFI	RMSEA	SRMR	AIC
1	Hick RZ	1 Faktor	0.79	2	.68	1	0	.04	3411.27
2		2 Faktoren	0.01	1	.91	1	0	.01	3410.83
3	Flanker RZ	1 Faktor	24.77	5	<.001	.82	.14	.09	1363.30
4		2 Faktoren	8.41	5	.14	.97	.06	.08	1319.68
5	Swaps RZ	1 Faktor	50.14	9	<.001	.69	.15	.29	4269.89
6		2 Faktoren	14.90	10	.14	.96	.05	.07	4149.22
7	Swaps Fehlerrate	1 Faktor	3.38	5	.64	1	0	.02	3342.87
8		2 Faktoren	6.35	7	.50	1	0	.05	3344.40
9	Swaps RZ und Fehlerrate	3 Faktoren	57.61	38	.02	.95	.05	.08	7476.70
10		*3 Faktoren	39.53	37	.36	.99	.02	.06	7441.60

Anmerkungen. *N* = 200. RZ = Reaktionszeit. 1 Faktor = einfaktorielles Modell, 2 Faktoren: Fixed-Links-Modell, SB χ^2 : Satorra-Bentler korrigierter χ^2 -Wert, CFI: Comparative Fit Index, RMSEA: Root Mean Square Error of Approximation, SRMR: Standardized Root Mean Square Residual, AIC: Akaike Information Criterion. *negative Kreuzladung der Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingung auf dem Fehlerfaktor. Die ansteigende Komponente der Reaktionszeiten der Hick-Aufgabe und die konstante Komponente der Fehlerraten der Swaps-Aufgabe wiesen keine signifikante Varianz auf.

Die ersten sechs Modelle in Tabelle 3 sind jeweils das Modell mit einem Faktor und das Fixed-Links-Modell für die Reaktionszeit der drei untersuchten Aufgaben. Diese Messmodelle sind im Anhang H visualisiert.

Zu den mittleren Reaktionszeiten der drei Hick-Bedingungen passte sowohl das einfaktorielle Modell als auch das Fixed-Links-Modell gut. Im Fixed-Links-Modell war aber nur die

Varianz der konstanten Komponente signifikant von null verschieden ($Z = 3.20, p < .01$). Die Varianz der ansteigenden Komponente unterschied sich hingegen nicht signifikant von null ($Z = 1.37, p = .17$). Das heisst, es gab keine bedeutsamen interindividuellen Unterschiede auf dieser Komponente. Damit war diese nicht geeignet, um die Korrelation mit der Intelligenz zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde das sparsamere einfaktorielle Modell präferiert. Die komplexitätsabhängige Komponente konnte also in der Hick-Aufgabe nicht isoliert werden.

Der Fit des einfaktoriellen Modells der Reaktionszeiten der Flanker-Aufgabe war nicht gut (siehe Tabelle 3 Modell 3). Das Fixed-Links-Modell hingegen passte gut zu den Daten (siehe Tabelle 3 Modell 4). Die Varianz sowohl der konstanten ($Z = 4.23, p < .001$) als auch der ansteigenden Komponente ($Z = 4.29, p < .001$) war signifikant von null verschieden. Weil das Fixed-Links-Modell im Gegensatz zum einfaktoriellen Modell gut zu den Daten passte und die beiden extrahierten Komponenten eine signifikant von null verschiedene Varianz aufwiesen, wurde es präferiert. In der Flanker-Aufgabe konnte also eine ansteigende nur von der Manipulation der Komplexität abhängige Komponente extrahiert und von einer konstanten nicht von der Manipulation der Komplexität abhängigen Komponente getrennt werden.

Der Fit des einfaktoriellen Modells der Reaktionszeiten der Swaps-Aufgabe war nicht gut (siehe Tabelle 3 Modell 5). Das Fixed-Links-Modell passte aber gut zu den Daten (siehe Tabelle 3 Modell 6). Die Varianz sowohl der konstanten ($Z = 3.00, p < .01$) als auch der ansteigenden Komponente ($Z = 4.71, p < .001$) war signifikant von null verschieden. Weil auch in der Swaps-Aufgabe das Fixed-Links-Modell im Gegensatz zum einfaktoriellen Modell gut zu den Daten passte und die beiden extrahierten Komponenten eine signifikant von null verschiedene Varianz aufwiesen, wurde es präferiert. In den Reaktionszeiten der Swaps-Aufgabe konnte also eine ansteigende nur von der Manipulation der Komplexität abhängige Komponente extrahiert und von einer konstanten, nicht von der Manipulation der Komplexität abhängigen Komponente getrennt werden.

Zu den Fehlerraten der Swaps-Bedingungen passte sowohl das einfaktorielle Modell als auch das Fixed-Links-Modell gut (siehe Tabelle 3 Modell 7 und Modell 8). Die beiden Modelle sind im Anhang I a und b dargestellt. Im Fixed-Links-Modell war aber nur die Varianz der ansteigenden Komponente signifikant von null verschieden ($Z = 6.25, p < .001$). Die Va-

rianz der konstanten Komponente war hingegen nicht signifikant von null verschieden ($Z = 1.20, p = .23$). Das heisst, es gab keine bedeutsamen interindividuellen Unterschiede in dieser Komponente. Damit war diese nicht geeignet, um die Korrelation mit der Intelligenz zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde das sparsamere einfaktorielle Modell präferiert. Eine komplexitätsabhängige Komponente konnte also aus den Fehlerraten der Swaps-Aufgabe nicht isoliert werden.

Ein einfaktorielles Modell passte also zu den Fehlerraten und ein Fixed-Links-Modell zu den Reaktionszeiten der Swaps-Aufgabe. In einem nächsten Schritt wurden die beiden Messmodelle miteinander kombiniert. Dieses kombinierte Modell passte nicht sehr gut zu den Daten (siehe Modell 9 in Tabelle 3). Das obwohl das einfaktorielle Messmodell der Fehlerraten und das Fixed-Links-Modell der Reaktionszeiten gut zu den Daten passte. Das χ^2 war signifikant von null verschieden und sowohl der CFI als auch der SRMR lagen genau auf den Grenzwerten für einen akzeptablen Modellfit (Hu & Bentler, 1999). Deshalb wurden Modifizierungsindikatoren eingesetzt, um herauszufinden, welche zusätzlichen Ladungen oder Korrelationen zugelassen werden mussten, damit das Modell besser zu den Daten passt (Rosseel, 2012). Die Modifizierungsindikatoren geben für jede zusätzliche Ladung oder Korrelation im Modell an, um wie viel sich damit die χ^2 -Teststatistik verbessern würde. Die Modifizierung, die zur grössten Verbesserung der χ^2 -Teststatistik führte, war die negative Ladung der Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingung auf dem aus den Fehlerraten extrahierten Faktor. Mit dieser zusätzlichen Ladung passte das Modell gut zu den Daten (siehe Modell 10 in Tabelle 3). Das Modell ohne diese negative Ladung und das Modell mit der negativen Ladung sind im Anhang I c und d dargestellt.

In einem nächsten Schritt wurde pro Aufgabe das beste Messmodell (siehe Tabelle 3) mit der Intelligenz kombiniert, wobei die Intelligenz aus den vier CFT 20-R Skalen extrahiert wurde. Auf diese Weise konnten die Zusammenhänge zwischen den aus den drei experimentellen Aufgaben extrahierten Komponenten und der Intelligenz untersucht werden. Wie bereits erwähnt und in Abbildung 9 dargestellt, passte das Messmodell für den CFT 20-R sehr gut zu den Daten. Die Fitindikatoren der Strukturmodelle der Hick-, Flanker- und Swaps-Aufgaben in Kombination mit der Intelligenz sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4

Fitindikatoren der Strukturmodelle der besten Messmodelle der untersuchten experimentellen Aufgaben in Kombination mit der Intelligenz

Strukturmodelle	SB χ^2	df	p	CFI	RMSEA	SRMR
Hick RZ und Intelligenz	13.91	15	.53	1	0	.03
Flanker RZ und Intelligenz	30.20	21	.11	.98	.04	.05
Swaps RZ, Fehlerrate und Intelligenz	92.23	76	.10	.97	.03	.06

Anmerkungen. $N = 200$. RZ = Reaktionszeit, SB χ^2 : Satorra-Bentler korrigierter χ^2 -Wert, CFI: Comparative Fit Index, RMSEA: Root Mean Square Error of Approximation, SRMR: Standardized Root Mean Square Residual.

Alle drei Modelle passten gut zu den Daten. Das mit der Intelligenz kombinierte Strukturmodell der Hick-Aufgabe ist in Abbildung 14 dargestellt. Hick RZ, die latente Variable extrahiert aus den Reaktionszeiten der drei Hick-Bedingungen korrelierte zu $r = .39$, $p < .001$ mit der Intelligenz, extrahiert aus den vier Skalen des CFT 20-R. Weil die Reaktionszeiten umcodiert wurden, waren also kürzere Reaktionszeiten in den Hick-Bedingungen assoziiert mit einer höheren Intelligenz. In der Hick-Aufgabe konnte nur das einfaktorielle Modell untersucht werden, weil die komplexitätsabhängige Komponente keine signifikante Varianz aufwies. Aus diesem Grund konnte die Hypothese, dass die nur von der Komplexitätsmanipulation beeinflusste Komponente signifikant mit der Intelligenz korreliert, nicht untersucht werden.

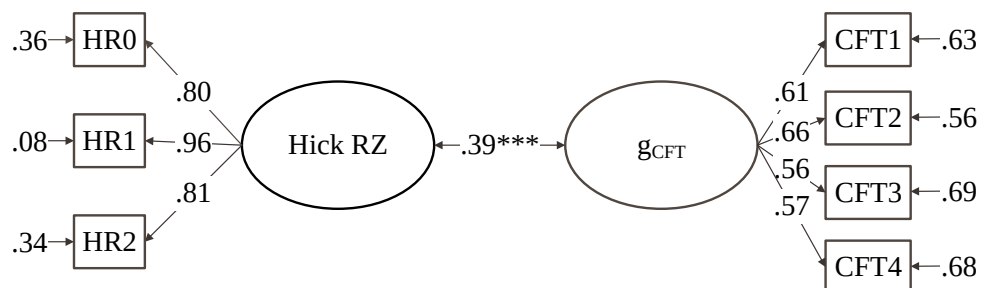


Abbildung 14. Strukturmodell des Zusammenhangs zwischen den Hick-Bedingungen und dem CFT 20-R. RZ = Reaktionszeit, HR0 bis HR2 = Reaktionszeiten der drei Hick-Bedingungen, CFT1 bis CFT4 = Skalen des CFT 20-R. Alle frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .001$ signifikant. Es sind jeweils die standardisierten Ladungen abgebildet. $N = 200$.

*** $p < .001$.

Das Modell der Flanker-Bedingungen ist in Abbildung 15 dargestellt. Der Zusammenhang zwischen der extrahierten konstanten, nicht von der Komplexitätsmanipulation beeinflussten Komponente und der ansteigenden, von der Komplexitätsmanipulation abhängigen Komponente war mit $r = -.04$ und $p = .78$ nicht signifikant. Sowohl die konstante Komponente ($r = .49$, $p < .001$) als auch die ansteigende Komponente ($r = .25$, $p < .05$) korrelierten signifikant positiv mit der Intelligenz. Weil die Reaktionszeiten jeweils umcodiert wurden, bedeutet das, je länger die Vpn zur Ausführung der konstanten sowie der ansteigenden Komponente brauchten, desto niedriger war ihre Intelligenz. Die Hypothese, dass die komplexitätsabhängige, ansteigende Komponente der Flanker-Aufgabe signifikant mit der Intelligenz assoziiert war, konnte also bestätigt werden. Die Korrelation zwischen der konstanten Komponente und der Intelligenz war aber höher als die Korrelation zwischen der ansteigenden Komponente und der Intelligenz ($z = 2.65$, $p < .01$). Für den Vergleich wurde eine *Fisher's r-to-Z transformation* mit anschließender z-Standardisierung durchgeführt (Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2011). Es handelte sich um einen zweiseitigen Vergleich der Korrelationskoeffizienten aus abhängigen Stichproben.

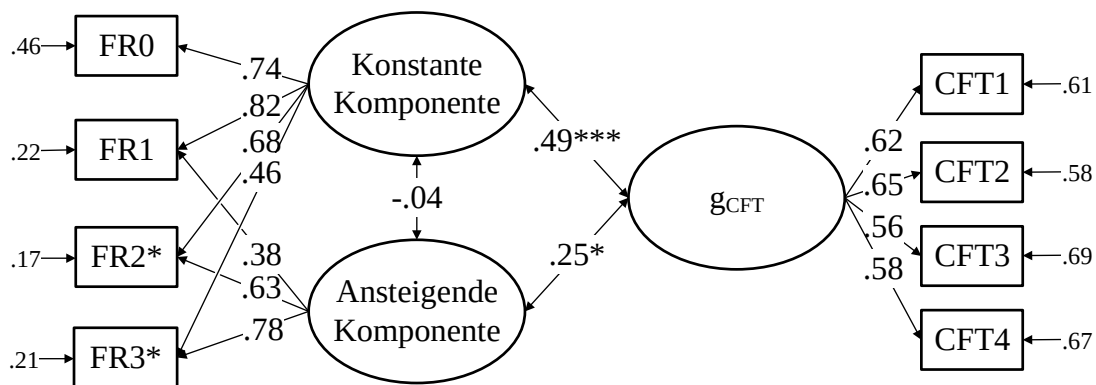


Abbildung 15. Strukturmodell der Korrelationen zwischen den Flanker-Bedingungen und dem CFT 20-R. FR0 bis FR3* = Reaktionszeiten der vier Flanker-Bedingungen, CFT1 bis CFT4 = vier Skalen des CFT 20-R. Es sind jeweils die standardisierten Ladungen dargestellt. Die freigeschätzten Ladungen auf der Intelligenz waren mit $p < .001$ signifikant. $N = 200$.

* $p < .05$. *** $p < .001$.

Das Modell der Swaps-Aufgabe ist in Abbildung 16 dargestellt. Der Fehlerfaktor und die ansteigende Komponente korrelierten zu $r = .07$ ($p = .40$) nicht signifikant miteinander. Alle anderen Korrelationen waren mit $r > .36$ und $p < .01$ signifikant. Der g_{CFT} -Faktor korrelierte

also mit allen drei aus den Reaktionszeiten und Fehlerraten extrahierten Komponenten.

Die ansteigende Reaktionszeit-Komponente korrelierte zu $r = .44$ mit dem g_{CFT} -Faktor. Damit konnte die Hypothese bestätigt werden, dass die komplexitätsabhängige Reaktionszeit-Komponente signifikant mit der Intelligenz zusammenhängt. Weil die Reaktionszeiten umcodiert wurden bedeutet diese Korrelation, dass ein stärkerer Anstieg der Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität mit einer niedrigeren Intelligenz assoziiert war.

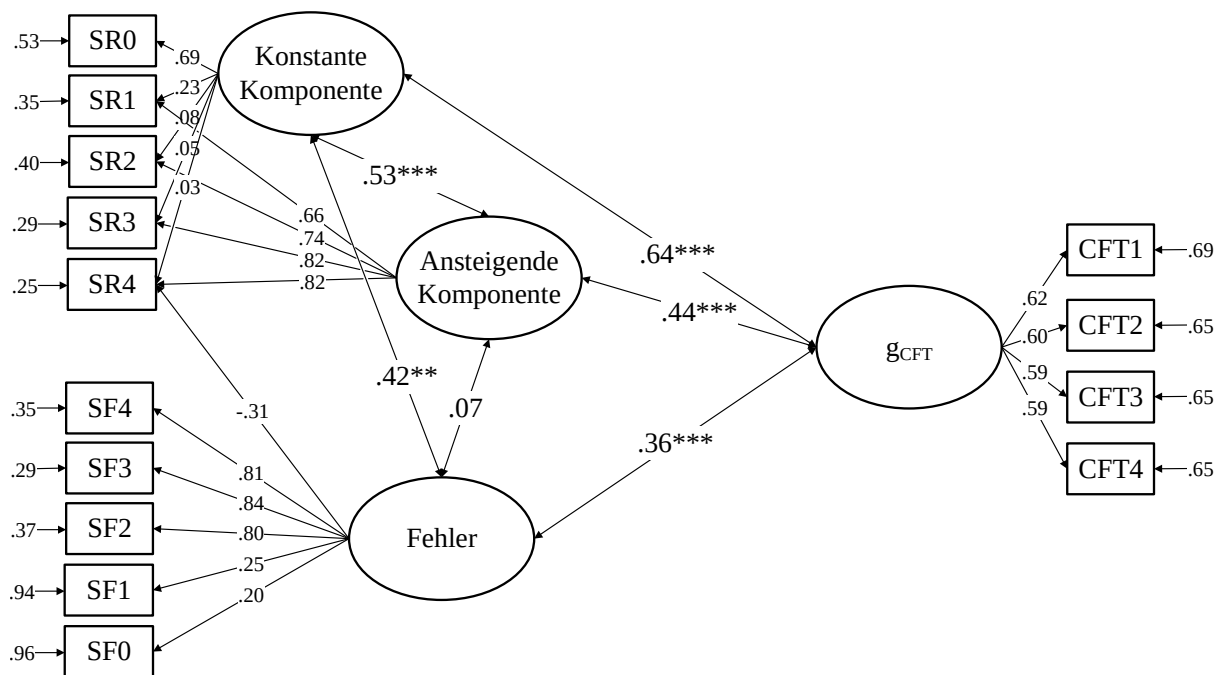


Abbildung 16. Strukturmodell der Korrelation zwischen den Swaps-Bedingungen und dem CFT 20-R. SR0 bis SR4 = Reaktionszeiten der fünf Swaps-Bedingungen, SF0 bis SF4 = Fehlerraten der fünf Swaps-Bedingungen, CFT1 bis CFT4 = vier Skalen des CFT 20-R. Die Ladung von SF1 auf der, aus den Fehlerraten extrahierten Komponente, war mit $p = .08$ nicht signifikant. Alle anderen frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .05$ signifikant. $N = 200$.

** $p < .01$. *** $p < .001$.

Für die Fehler-Komponente konnte die Hypothese aber nicht untersucht werden, weil die konstante, nicht von der Manipulation der Komplexität abhängige Komponente keine signifikante Varianz aufwies. Die frei geschätzten Ladungen auf der Fehler-Komponente, unterschieden sich in Abhängigkeit von der Komplexität der Bedingungen, wobei die beiden am wenigsten komplexen Bedingungen kaum darauf luden, die drei komplexesten Bedingungen aber relativ stark. Obwohl also der Einfluss der Komplexität auf die Fehlerraten der Swaps-Aufgabe

nicht von nicht-komplexitätsabhängigen Einflüssen bereinigt werden konnte, war der Einfluss der Komplexitätsmanipulation in den frei geschätzten Ladungen auf der Fehler-Komponente gut sichtbar.

Die konstante Reaktionszeit-Komponente korrelierte sowohl mit der ansteigenden Reaktionszeit-Komponente als auch mit der Fehler-Komponente. Die konstante Komponente korrelierte signifikant stärker mit dem g_{CFT} -Faktor als die ansteigende Komponente $z = 3.67$ ($p < .001$) und als die Fehler-Komponente $z = 4.53$ ($p < .001$). Für diese beiden zweiseitigen Vergleiche von Korrelationskoeffizienten aus abhängigen Stichproben wurde eine *Fisher's r-to-Z transformation* mit anschließender z-Standardisierung durchgeführt (Eid et al., 2011).

Weil sowohl die ansteigende Komponente aus den Reaktionszeiten als auch die Fehler-Komponente zusätzlich mit der konstanten Reaktionszeit-Komponente korrelierten, wurde vermutet, dass deren Korrelation mit dem g_{CFT} -Faktor in erster Linie durch die Korrelation dieser beiden Komponenten mit der konstanten Reaktionszeit-Komponente zustande kam. Das weil korrelierte Komponente überlappende Varianzanteile am g_{CFT} -Faktor aufklären. Um das zu untersuchen, wurden zusätzliche Analysen durchgeführt.

Zusätzliche Analysen: korrelierte Komponenten der Swaps-Aufgabe. Ziel dieser Analyse war es herauszufinden, ob die Korrelation zwischen der ansteigenden Reaktionszeit-Komponente und dem g_{CFT} -Faktor sowie der Fehler-Komponente und dem g_{CFT} -Faktor primär durch deren gemeinsame Korrelation mit der konstanten Reaktionszeit-Komponente zustande kam.

Aus diesem Grund wurde das gesamte Swaps-Modell (Abbildung 16) mit einem sparsameren Modell verglichen, bei dem die Intelligenz nur durch die konstante Reaktionszeit-Komponente vorausgesagt wurde. Diese Modell ist in Anhang J dargestellt. Wenn dieses sparsamere Modell nicht schlechter zu den Daten passte, ist das ein Hinweis darauf, dass die Korrelation der beiden anderen Komponenten mit dem g_{CFT} -Faktor primär durch die Korrelation mit der konstanten Reaktionszeit-Komponente zustande kam. Das sparsamere Modell passte gut zu den Daten ($SB\chi^2(78) = 92.22$, $p = .13$, CFI = .98, RMSEA = .03, SRMR = .06, AIC = 10541.09). Trotz grösserer Sparsamkeit passte es nicht schlechter zu den Daten als das gesamte Swaps-Modell in Abbildung 16 ($SB\chi^2(2) = -0.28$, $p = .87$). Aus diesem Grund wurde das sparsamere

Modell präferiert. Für den Vergleich wurde der Chiquadrat-Differenz-Test für Satorra-Bentler skalierte Modelle eingesetzt (Satorra & Bentler, 2001).

Weil also das sparsamere Modell mit nur einer Regression der konstanten Reaktionszeit-Komponente auf den g_{CFT} -Faktor präferiert wurde, ist davon auszugehen, dass die ansteigende Reaktionszeit-Komponente und die Fehler-Komponente primär durch deren Korrelation mit der konstanten Reaktionszeit-Komponente mit dem g_{CFT} -Faktor zusammenhängen.

Allerdings schliesst dieses Resultat das Gegenteil nicht aus. Es ist also auch möglich, dass die Korrelation zwischen der konstanten Reaktionszeit-Komponente und dem g_{CFT} -Faktor primär durch die Korrelation mit den beiden anderen extrahierten Swaps-Komponenten zustande gekommen ist. Dafür wurde im sparsameren Modell die Intelligenz nur durch die beiden anderen extrahierten Swaps-Komponenten, die ansteigende Reaktionszeit-Komponente und die Fehler-Komponente, vorausgesagt. Auch dieses Modell passte gut zu den Daten ($SB\chi^2(77) = 97.75$, $p = .06$, CFI = .96, RMSEA = .04, SRMR = .06, AIC = 10550.14). Das Modell ist in Anhang K dargestellt. Es passte aber signifikant schlechter zu den Daten als das gesamte Swaps-Modell in Abbildung 16 ($SB\chi^2(1) = -6.35$, $p < .05$). Das heisst, die Korrelation zwischen der konstanten Reaktionszeit-Komponente und dem g_{CFT} -Faktor konnte nicht durch die beiden anderen Komponenten erklärt werden.

Alle extrahierten Komponenten der Swaps-Aufgabe korrelierten also mit den g_{CFT} -Faktor, spezifische Varianzanteile an der Intelligenz klärte aber nur die konstante Reaktionszeit-Komponente auf.

Zusätzliche Analysen: Antwortmuster der Swaps-Aufgabe. Zusätzlich fiel auf, dass im gesamten Swaps-Modell die ansteigende Reaktionszeit-Komponente und die Fehler-Komponente nicht signifikant miteinander korreliert waren. Das war aus zwei Gründen unerwartet. Zum einen korrelierten beide mit dem g_{CFT} -Faktor und zum anderen korrelierten beide mit der konstanten Reaktionszeit-Komponente. In diesem Kontext ist es wichtig erneut darauf hinzuweisen, dass sowohl die ansteigende Reaktionszeit-Komponente als auch die Fehler-Komponente von der Manipulation der Komplexität abhingen. Auf beiden Komponenten luden insbesondere die komplexeren Swaps-Bedingungen.

Die nicht vorhandene Korrelation zwischen den beiden Komponenten spricht also dafür,

dass intelligentere Personen verglichen mit weniger intelligenten Personen in den komplexeren Swaps-Bedingungen nicht gleichermassen schneller und akkurater arbeiteten. In diesem Fall wäre nämlich eine positive Korrelation zwischen den beiden Komponenten zu erwarten gewesen. Ein Grund dafür können neben Intelligenzeffekten auch Antworttendenzen sein. Das heisst intelligentere Personen sind zwar genauer und schneller als weniger intelligente Personen aber manche legen mehr Wert auf Geschwindigkeit und machen dafür mehr Fehler, während andere mehr Wert auf Genauigkeit legen, dafür aber langsamer sind. Während also Intelligenzeffekte zu positiven Korrelationen zwischen der Geschwindigkeit und der Genauigkeit führen, führen Antworttendenzen zu negativen Korrelationen. Wenn sich beide Effekte überlagern, ist ein Zusammenhang nahe null wahrscheinlich.

Um diese These weiter untersuchen zu können, wurde auch das Antwortverhalten im CFT 20-R genauer betrachtet. Wenn nämlich dieses Antwortverhalten über verschiedene Aufgaben hinweg stabil ist, müsste sich ein vergleichbares Antwortmuster auch im CFT 20-R ergeben.

Der CFT 20-R besteht aus vier Skalen mit Multiple-Choice-Aufgaben, die jeweils mit einer Zeitbegrenzung vorgegeben werden (Weiss, 2006). Es gibt dabei zwei verschiedene Fehlerquellen, falsche Antworten und Auslassungen. Beide Fehlerquellen beeinflussen die Skalensummenwerte, wobei von den maximal möglichen Punkten die Häufigkeiten beider Fehlerarten subtrahiert werden. Dementsprechend wird bei der Betrachtung der Skalensummenwerte, aus denen bei den bisherigen Analysen jeweils ein g_{CFT} -Faktor extrahiert wurde, nicht klar wie hoch der Anteil falscher Antworten und Auslassungen war. Im Folgenden wurden daher die beiden Fehlerarten näher betrachtet.

Es kann erwartet werden, dass Vpn, die dazu neigen schnell zu arbeiten, in einem zeitbegrenzten Multiple-Choice-Test nur wenig Items auslassen dafür aber relativ viele Fehler machen. Gleichzeitig können Vpn, die dazu neigen, besonders genau zu arbeiten, in einem solchen Test nur wenige Fehler machen, dafür aber mehr Items unbeantwortet lassen.

Von den 15 Items der ersten Skala des CFT 20-R wurden im Durchschnitt 2.14 Items ($SD = 1.72$ Items) falsch beantwortet und im Durchschnitt 0.35 Items ($SD = 0.86$ Items) ausgelassen. Von der zweiten Skala mit ebenfalls 15 Items wurden im Durchschnitt 2.52 Items ($SD = 1.69$ Items) falsch beantwortet und 1.22 Items ($SD = 1.66$ Items) ausgelassen. Von der dritten Skala

mit wiederum 15 Items wurden im Durchschnitt 2.05 Items ($SD = 1.63$ Items) falsch beantwortet und 1.35 Items ($SD = 1.40$ Items) ausgelassen und von der vierten Skala mit 11 Items wurden im Durchschnitt 1.68 Items ($SD = 1.55$ Items) falsch beantwortet und 2.07 Items ($SD = 1.67$ Items) ausgelassen.

Wenn sich im CFT 20-R ebenfalls über die Skalen stabile Antwortmuster zeigen, dann müsste aus den Fehlern und Auslassungen der vier Skalen jeweils eine latente Komponente extrahiert werden können. Das entsprechende Modell ist in Abbildung 17 dargestellt.

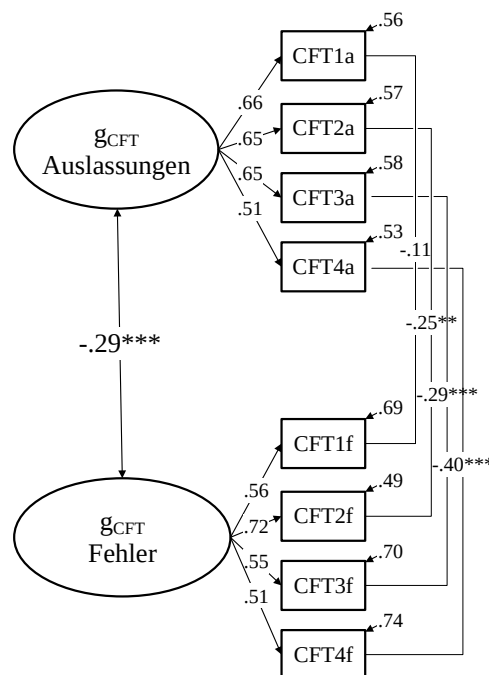


Abbildung 17. Messmodell der Fehler- und Auslassungshäufigkeiten im CFT 20-R. CFT1a bis CFT4a = Auslassungen der vier CFT 20-R Skalen, CFT1f bis CFT4f = Fehler der vier CFT 20-R Skalen. Alle frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .001$ signifikant. $N = 200$. Die Residualkorrelation zwischen CFT1a und CFT1f war mit $p = .15$ nicht signifikant.

** $p < .01$. *** $p < .001$.

Um die Interpretation zu erleichtern wurden die Häufigkeiten von Auslassungen und Fehlern pro Skala des CFT 20-R invertiert, damit ein höherer Wert mit einer besseren Leistung einherging. Dann wurde jeweils eine latente Variable aus den Häufigkeiten der falschen Antworten der vier Skalen und eine latente Variable aus den Häufigkeiten der Auslassungen der vier Skalen extrahiert. Weil von diesen Fehler- und Auslassungs-Häufigkeiten jeweils zwei von derselben Skala stammen, wurde jeweils zwischen diesen beiden eine Residualkorrelation zu-

gelassen. Dieses Messmodell passte mit $SB\chi^2(15) = 18.49$, $p = .24$, CFI = .99, RMSEA = .03, SRMR = .05, AIC = 5504.08 gut zu den Daten (siehe Abbildung 17). Durch die Extraktion einer Komponente aus den Fehlern des CFT 20-R und einer Komponente aus den Auslassungen des CFT 20-R, konnten über die vier Skalen hinweg konsistente individuelle Präferenzen für Fehler und Auslassungen nachgewiesen werden. Die beiden Komponenten waren signifikant negativ miteinander korreliert $r = -.29$ ($p < .001$). Vpn die zu mehr Fehlern neigten, neigten also gleichzeitig zu weniger Auslassungen und umgekehrt.

In einem nächsten Schritt wurde dieses Modell mit dem Messmodell der Swaps-Aufgabe kombiniert, um Zusammenhänge zwischen den Antwortmustern in den beiden Aufgaben untersuchen zu können. Dieses Strukturmodell passte gut zu den Daten ($SB\chi^2(126) = 155.81$, $p = .04$, CFI = .96, RMSEA = .03, SRMR = .06, AIC = 12887.73). Es ist in Abbildung 18 dargestellt.

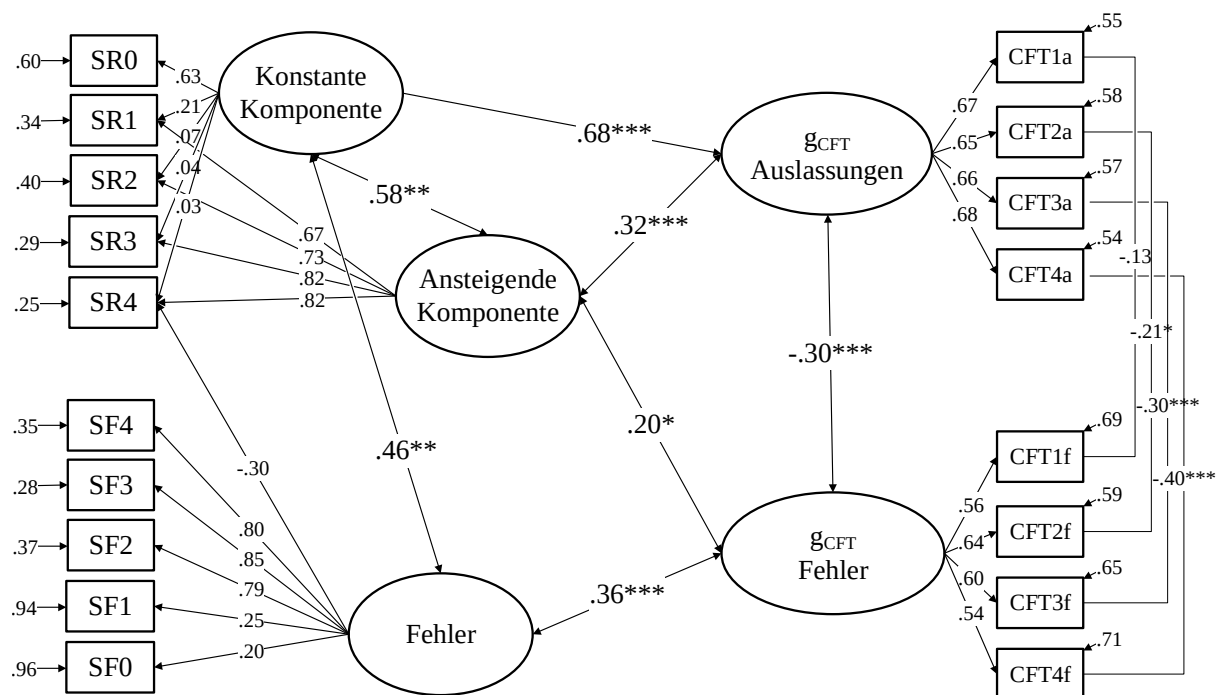


Abbildung 18. Strukturmodell der Zusammenhänge zwischen den Swaps-Bedingungen und den Fehlerarten im CFT 20-R. SR0 bis SR4 = Reaktionszeiten, SF0 bis SF4 = Fehlerraten, CFT1a bis CFT4a = Auslassungen, CFT1f bis CFT4f = Fehler. Eingezeichnet sind nur signifikante Korrelationen. SF1 lud mit $p = .07$ nicht signifikant auf dem Fehlerfaktor der Swaps-Aufgabe. Alle anderen frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .05$ signifikant. Die Residualkorrelation zwischen CFT1a und CFT1f war mit $p = .10$ nicht signifikant. $N = 200$.

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Die falschen Antworten des CFT 20-R korrelierten primär mit der Komponente der Fehlerarten der Swaps-Aufgabe und die Auslassungen des CFT 20-R mit der konstanten Komponente. Wer also im CFT 20-R zu falschen Antworten neigte, neigte auch in der Swaps-Aufgabe zu falschen Antworten. Wer im CFT 20-R zu Auslassungen neigte, neigte in der Swaps-Aufgabe zu langsameren Reaktionszeiten.

Allerdings korrelierte zusätzlich die ansteigende Komponente der Swaps-Aufgabe mit beiden Komponenten des CFT 20-R. Um zu untersuchen, ob diese Korrelationen bedeutungsvoll waren, oder primär durch deren Korrelation mit den anderen Komponenten der Swaps-Aufgabe zustande kamen, wurde das Modell in Abbildung 18 mit einem sparsameren Modell verglichen. Im sparsameren Modell wurden die Auslassungen des CFT 20-R nur durch die konstante Komponente der Swaps-Aufgabe vorausgesagt und die Fehler im CFT 20-R nur durch die Fehler-Komponente der Swaps-Aufgabe.

Dieses sparsamere Modell passte zu den Daten ($SB\chi^2(130) = 163.62$, $p = .02$, CFI = .96, RMSEA = .04, SRMR = .07, AIC = 12890.39) und war nicht signifikant schlechter als das Modell mit frei geschätzten Korrelationen zwischen allen Komponenten ($SB\chi^2(4) = -7.62$, $p = .11$). Es ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Komponente der falschen Antworten im CFT 20-R wurde also primär durch die Fehler-Komponente in der Swaps-Aufgabe vorausgesagt und die Auslassungs-Komponente im CFT 20-R primär durch die konstante Komponente der Swaps-Aufgabe. Es liessen sich also über die Bedingungen/Skalen hinweg konsistente Antwortmuster in der Swaps-Aufgabe sowie im CFT 20-R nachweisen.

Eine wichtige Frage, die bei der Analyse der Antwortmuster aufkam war, ob diese Antwortmuster signifikant mit der Intelligenz zusammenhingen. Das würde nämlich bedeuten, dass die Tendenz für ein bestimmtes Antwortmuster im CFT 20-R von der Intelligenz der Vpn abhängt. Dafür wurde aus den beiden Fehlerarten des CFT 20-R der von Phillips und Rabbitt (1995), in Anlehnung an Salkind und Wright (1977), vorgeschlagene Impulsivitätswert berechnet. Dabei werden die Geschwindigkeit und die Genauigkeit der Antworten einer Person mit der untersuchten Stichprobe in Beziehung gesetzt.

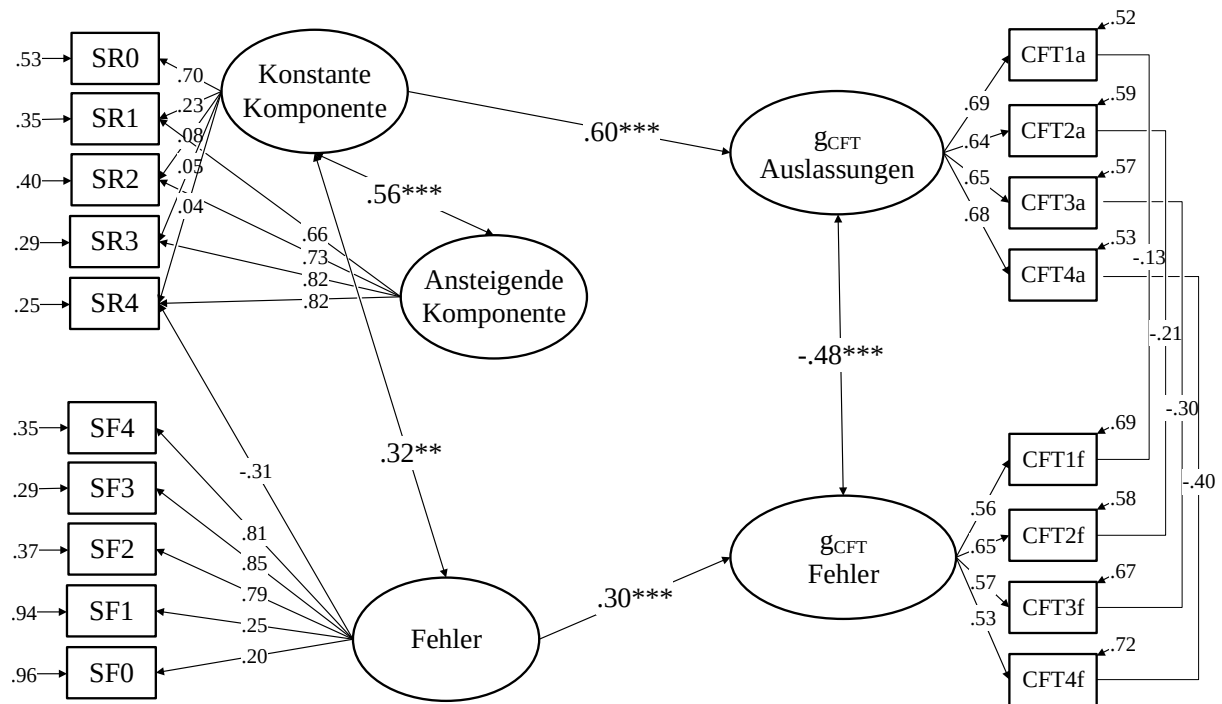


Abbildung 19. Strukturmodell der Zusammenhänge zwischen den Swaps-Bedingungen und den Fehlerarten im CFT 20-R. SR0 bis SR4 = Reaktionszeiten, SF0 bis SF4 = Fehlerraten, CFT1a bis CFT4a = Auslassungen, CFT1f bis CFT4f = Fehler. $N = 200$. Eingezeichnet sind nur signifikante Zusammenhänge. $p < .05$. $p < .01$. *** $p < .001$.

Zunächst wurde berechnet, wie viele Items von den Vpn insgesamt bearbeitet wurden. Dieser Wert stellt ein Geschwindigkeitsmass dar. Dann wurde berechnet, wie viele der bearbeiteten Items korrekt gelöst wurden. Dieser Wert ist ein Genauigkeitsmass. Danach wurden sowohl das Geschwindigkeitsmass als auch das Genauigkeitsmass z-standardisiert. Das z-standardisierte Genauigkeitsmass wurde im Anschluss vom z-standardisierten Geschwindigkeitsmass subtrahiert. Dieser Wert entsprach dem Impulsivitätswert nach Phillips und Rabbitt (1995). Der Impulsivitätswert korrelierte zu $r = -.13$ und $p = .07$ nicht signifikant mit den Faktorwerten des g_{CFT} -Faktors. Intelligenz und Antwortmuster in der relativen Präferenz von Geschwindigkeit und Genauigkeit waren also nicht signifikant miteinander korreliert.

Die Struktur der Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Bedingungen: manifeste Ebene

Im Folgenden sollte die Hypothese untersucht werden, dass die Reaktionszeiten in den Bedingungen mit relativ niedriger Komplexität positiv mit den Fehlerraten der Bedingungen

mit relativ hoher Komplexität korrelierten. Die Fehlerraten der Hick-Aufgabe wurden nicht beachtet, weil in der Hick-Aufgabe praktisch keine Fehler vorkamen und die Fehlerraten sehr unreliabel waren (siehe Tabelle 1). Ausserdem wird die Hick-Aufgabe typischerweise zur Operationalisierung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit eingesetzt, bei deren Analysen Fehlerraten auf Grund der niedrigen Komplexität der Bedingungen nicht von Bedeutung sind (Jensen, 2006). Auch die Fehlerraten der ersten beiden Bedingungen der Flanker-Aufgabe, die von der Komplexität her vergleichbar mit den Hick-Bedingungen waren und die Fehlerrate der ersten Swaps-Bedingung, die ebenfalls ein Mass für die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit war, wurde nicht untersucht.

Die Fehlerraten der beiden komplexesten Flanker-Bedingungen sowie der vier komplexesten Swaps-Bedingungen, wurden hingegen als Mass für höhere kognitive Fähigkeiten wie Inhibition und AG eingesetzt (Schweizer & Moosbrugger, 2004; van Leeuwen et al., 2007) und damit als Fehlerraten mit relativ hoher Komplexität betrachtet. Sie repräsentieren also komplexere Prozesse und wiesen insgesamt auch eine höhere Reliabilität auf als die Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen (siehe Tabelle 1). Es wurde also untersucht, ob die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen, mit diesen Fehlerraten korrelierten. Die Korrelationen mit den Fehlerraten der Flanker-Bedingungen sind in Tabelle 5 a und die Korrelationen mit den Fehlerraten der Swaps-Aufgabe in Tabelle 5 b dargestellt. Es sind jeweils die Korrelationen zwischen den Fehlerraten einer Aufgabe und den Reaktionszeiten dieser Aufgabe sowie der weniger komplexen Aufgabe/n dargestellt. Die Hypothese bezog sich aber nur auf die Korrelationen zwischen den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen und den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen. Die signifikanten Korrelationen sind jeweils mit Sternen markiert. Die p -Werte der nicht signifikanten Korrelationen können Anhang L entnommen werden. Für die Flanker-Aufgabe konnte die Hypothese, dass die Reaktionszeiten der weniger komplexen Aufgaben mit den Fehlerraten der komplexeren Aufgaben positiv zusammenhängen, nicht bestätigt werden. Nur die Korrelation zwischen der Reaktionszeit der zweitkomplexesten Bedingung und der Fehlerrate der komplexesten Bedingung war signifikant. Allerdings war diese Korrelation negativ. Das heisst, je schneller die Vpn in der zweitkomplexesten Bedingung waren, desto mehr Fehler machten sie in der komplexesten Bedingung.

Tabelle 5

Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen für (a) die Fehlerraten der dritten und vierten Flanker-Bedingung und (b) die Fehlerraten der vier komplexesten Swaps-Bedingungen

a.	Flanker-Fehlerraten		b.	Swaps-Fehlerraten			
	FF2*	FF3*		SF1	SF2	SF3	SF4
HR0	.02	.04	HR0	.09	.04	.08	.17*
HR1	-.07	.09	HR1	.14	.11	.10	.17*
HR2	-.09	-.06	HR2	.15*	.13	.12	.22**
FR0	-.12	-.04	FR0	.10	.14	.17*	.25****
FR1	-.03	-.10	FR1	.24**	.09	.08	.19**
FR2*	.02	-.26***	FR2*	.19**	.12	.11	.18*
FR3*	-.02	-.13	FR3*	.15*	.14*	.13	.22**
			SR0	-.02	.19**	.19**	.22**
			SR1	.09	.23**	.18*	.19**
			SR2	-.13	.13	.15*	.13
			SR3	-.15*	-.04	-.04	-.02
			SR4	-.18*	-.19**	-.17*	-.20**

Anmerkungen. Bei den Abkürzungen bezeichnet der erste Buchstabe jeweils die Aufgabe: H = Hick, F = Flanker, S = Swaps und der zweite jeweils das Leitungsmass: F = Fehlerrate, R = Reaktionszeit, wobei die verschiedenen Bedingungen jeweils aufsteigend nummeriert wurden. $N = 200$. Die komplexesten Flanker-Bedingungen sind jeweils mit Stern markiert, weil sie zufällig durchmischt in einem Aufgabenblock präsentiert wurden.

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Für die Swaps-Aufgabe konnte die Hypothese teilweise bestätigt werden. Von den 38 Korrelationen zwischen der Reaktionszeit einer weniger komplexen Bedingung und der Fehlerrate einer der vier komplexesten Swaps-Bedingungen waren 20 positiv und signifikant von null verschieden. Vpn die also in den weniger komplexen Bedingungen (z.B. die erste Flanker-Bedingung) schneller waren als andere Vpn, machten tendenziell in den komplexeren Bedingungen (z.B. die komplexeste Swaps-Bedingung) auch weniger Fehler. Die meisten positiven Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen ergaben sich für die Fehlerrate der komplexesten Swaps-Bedingung. Das ist die komplexeste Bedingung der vorliegenden Arbeit. Nicht signifi-

kant von null verschieden waren 18 Korrelationen und signifikant negative Korrelationen gab es keine.

Der Vollständigkeit halber sind in Tabelle 5 b alle Reaktionszeit-Fehler-Korrelationen der jeweils relevanten Aufgaben dargestellt, auch die Korrelationen zwischen den beiden Leistungsmassen derselben Bedingung sowie zwischen den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen und den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen. Dabei fiel ein unerwartetes Muster auf. Die Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen und den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen waren entweder nicht signifikant (zwei Koeffizienten) von null verschieden oder signifikant negativ (vier Koeffizienten). Zusätzlich waren Reaktionszeit und Fehlerrate der komplexesten Swaps-Bedingung (S4) ebenfalls negativ miteinander korreliert.

Die signifikanten Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen waren also konsistent positiv, während die Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen und den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen konsistent negativ waren.

Vpn die also z.B. in der am wenigsten komplexen Swaps-Bedingung tendenziell langsamer waren, machten in der komplexesten Swaps-Bedingung tendenziell mehr Fehler. Gleichzeitig machten z.B. Vpn, die in der komplexesten Swaps-Bedingung eher langsamer waren, weniger Fehler in den weniger komplexen Swaps-Bedingungen (z.B. Fehlerraten der dritten Swaps-Bedingung). Ausserdem waren Vpn, die in der komplexesten Swaps-Bedingung mehr Fehler machten in dieser Bedingung tendenziell etwas schneller und umgekehrt.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen mit den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen zusammenhingen. Dafür wurden alle Bedingungen entsprechend ihrer Komplexität in zwei Gruppen aufgeteilt, solche mit einer Komplexität von unter einer Sekunde und solche mit einer Komplexität von über einer Sekunde. Eine Grenze von einer Sekunde wurde gewählt, weil Jensen (2006) davon ausging, dass ab dieser Aufgabenkomplexität die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation abnimmt weil die Reaktionszeit zu einem weniger validen Mass wird, da aufgrund der Aufgabenkomplexität zunehmend mehr Fehler auftreten. Betrachtet man die mittlere Reaktionszeit aller Bedingun-

gen in Tabelle 1, so liegt diese Grenze bei der ersten Swaps-Bedingung, wobei alle Hick- und Flanker-Bedingungen zu den weniger komplexen Bedingungen gehörten und alle Swaps-Bedingungen zu den komplexeren.

Die Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen waren alle positiv oder nicht von null verschieden (Tabelle 6). Damit konnte die Hypothese teilweise bestätigt werden, dass die Reaktionszeiten von weniger komplexen Aufgaben positiv mit den Reaktionszeiten von komplexeren Aufgaben korreliert waren.

Es fiel zusätzlich auf, dass diese Korrelationen insbesondere von der Ähnlichkeit der Komplexität der Bedingungen abhingen. Die Grösse der Korrelationen nahm nämlich tendenziell pro Zeile jeweils von links nach rechts ab und pro Spalte von oben nach unten zu, sowohl für die Hick- als auch die Flanker-Aufgabe. So korrelierte z.B. die Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung mit der Reaktionszeit der am wenigsten komplexen Swaps-Bedingung zu $r = .31$ ($p < .001$) und mit der Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingung nicht mehr signifikant und nur noch zu $r = .12$ ($p = .08$). Weil die Swaps-Bedingungen in den Spalten von links nach rechts und die Hick- und Flanker-Bedingungen in den Zeilen von oben nach unten jeweils mit steigender Komplexität angeordnet waren, korrelierten insbesondere jene Bedingungen stärker miteinander, die ähnlich komplex waren. Damit war die einzige mit allen Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen korrelierte Bedingung in Tabelle 6 die am wenigsten komplexe Swaps-Bedingung. Das ist jene Swaps-Bedingung mit der niedrigsten Komplexität und damit der Komplexität, die der Komplexität der Bedingungen der Hick- und Flanker-Aufgabe am ähnlichsten war.

Damit stellte sich die Frage, ob dieses Muster, welches sich in den Korrelationen zwischen den weniger komplexen Bedingungen und den komplexeren Bedingungen zeigte, auch zu finden ist, wenn alle Korrelationen zwischen allen Bedingungen untersucht werden. Das würde einen zusätzlichen Beleg für die Hypothese liefern, dass insbesondere die Reaktionszeiten von ähnlich komplexen Bedingungen höher miteinander korrelierten als Bedingungen die sich in der Komplexität stark unterschieden.

Tabelle 6

Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen

	Swaps Reaktionszeiten				
	SR0	SR1	SR2	SR3	SR4
HR0	.15*	.03	-.01	-.02	-.01
HR1	.18*	.12	.10	.04	.05
HR2	.24**	.16*	.15*	.04	.03
FR0	.27***	.22**	.17*	.09	.09
FR1	.30***	.23**	.10	.09	.09
FR2*	.31**	.31**	.19**	.17*	.12
FR3*	.26***	.24**	.15*	.11	.11

Anmerkungen. $N = 200$. Bei den Abkürzungen bezeichnet der erste Buchstabe jeweils die Aufgabe H = Hick, F = Flanker, S = Swaps, der zweite Buchstabe jeweils das Leistungsmass. R = Reaktionszeit. Die komplexesten Flanker-Bedingungen sind jeweils mit Stern markiert, weil sie zufällig durchmischt in einem Aufgabenblock präsentiert wurden.

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Zusätzliche Analysen: Multidimensionale Skalierung. In den Analysen, die in Tabelle 6 dargestellt sind, hat sich gezeigt, dass die Bedingungen verschieden komplexer Aufgaben höher korrelierten, wenn sie sich in der Komplexität, operationalisiert über die mittlere Reaktionszeit, weniger unterschieden. Weil in diese Analyse nicht alle Korrelationen zwischen allen Bedingungen eingingen, wurde weiter untersucht, ob sich dieses Muster auch bei allen Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten aller untersuchter Bedingungen zeigte. Dafür wurde eine klassische MDS mit der `cmdscale()`-Funktion in R eingesetzt. Eine MDS wird typischerweise zur Visualisierung von relativ vielen Korrelationen verwendet. In der vorliegenden Arbeit waren das alle Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der 12 Bedingungen. Ein Beispiel für eine MDS wurde bereits in der Einleitung dargestellt (siehe Abbildung 2). Im sogenannten Radex-Modell von Guttman (1954) ergaben sich mittels MDS in den Korrelationen zwischen verschiedenen Intelligenztests zwei zentrale Dimensionen: die Aufgabenkomplexität und die spezifische Faktoren wie z.B. räumliche Fähigkeiten.

Auch in der vorliegenden Arbeit passte eine zweidimensionale Lösung gut zu den Daten ($R^2 = .96$). Mit dieser Darstellung im zweidimensionalen Raum konnte also 96% der Varianz

der Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der verschiedenen Bedingungen aufgeklärt werden. Die Lösung ist in Abbildung 20 dargestellt.

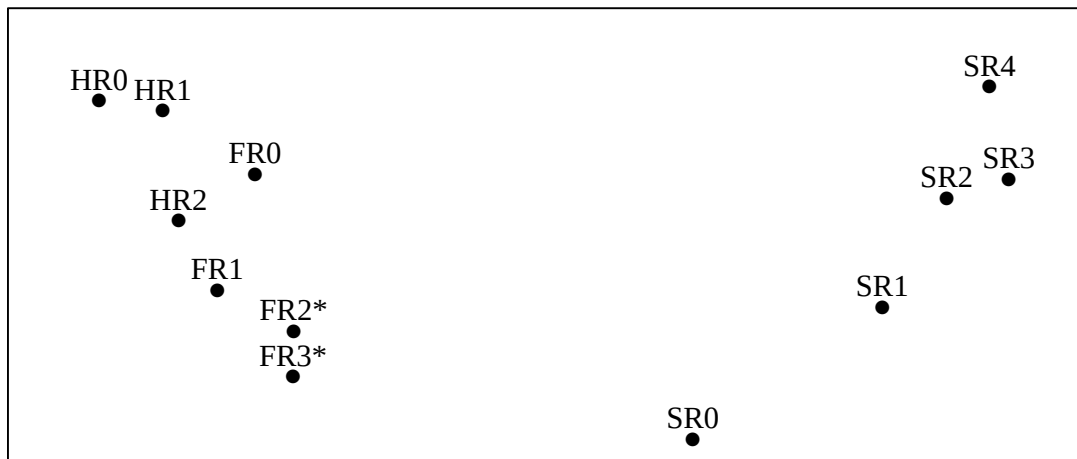


Abbildung 20. MDS der Korrelationen der mittleren Reaktionszeiten aller Bedingungen. Die Distanzen zwischen den verschiedenen Punkten entsprechen approximativ den Korrelationen zwischen den Bedingungen. Eine niedrigere Distanz entspricht einer höheren und eine höhere Distanz einer niedrigeren Korrelation. H = Hick-Bedingungen, F = Flanker-Bedingungen, S = Swaps-Bedingungen, wobei diese entsprechend der Aufgabenkomplexität aufsteigend nummeriert waren. $N = 200$.

Bei der MDS wurden zunächst alle Korrelationen zwischen den Bedingungen in Distanzen umgewandelt, wobei eine höhere Korrelation einer niedrigeren und eine tiefere Korrelation einer höheren Distanz entsprach. Mit der MDS wurden dann die verschiedenen Bedingungen räumlich so angeordnet, dass die Distanzen zwischen den Bedingungen möglichst exakt diesen Distanzen entsprachen. Aufgaben die also eine niedrige Distanz aufwiesen, waren stärker korreliert als Aufgaben die eine hohe Distanz aufwiesen. Alle Korrelationen können Anhang L entnommen werden.

Eine MDS kann wie im Modell von Guttman (1954) mittels Dimensionen (z.B. Nähe zum Zentrum) und Clustern (z.B. kristalline Intelligenz) beschrieben werden. In Abbildung 20 war eine Dimension stark von der Aufgabenkomplexität beeinflusst. Diese Dimension verlief von links nach rechts in einem Halbkreis, wobei die Reihenfolge der Bedingungen auf dem Halbkreis einigermaßen mit der Aufgabenkomplexität übereinstimmte (Aufgabenkomplexität siehe Tabelle 1). Die Bedingung mit der höchsten Komplexität (SR4) und die mit der niedrigsten

Komplexität (HR0) wiesen die grösste Distanz auf, waren also am wenigsten korreliert und befanden sich ganz links und ganz rechts auf dem Halbkreis. Die restlichen Bedingungen waren dazwischen angeordnet.

Allerdings spielten neben der Komplexität auch aufgabenspezifische Anforderungen eine wichtige Rolle. So zeigten sich von links nach rechts drei Aufgabencluster, zuerst die Hick-, dann die Flanker- und zum Schluss die Swaps-Bedingungen. Die MDS, eine explorative Methode zur Veranschaulichung von Korrelationen, konnte also die Hypothese aus der Analyse mit den wenigen komplexen und den komplexeren Bedingungen nicht eindeutig bestätigen. Zwar spielte die Aufgabenkomplexität für die Korrelationen eine wichtige Rolle, aber auch aufgabenspezifische Varianzanteile waren zentral.

Insgesamt fiel auf, dass die Fehlerraten und Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen tendenziell häufiger mit der Reaktionszeit der weniger komplexen Bedingungen korrelierten, wenn sie vergleichsweise stärker mit der Intelligenz korreliert waren (für die Korrelationen mit der Intelligenz siehe Anhang F). Die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation nahm also mit steigender Komplexität der Swaps-Bedingungen tendenziell ab und gleichzeitig nahm die Anzahl der signifikanten Korrelationen zwischen der jeweiligen Swaps-Bedingung und den Reaktionszeiten der Hick- und Flanker-Bedingungen ebenfalls tendenziell ab. Die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation nahm hingegen mit steigender Komplexität der Swaps-Bedingungen tendenziell zu. Gleichzeitig nahm auch die Anzahl der signifikanten Korrelationen zwischen der jeweiligen Swaps-Bedingung und den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen tendenziell zu.

Um weiter zu untersuchen, ob die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen (Hick und Flanker) insbesondere dann mit den Reaktionszeiten und Fehlerraten der komplexeren Bedingungen zusammenhingen, wenn diese stärker mit der Intelligenz assoziiert waren, wurde die Hypothese auch getrennt für die beiden Stichproben untersucht. Der Grund dafür war, dass in den beiden Stichproben unterschiedliche Bedingungen signifikant mit der Intelligenz korreliert waren und deshalb in den beiden Stichproben verschiedene Korrelationsmuster zu erwarten waren.

Zusätzliche Analysen: Stichprobenabhängigkeit. Um weiter zu untersuchen, ob die Fehlerraten der Swaps-Bedingungen insbesondere dann mit den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen korrelierten, wenn sie mit der Intelligenz zusammenhingen, wurden die Korrelationen getrennt für die beiden Stichproben betrachtet. Die Fehlerraten der Flanker-Aufgabe wurden nicht weiter untersucht, weil sie nicht mit der Intelligenz zusammenhingen.

In Tabelle 7 ist dieselbe Tabelle dargestellt wie in Tabelle 5 b nur getrennt für die beiden Stichproben. In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz waren nur Korrelationen mit der zweiten Swaps-Bedingung (SF1) signifikant. Das war die einzige Fehler-Bedingung, die in dieser Stichprobe mit der Intelligenz korrelierte (siehe Abbildung 13).

Tabelle 7

Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten aller Bedingungen und den Fehlerraten der Swaps-Bedingungen getrennt für die Stichprobe mit der niedrigeren (links) und der höheren Intelligenz (rechts)

	Stichprobe mit niedrigerer Intelligenz				Stichprobe mit höherer Intelligenz			
	SF1	SF2	SF3	SF4	SF1	SF2	SF3	SF4
HR0	.06	-.12	.01	.07	.15	.21	.12	.13
HR1	.10	-.02	.03	.05	.15	.23*	.11	.23*
HR2	.20	.08	.19	.12	.05	.28*	.02	.32**
FR0	.16	.11	.12	.16	-.05	.23*	.15	.37***
FR1	.37***	.07	.09	.13	-.02	.23*	.05	.39***
FR2*	.30**	.09	.11	.11	.01	.25*	.10	.27*
FR3*	.24*	.04	.05	.07	-.01	.32**	.18	.40***
SR0	.02	.16	.12	.17	-.19	.06	.06	.12
SR1	.12	.13	.03	.03	-.06	.34**	.17	.30**
SR2	-.23*	.07	.08	.01	-.16	.24*	.10	.31**
SR3	-.24*	-.14	-.10	-.13	-.14	.00	-.07	.05
SR4	-.33**	-.37***	-.36**	-.42***	-.04	-.01	-.08	.02

Anmerkungen. Bei den Abkürzungen bezeichnet der erste Buchstabe jeweils die Aufgabe H = Hick, F = Flanker, S = Swaps der zweite Buchstabe jeweils das Leistungsmass. R = Reaktionszeit, F = Fehlerrate. Die komplexesten Flanker-Bedingungen sind jeweils mit Stern markiert, weil sie zufällig durchmischt in einem Aufgabenblock präsentiert wurden. $N = 80$.

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen, gab es keine signifikanten Korrelationen mit der zweiten Swaps-Bedingung (SF1), dafür aber mit der dritten (SF2) und fünften Swaps-Bedingung (SF4). In dieser Stichprobe korrelierten nur die Fehlerraten der beiden komplexesten Bedingungen signifikant mit der Intelligenz. Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz konnte als die Hypothese weiter bestätigt werden, dass die Reaktionszeit der weniger komplexen Bedingungen insbesondere dann mit der Fehlerrate der komplexeren Bedingungen korrelierten, wenn diese ihrerseits mit der Intelligenz assoziiert waren. Für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz zeigte sich ein weniger eindeutiges Muster aber signifikant positive Korrelationen gab es verglichen mit der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz eher in den komplexeren Bedingungen (SF2 und SF4). Für beide Stichproben waren alle Korrelationen entweder signifikant positiv oder nicht von null verschieden. Eine positive Korrelation bedeutet dass Vpn die in den weniger komplexen Bedingungen schneller waren in den komplexeren Bedingungen weniger Fehler machten.

Der Vollständigkeit halber sind in Tabelle 7 auch die Korrelationen zwischen der Reaktionszeit und der Fehlerrate innerhalb einer Swaps-Bedingung sowie die Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten von komplexeren Bedingungen und Fehlerraten von weniger komplexeren Bedingungen in der Swaps-Aufgabe dargestellt. Wie in der Gesamtstichprobe zeigte sich in diesen Korrelationen ein interessantes Muster. In der Stichprobe mit der tieferen Intelligenz korrelierten in der komplexesten Swaps-Bedingung (S4) Fehlerrate und Reaktionszeit signifikant negativ miteinander. Ausserdem ergaben sich in dieser Stichprobe auch negative Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen und den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen (z.B. SR4 mit SF3). Eine negative Korrelation bedeutet, dass Vpn die in den weniger komplexen Bedingungen weniger Fehler machten, in den komplexeren eine höhere Reaktionszeit aufwiesen.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz ergaben sich keine negativen Korrelationen. Es gab abgesehen von den positiven Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen nur eine signifikant positive Korrelation. Das war die Korrelation zwischen der Reaktionszeit der dritten Swaps-Bedingung und der Fehlerrate der dritten Swaps-Bedingung (SF2 mit SR2).

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen insbesondere dann mit den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen korrelierten, wenn diese ihrerseits mit der Intelligenz zusammenhingen. Die Korrelationen sind getrennt für die Stichprobe mit der niedrigeren und der höheren Intelligenz in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8

Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen und der komplexeren Bedingungen getrennt für die Stichprobe mit der niedrigeren (links) und höheren Intelligenz (rechts)

	Stichprobe mit niedrigerer Intelligenz					Stichprobe mit höherer Intelligenz				
	SR0	SR1	SR2	SR3	SR4	SR0	SR1	SR2	SR3	SR4
HR0	.06	-.08	-.16	-.10	-.06	.24*	.14	.14	.02	.03
HR1	.11	-.02	-.10	-.09	-.03	.07	.21	.27*	.09	.05
HR2	.22*	.05	-.06	-.13	-.09	.17	.24*	.35**	.12	.09
FR0	.19	.07	-.10	-.16	-.11	.19	.26*	.36**	.20	.20
FR1	.24*	.11	-.19	-.13	-.09	.31**	.32**	.48***	.29**	.28*
FR2*	.31**	.22*	-.10	-.03	-.04	.18	.21	.34**	.19	.10
FR3*	.20	.11	-.10	-.06	-.05	.16	.28*	.39***	.16	.17

Anmerkungen. Bei den Abkürzungen bezeichnet der erste Buchstabe jeweils die Aufgabe H = Hick, F = Flanker, S = Swaps der zweite Buchstabe jeweils das Leistungsmass. R = Reaktionszeit. Die komplexesten Flanker-Bedingungen sind jeweils mit Stern markiert, weil sie zufällig durchmischt in einem Aufgabenblock präsentiert wurden. $N = 80$).

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz ergaben sich positive Korrelationen nur mit den Reaktionszeiten der zwei am wenigsten komplexen Swaps-Bedingungen (SR0 und SR1). Die am wenigsten komplexe Swaps-Bedingung (SR0) war in der Stichprobe zwar nicht signifikant mit der Intelligenz korreliert, aber nur knapp unter dem Grenzwert für eine signifikante Korrelationen (siehe Abbildung 12). Die Reaktionszeit der zweiten Swaps-Bedingung war die einzige Reaktionszeit, die in dieser Stichprobe mit der Intelligenz korrelierte.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz waren die Korrelationen über alle Bedingungen der Swaps-Aufgabe verteilt. Allerdings zeigten sich die meisten und stärksten Korrelationen in der zweiten und dritten Bedingung (SR1 und SR2). Das waren die Bedingungen, die

in dieser Stichprobe am stärksten mit der Intelligenz assoziiert waren. Auch für die Reaktionszeiten der zwei komplexesten Swaps-Bedingungen ergaben sich positive Korrelationen und diese Bedingungen waren ebenfalls signifikant mit der Intelligenz korreliert. Allerdings zeigten sich auch Korrelationen mit der am wenigsten komplexen Swaps-Bedingung, welche in dieser Stichprobe nicht mit der Intelligenz assoziiert war.

Sowohl in der Stichprobe mit der niedrigeren als auch in jener mit der höheren Intelligenz konnte also die Hypothese weitgehend untermauert werden, dass positive Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und denen der komplexeren Bedingungen vorkamen, wenn diese ihrerseits auch mit der Intelligenz korreliert oder fast korreliert waren. Allerdings ergaben sich in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz auch signifikant positive Korrelationen mit der am wenigsten komplexen Bedingung, die nicht mit der Intelligenz zusammenhing.

Zusammengefasst korrelierten also in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen insbesondere dann mit den Fehlerraten und Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen, wenn diese ihrerseits auch signifikant oder fast signifikant mit der Intelligenz assoziiert waren. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen, waren die positiven Korrelationen mehr über die verschiedenen Bedingungen verteilt, kamen aber erwartungsgemäss häufiger in den komplexeren Bedingungen vor. Allerdings war das Muster in dieser Stichprobe weniger eindeutig.

Die Struktur der Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Bedingungen: latente Ebene

Um zu untersuchen, ob sich die Zusammenhänge zwischen den mit der Intelligenz korrelierten kognitiven Aufgaben auf wenige korrelierte Faktoren reduzieren liessen, wurde eine konfirmatorische Faktorenanalyse durchgeführt. Alle manifesten Korrelationen zwischen den mit der Intelligenz assoziierten Reaktionszeiten und Fehlerraten und die entsprechenden *p*-Werte sind Anhang L zu entnehmen.

Zunächst wurde das sparsamste einfaktorielle Modell untersucht. Dabei wurde aus den Reaktionszeiten und Fehlerraten der Bedingungen ein Faktor extrahiert. Wie in Tabelle 9, Mo-

dell 1 ersichtlich, passte dieses einfaktorielle Modell nicht gut zu den Daten. Weil sich in den bisherigen Analysen immer wieder die Wichtigkeit von aufgabenspezifischen Varianzanteilen gezeigt hatte, wurde als Alternative ein Modell mit latenten Aufgabenvariablen untersucht. Dabei wurde jeweils ein Faktor aus den Reaktionszeiten der Hick (HR)-, Flanker (FR)- und Swaps (SR)-Bedingungen sowie ein Faktor aus den Fehlerraten der Swaps (SF)-Bedingungen extrahiert. Auch Modell 2 passte nicht gut zu den Daten.

Tabelle 9

Modelle für die Struktur der verschiedenen mit der Intelligenz korrelierten Reaktionszeiten und Fehlerraten

Modell	Struktur	SB χ^2	df	p	CFI	RMSEA	SRMR	AIC
1	1 Faktor	611.98	104	<.001	.34	.16	.17	9592.92
2	1 Faktor pro Aufgabe	205.79	98	<.001	.86	.07	.09	8868.30
3	SR4 auf SF	180.80	97	<.001	.89	.07	.08	8823.85
4	SR3 auf SF	173.61	96	<.001	.90	.06	.07	8794.33
5	HR2 auf FR	158.73	95	<.001	.92	.06	.07	8771.48
6	FR0 auf HR	141.20	94	<.01	.94	.05	.07	8748.55
7	FR1 auf HR	117.87	93	<.05	.97	.04	.06	8720.17
8	SR0 auf FR	110.56	92	.09	.98	.03	.05	8711.55
9	SR1 auf FR	108.71	91	.10	.98	.03	.05	8715.24

Anmerkungen. $N = 200$, HR = Hick Reaktionszeit-Faktor, FR = Flanker Reaktionszeit-Faktor, SF = Swaps Fehlerfaktor, FR0 FR1, SR0, SR1, SR3, SR4, HR2 sind die Reaktionszeiten der verschiedenen Bedingungen.

Trotzdem passte Modell 2 entsprechend dem Chiquadrat-Differenz-Test für Satorra-Bentler skalierte Modelle besser zu den Daten als Modell 1 ($SB\chi^2(6) = 177.22$, $p < .001$). Damit stellte es eine bessere Ausgangslage für das weitere, explorative Vorgehen dar. Dafür wurden wiederum Modifizierungsindikatoren eingesetzt, um herauszufinden, welche zusätzlichen Ladungen auf den latenten Variablen zugelassen werden mussten, um ein Modell zu erhalten, das besser zu den Daten passt (Rosseel, 2012). Entsprechend den Modifizierungsindikatoren wurden solche zusätzlichen Ladungen so lange spezifiziert, bis der Satorra-Bentler korrigierte

Chi-Quadratwert sich nicht mehr signifikant verbesserte. Bis zu Modell 8 resultierte jede Modifikation in einer signifikanten Verbesserung des Modellfits ($SB\chi^2(1) > 6.5, p < .01$). Modell 9 und Modell 8 unterschieden sich nicht mehr voneinander ($SB\chi^2(1) = 1.40, p = .24$), weshalb Modell 8 aufgrund der grösseren Sparsamkeit präferiert wurde. Modell 8 ist in Abbildung 21 dargestellt.

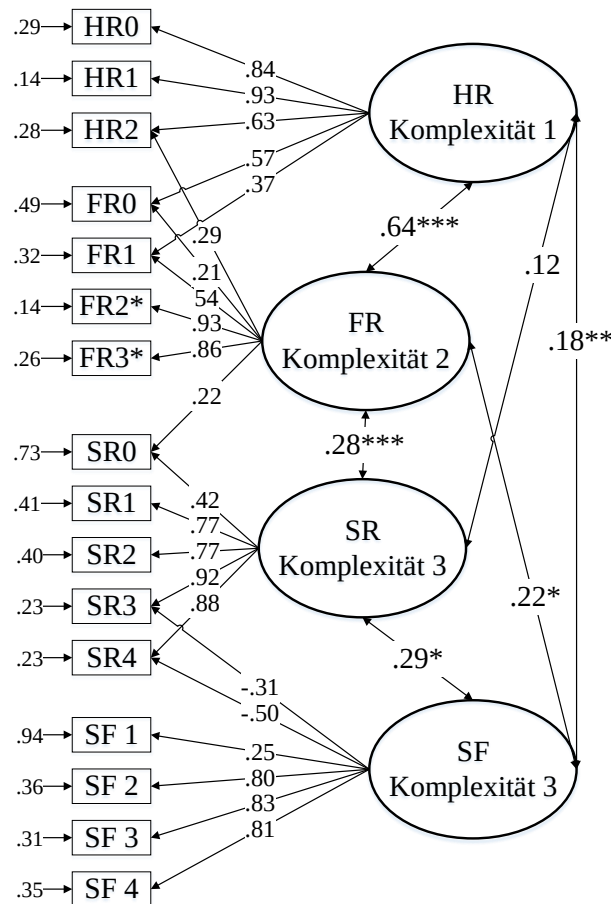


Abbildung 21. Struktur der verschiedenen komplexen Bedingungen, die mit der Intelligenz zusammenhängen. Der erste Buchstabe der Abkürzungen bezeichnet jeweils die Aufgabe und der zweite das Leistungsmaß, wobei die Bedingungen jeweils pro Aufgabe aufsteigend nummeriert wurden. H = Hick, F = Flanker, S = Swaps, R = Reaktionszeiten, F = Fehlerraten. Alle Ladungen ausser die von SF1 ($p = .08$) auf den SF-Faktor waren mit $p < .05$ signifikant. Die Korrelation zwischen SR Komplexität 3 und HR Komplexität 1 war mit $p = .19$ nicht signifikant. $N = 200$. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Mit Ausnahme der nicht signifikanten, aber dennoch positiven Korrelation zwischen HR-Komplexität1 und SR-Komplexität3 waren alle Korrelationen zwischen den latenten Variablen

signifikant und positiv. In Tabelle 9 in der Spalte Struktur ist jeweils angegeben, welche zusätzliche Ladung, verglichen mit dem vorherigen Modell, spezifiziert wurde. An Modell 8 werden nun im Folgenden die vorgenommenen Modifizierungen im Vergleich zu Modell 2 erklärt. In Modell 3 und 4 wurden negative Ladungen der Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingungen (SRT4 und SRT5) auf dem SF-Faktor zugelassen. Das entspricht den negativen Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten der Swaps-Aufgabe, die auch auf manifester Ebene gefunden wurden (Tabelle 5 b). In allen anderen Modellen (5 bis 8) wurden positive Ladungen aufgrund der Ähnlichkeit in der Komplexität zugelassen. Das passt zu der MDS-Analyse in Abbildung 20. Die Reaktionszeit der am wenigsten komplexe Swaps-Bedingung (SR0) lud wegen der niedrigeren Komplexität verglichen mit den anderen Swaps-Bedingungen ebenfalls auf dem weniger komplexen FR-Faktor. Die Reaktionszeit der komplexesten Bedingung der Hick-Aufgabe (HR2) lud wegen der höheren Komplexität verglichen mit den anderen beiden Hick-Bedingungen zusätzlich noch auf dem komplexeren FR-Faktor. Die beiden am wenigsten komplexen Bedingungen der Flanker-Aufgabe (FR0 und FR1) hingegen luden wegen der niedrigeren Komplexität verglichen mit den beiden komplexeren Flanker-Bedingungen ebenfalls noch auf dem weniger komplexen HR-Faktor. Auf dem HR Faktor luden also einerseits die Hick-Bedingungen und andererseits die am wenigsten komplexen Flanker-Bedingungen. Deshalb wurde diese latente Variable HR Komplexität 1 genannt. Auf dem FR-Faktor luden die Flanker-Bedingungen und zusätzlich die Bedingungen mit einer mittleren Komplexität: die komplexeste Hick-Bedingung (HR2) und die am wenigsten komplexe Swaps-Bedingung (SR0). Darum wurde diese latente Variable FR Komplexität 2 genannt. Bezüglich der beiden Swaps-Variablen luden alle Reaktionszeiten positiv auf dem SR-Faktor und alle Fehlerraten positiv und die Reaktionszeit der beiden komplexesten Swaps-Bedingungen negativ auf dem SF-Faktor. Da auf SR und SF die komplexesten Bedingungen dieser Arbeit luden, wurden sie zusätzlich jeweils Komplexität 3 genannt.

In einem nächsten Schritt wurde Modell 8 mit der Intelligenz kombiniert. Die Intelligenz wurde wieder durch eine latente Variable, extrahiert aus den vier CFT 20-R Skalen repräsentiert. Dieses Modell ist in Abbildung 22 dargestellt.

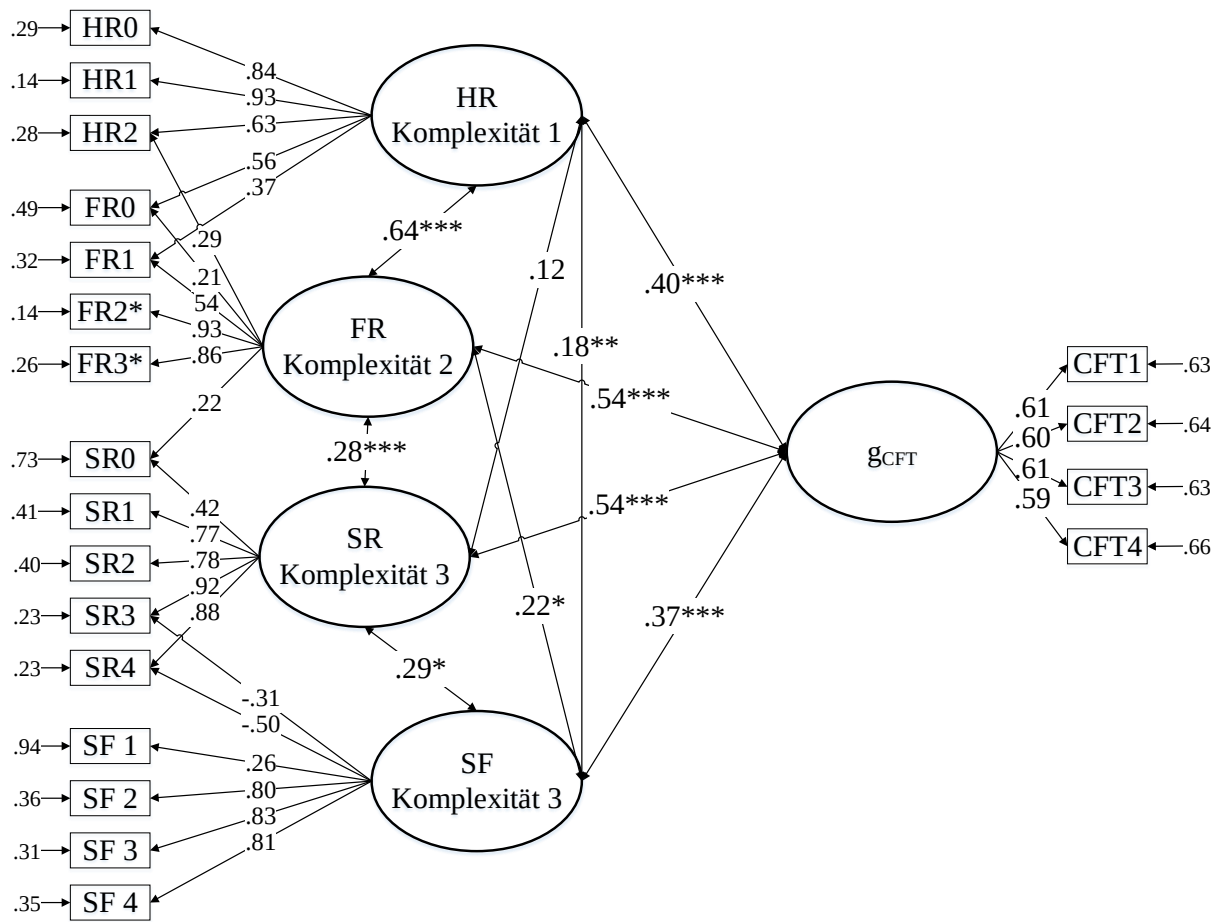


Abbildung 22. Struktur der verschiedenen komplexen Bedingungen, die mit der Intelligenz zusammenhängen sowie deren Korrelation mit der Intelligenz (g_{CFT} -Faktor). Der erste Buchstabe der Abkürzungen bezeichnet jeweils die Aufgabe und der zweite das Leistungsmass, wobei die Bedingungen jeweils pro Aufgabe aufsteigend nummeriert wurden. H = Hick, F = Flanker, S = Swaps, R = Reaktionszeiten, F = Fehlerraten. Alle Ladungen ausser die von SF1 ($p = .08$) auf dem SF-Faktor waren mit $p < .05$ signifikant. Die Korrelation zwischen SR Komplexität 3 und HR Komplexität 1 war mit $p = .19$ nicht signifikant. $N = 200$. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Das Modell passte gut zu den Daten ($SB\chi^2(154) = 184.12$, $p < .05$, CFI = .97, RMSEA = .03, SRMR = .05, AIC = 11794.57). Alle vier aus den experimentellen Aufgaben extrahierten latenten Variablen korrelierten signifikant mit dem g_{CFT} -Faktor. Damit konnte die Hypothese bestätigt werden, dass sich die Zusammenhänge zwischen den mit dem g_{CFT} -Faktor korrelierenden kognitiven Aufgaben auf wenige korrelierte Faktoren reduzieren liessen.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob sich aus den Faktoren, die aus den mit der Intelligenz korrelierenden kognitiven Aufgaben extrahiert wurden, ein allgemeiner Faktor extra-

hieren liess, der stark mit dem g_{CFT} -Faktor korrelierte. Dieser allgemeine Faktor wurde entsprechend der Empfehlung von Jensen (2006) G-Faktor genannt, um ihn nicht mit dem g-Faktor extrahiert aus Intelligenzaufgaben zu verwechseln. Das Modell ist in Abbildung 23 dargestellt.

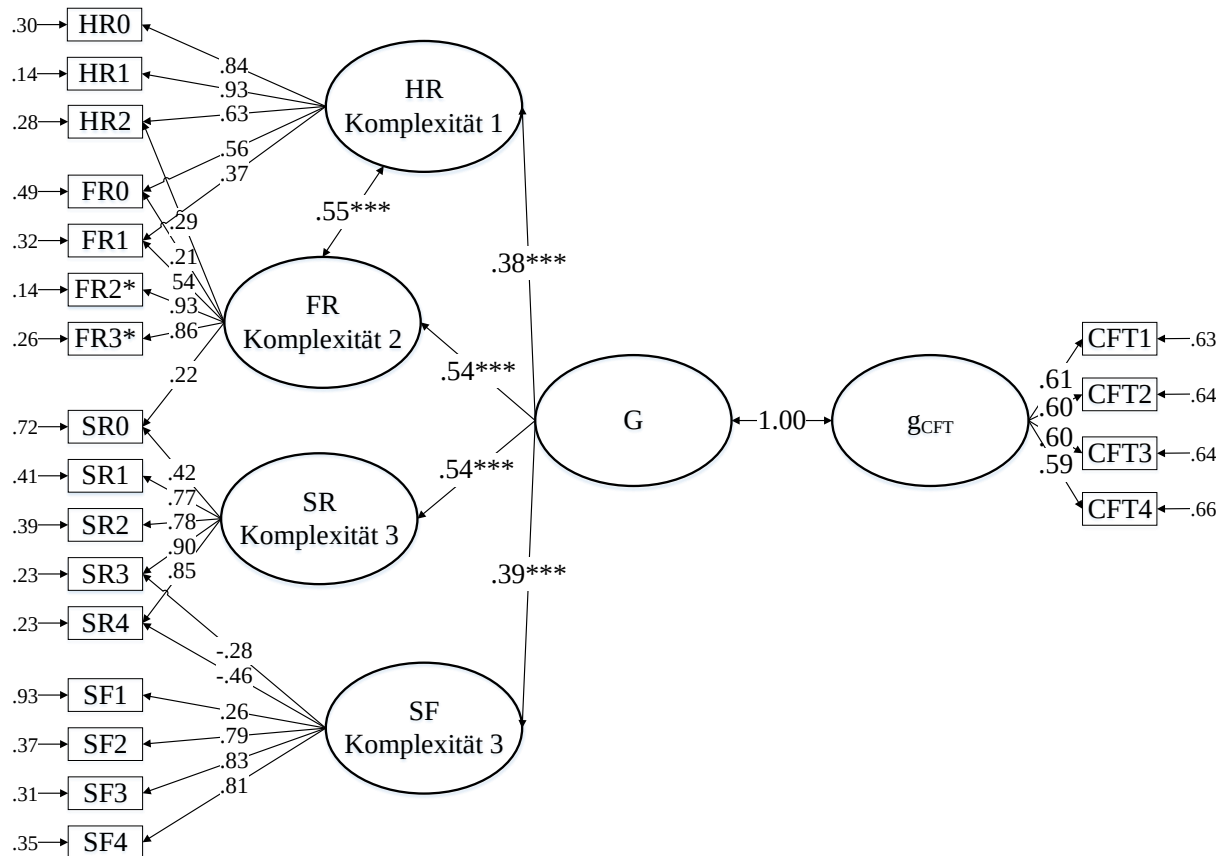


Abbildung 23. Hierarchische Struktur der verschiedenen komplexen Bedingungen, die mit der Intelligenz zusammenhängen und Korrelation mit der Intelligenz (g_{CFT} -Faktor). Der erste Buchstabe der Abkürzungen bezeichnet jeweils die Aufgabe und der zweite das Leistungsmass, wobei die Bedingungen jeweils pro Aufgabe aufsteigend nummeriert wurden. H = Hick, F = Flanker, S = Swaps, R = Reaktionszeiten, F = Fehlerraten. Alle Ladungen ausser die von SF1 ($p = .06$) auf den SF-Faktor waren mit $p < .05$ signifikant. $N = 200$.

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Aus den vier korrelierten latenten Variablen wurde mittels hierarchischer Faktorenanalyse eine weitere latente Variable, der G-Faktor, extrahiert ($SB\chi^2(159) = 207.79$, $p < .01$, CFI = .95, RMSEA = .04, SRMR = .08). Allerdings passte dieses Modell schlechter zu den Daten als das Modell mit korrelierten latenten Variablen und ohne G-Faktor ($SB\chi^2(5) = -18.59$, $p < .01$). Deshalb wurden erneut die Modifizierungsindikatoren betrachtet. Es wurde eine zusätzli-

che Korrelation zwischen HR-Komplexität 1 und FR-Komplexität 2 zugelassen. Dieses Modell passte gut zu den Daten ($SB\chi^2(158) = 187.29$, $p = .06$, CFI = .97, RMSEA = .03, SRMR = .06, AIC = 11790.94) und unterschied sich nicht signifikant vom Modell mit korrelierten latenten Variablen ohne G-Faktor ($SB\chi^2(4) = 3.26$, $p = .52$). Deshalb wurde es wegen seiner Sparsamkeit präferiert. Die Korrelation zwischen dem auf zweiter Hierarchieebene extrahierten G-Faktor und dem g_{CFT} -Faktor war mit $r = .98$ und $p < .001$ sehr hoch. Wurde die Korrelation auf eins fixiert ($SB\chi^2(159) = 186.85$, $p = .07$, CFI = .97, RMSEA = .03, SRMR = .06, AIC = 11789) verschlechterte sich der Modellfit nicht signifikant ($SB\chi^2(1) = 0.01$, $p = .93$). Das Modell ist in Abbildung 23 dargestellt.

Aus den Faktoren, die aus den experimentellen Bedingungen extrahiert wurden, konnte also ein G-Faktor extrahiert werden, der perfekt mit dem g_{CFT} -Faktor korreliert war. Allerdings muss eine zusätzliche Korrelation zwischen dem Hick- und dem Flanker-Faktor zugelassen werden.

Diskussion

Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation

Wie erwartet verlief die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität über alle untersuchten Aufgaben insgesamt kurvilinear (Jensen, 1993; Lindley et al., 1995). Gut ersichtlich wird das, wenn der erwartete Verlauf (Abbildung 3) und der empirisch gefundene Verlauf (Abbildung 10) verglichen werden. Allerdings gilt es zu betonen, dass der dargestellte Wertebereich in Abbildung 10 auf die empirischen Korrelationskoeffizienten beschränkt ist und darum nur zwischen $r = .20$ und $r = .45$ variierte. Die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen lagen also allesamt in diesem relativ engen Bereich und waren alle signifikant von null verschieden. Die niedrigsten beiden Korrelationskoeffizienten ergaben sich für die am wenigsten komplexe und die komplexeste Bedingung. Im Komplexitätsbereich dazwischen nahm die Korrelation mit steigender Komplexität zunächst zu und dann wieder ab. Die Reaktionszeiten wurden jeweils invertiert, weshalb positive Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen erwartungskonform waren.

Es gibt Arbeiten, die darauf hinweisen, dass der stärkste Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang bei Erwachsenen bei einer Komplexität von einer Sekunde zu erwarten ist (Jensen, 1993; Lindley et al., 1995). Das konnte allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. Obwohl sich insgesamt ein kurvilinearere Verlauf zeigte, hing die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation nicht nur von der Komplexität, sondern auch von den untersuchten Aufgaben ab. Sowohl für die Flanker-, als auch für die Swaps-Aufgabe, zeigt sich ein kurvilinearere Verlauf. Für die Flanker-Aufgabe war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit der dritten Bedingung und einer Komplexität von weniger als einer halben Sekunde maximal. Für die Swaps-Aufgabe hingegen war die Korrelation mit der zweiten Bedingung und einer Komplexität von über vier Sekunden maximal. Die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen der dritten Flanker-Bedingung und der zweiten Swaps-Bedingung unterschieden sich kaum. Das spricht gegen eine starre, aufgabenunabhängige Komplexitätsgrenze von einer Sekunde, bei welcher der Betrag der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation bei Erwachsenen maximal ist. Diese von Jensen (2006) vorgeschlagene Grenze ist auch empirisch schlecht belegt, da es in diesem Komplexitätsbereich nur sehr wenig Forschung gibt (Dodonova & Dodonov, 2013; Jensen, 2006;

Vigneau et al., 2002).

Wegen der Aufgabenabhängigkeit der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation werden die drei Aufgaben im Folgenden einzeln behandelt. Dafür soll zunächst nochmals kurz zusammengefasst werden, womit der kurvilineare Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang in Abhängigkeit von der Komplexität theoretisch begründet wird. Jensen (1993) erklärte die niedrige Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von wenig komplexen Aufgaben mit der unzuverlässigen Messung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit. Der Grund dafür ist, dass in wenig komplexen Aufgaben die Anzahl enthaltener kognitiver, von der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit abhängiger Prozesse gering ist. Zusätzlich ist im Verhältnis dazu der Anteil von sensomotorischen, von der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit nicht abhängigen Prozessen, hoch. Die niedrige Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation von komplexen Aufgaben hingegen erklärte er einerseits mit verschiedenen Strategien und andererseits mit einer zunehmenden Belastung des AG. Die Belastung des AG führt dazu, dass interindividuelle Unterschiede in den Reaktionszeiten in interindividuelle Unterschiede in den Fehlerraten transformiert werden (Schweizer, 1996), was die Reaktionszeit von komplexeren Aufgaben zu einem weniger validen Mass für die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit macht (Jensen, 1993). Dafür korrelieren ab einer gewissen Komplexität die Fehlerraten mit der Intelligenz.

Hick-Aufgabe. Das Muster der Hick-Aufgabe entsprach den theoretischen Erwartungen von (Jensen, 1993). Der abnehmende Anteil sensomotorischer Prozesse kann erklären, warum sich mit steigender Aufgabenkomplexität ein linearer Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation zeigte. Wie in anderen Arbeiten aufgezeigt, waren sensomotorische Anteile wie z.B. die motorische Antwortausführung in der Hick-Aufgabe über die Komplexität konstant, während kognitive Anteile mit der Komplexität zunahmen (für eine gute Zusammenfassung siehe Jensen, 2006; Neubauer, 1995). Dementsprechend nahm der relative Anteil sensomotorischer Prozesse mit steigender Komplexität ab. Die Komplexität aller drei Bedingungen war relativ niedrig. Von einer zu hohen AG-Belastung oder von strategischen Unterschieden war daher nicht auszugehen. Deshalb ergab sich in der Hick-Aufgabe erwartungsgemäss ein linearer Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation (Sheppard & Vernon, 2008). Weil die Hick-Aufgabe eine traditionelle EKA ist und im Kontext der Komplexitätshypothese ausführlich un-

tersucht wurde (Jensen, 2006), werden die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen der anderen beiden Aufgaben dieser Arbeit in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität jeweils mit der Hick-Aufgabe verglichen.

Flanker-Aufgabe. In der Flanker-Aufgabe war das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation bei einer Komplexität von unter einer halben Sekunde erreicht. Das ist eine weniger als halb so grosse Komplexität, wie von Jensen (2006) vorgeschlagen. Der Korrelationsanstieg über die ersten drei Bedingungen war linear. Auch in dieser Aufgabe kann der zunehmend weniger ins Gewicht fallende Anteil sensomotorischer Prozesse als Begründung für den linearen Anstieg angebracht werden (Jensen, 1993). Durch die gezielte Komplexitätsmanipulation war auch für die Flanker-Aufgabe zu erwarten, dass die sensomotorischen Prozesse über die verschiedenen Bedingungen relativ konstant waren, während der Einfluss der kognitiven Prozesse kontinuierlich zunahm.

Allerdings muss geklärt werden, warum die dritte Bedingung, bei welcher der imperative Reiz von kongruenten Flankern umgeben war, komplexer war als die zweite Bedingung, bei welcher nur der imperative Reiz präsentiert wurde. Das lag vermutlich an der gemeinsamen Präsentation der beiden komplexesten Flanker-Bedingungen in einem Aufgabenblock. Das machte, wie von Rinkenauer et al. (2004) gezeigt, die dritte Flanker-Bedingung komplexer als bei einer Präsentation von nur kongruenten Durchgängen in einem Aufgabenblock.

Aber womit kann der Rückgang der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität von der dritten zur vierten Flanker-Bedingung erklärt werden, obwohl alle Bedingungen eine Komplexität von unter einer Sekunde aufwiesen? Trotz ihrer relativ niedrigen Komplexität, operationalisiert über die Reaktionszeit, verlangte die Ausführung der komplexesten Flanker-Bedingung die Inhibition einer automatischen Antwort (Eriksen & Eriksen, 1974) und beanspruchte damit kontrollierte Aufmerksamkeit (Kane & Engle, 2002). Die Inhibition wurde als wichtige Komponente des AG identifiziert (Unsworth et al., 2010). Die Komplexität der beiden komplexesten Bedingungen der Flanker-Aufgabe besteht insbesondere darin, dass die Vpn, abhängig von der Kongruenz des imperativen Reizes, zwischen Ausführen und Unterdrücken der automatisch aktivierten Antwort hin und her wechseln müssen. In der dritten Flanker-Bedingung zeigten die Flanker in dieselbe Richtung wie der imperative Reiz, weshalb

hier die automatisch von den vier Flankern aktivierte Antwort ausgeführt werden konnte. In der komplexesten Bedingungen hingegen, musste die automatisch aktivierte Antwort der inkongruenten Flanker durch kontrollierte Aufmerksamkeit unterdrückt werden und die inkongruente Antwort ausgeführt werden (Eriksen & Eriksen, 1974). Diese Verarbeitungskomponente ist also der einzige Unterschied zwischen den beiden Bedingungen. Damit ist es wahrscheinlich, dass diese Verarbeitungskomponente die Ursache für den Rückgang der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der komplexesten Flanker-Bedingung im Vergleich zur dritten Flanker-Bedingung war.

In der Literatur wurde die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Aufgabenkomplexität mittels einer zu starken Beanspruchung des AG oder strategischen Unterschieden erklärt (Jensen, 2006). Beides kann dazu führen, dass die Reaktionszeiten ein weniger validen Mass für die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit sind (Jensen, 2006) und beides kann zu den signifikant höheren Fehlerraten in der vierten Flanker-Bedingung verglichen mit der dritten geführt haben. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass bestimmte Vpn in der inkongruenten Flanker-Bedingung an ihre AG-Grenzen gestossen sind. Die Vp mit der höchsten Fehlerrate löste 70% der Items korrekt und die Fehlerrate fiel im Mittel mit etwa 5% relativ gering aus. Ebenso gegen eine Überbeanspruchung des AG sprach die nicht vorhandene Korrelation zwischen der Fehlerrate der komplexesten Flanker-Bedingung und der Intelligenz. Wenn nämlich die AG-Kapazität, die stark mit der Intelligenz zusammenhängt (z.B. Conway et al., 2002), zu interindividuellen Unterschieden in den Fehlerraten geführt hätte, dann wäre eine signifikante Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation zu erwarten gewesen. Diese nicht vorhandene Korrelation konnte auch nicht auf die niedrige Reliabilität der komplexesten Flanker-Bedingung zurückgeführt werden. Diese Bedingung wies nämlich eine relativ hohe interne Konsistenz auf und war sogar höher als die Fehlerraten der dritten und vierten Bedingung der Swaps-Aufgabe, die beide signifikant mit der Intelligenz assoziiert waren.

Es scheint also plausibler, dass strategische Unterschiede zur Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der vierten Flanker-Bedingung geführt haben. Strategische Unterschiede im Antwortverhalten wurden im Rahmen des sogenannten *Speed-Accuracy-Tradeoffs* untersucht (Heitz, 2014) und konnten für eine Vielzahl verschiedener kognitiver Aufgaben

nachgewiesen werden (Heitz, 2014; Lohman, 1989). Der Einfluss von unterschiedlichen Speed-Accuracy-Tradeoffs wurde auch in der Flanker-Aufgabe nachgewiesen (Heitz, 2014; Rinkenauer et al., 2004). Es handelt sich dabei um verschiedene Antwortmuster einer Person die z.B. von der Instruktion abhängen und automatisch und unbewusst eingesetzt werden können (Heitz, 2014). Dabei kovariieren Entscheidungsgeschwindigkeit und Genauigkeit einer Entscheidung innerhalb der Person, wobei besonders schnelle Reaktionszeiten mit erhöhten Fehlerraten einhergehen. In der Instruktion der vorliegenden Arbeit wurde jeweils beides, Geschwindigkeit und Genauigkeit betont, wobei auf eine falsche Antwort ein Warnsignal folgte. Das kann zu interindividuellen Unterschieden in den Antwortmustern und damit der relativen Gewichtung der Geschwindigkeit sowie der Genauigkeit geführt haben. Im Kontext der traditionellen Flanker-Aufgabe konnte entsprechend dem Speed-Accuracy-Tradeoff gezeigt werden, dass falsch beantwortete Durchgänge in der inkongruenten Bedingung signifikant kürzere Reaktionszeiten aufwiesen als korrekt beantwortete (Rinkenauer et al., 2004). Das wurde damit erklärt, dass zunächst durch die inkompatiblen Flanker automatisch die falsche Antwort aktiviert wird, welche danach inhibiert werden muss und durch kognitive Kontrolle mit der richtigen Antwort überschrieben wird. Bricht man aber die Verarbeitung durch schnelles Antworten frühzeitig ab, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für eine falsche Antwort, weil die automatische Antwort noch nicht inhibiert werden konnte.

Wenn eine Vp stark dazu neigt, besonders schnelle Antworten abzugeben, kann die daraus resultierende, weniger ganzheitliche Bearbeitung der Aufgabe, teilweise in falschen Antworten resultieren. Eine Vp kann aber auch stark darauf achten, sicher keine Fehler zu machen aber durch die vorsichtige und ganzheitliche Betrachtung der Aufgabe tendenziell längere Reaktionszeiten aufzuweisen (Heitz, 2014).

In der vorliegenden Arbeit ist es schwierig, den Speed-Accuracy-Tradeoff isoliert zu betrachten, weil dieser nicht systematisch manipuliert wurde. Das wird z.B. damit untersucht, dass derselben Personengruppe eine Aufgabe einmal mit einer Geschwindigkeitsinstruktion und einmal mit einer Fehlervermeidungsinstruktion vorgegeben wird. Eine solche Manipulation führt bei den Vpn zu einer Verschiebung des Tradeoffs. Trotzdem können die Resultate der vorliegenden Arbeit teilweise durch Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff erklärt werden,

worauf im nächsten Abschnitt eingegangen werden soll.

Goldhammer, Naumann und Greiff (2015) haben gezeigt, wie sich auf interindividueller Ebene Effekte durch den Speed-Accuracy-Tradeoff und Intelligenzeffekte überlagern können. Das kann die Validität sowohl der Reaktionszeit als auch der Fehlerrate beeinflussen (Lohman, 1989; Sorensen & Woltz, 2015). So können Reaktionszeiten und Fehlerraten einer Aufgabe negativ korrelieren, wenn längere Reaktionszeiten mit einer ausführlicheren Verarbeitung und damit weniger Fehlern einhergehen. In diesem Fall ist der Zusammenhang zwischen beiden Massen von Effekten durch interindividuelle Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff dominiert. Reaktionszeiten und Fehlerraten können aber auch positiv korrelieren, wenn eine höhere Fähigkeit gleichermassen mit einer schnelleren und genaueren Verarbeitung einhergeht. Durch die Überlagerung von Intelligenzunterschieden und Unterschieden im Speed-Accuracy-Tradeoff können also Korrelationen zwischen der Reaktionszeit und der Fehlerrate auf interindividueller Ebene sehr unterschiedlich ausfallen (Goldhammer et al., 2015). Wenn intelligentere Vpn gleichermassen schneller und genauer sind als weniger intelligente Vpn und die Korrelation zwischen den Reaktionszeiten und den Fehlerraten einer Aufgabe in erster Linie dadurch zustande kommen, dann sollten sich positive Korrelationen zwischen den beiden Leistungsmassen ergeben. Wenn hingegen diese Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten einer Aufgabe in erster Linie durch interindividuelle Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff zustande kommen, dann sollten sich negative Korrelationen ergeben, weil schneller Vpn mehr Fehler aufweisen.

Es ist also möglich, dass die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der komplexesten Flanker-Bedingung primär durch interindividuelle Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff zustande kam. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass Vpn einen Speed-Accuracy-Tradeoff wählen, der in einem Aufgabenblock konstant bleibt, wäre zu erwarten, dass die Reaktionszeiten und Fehlerraten der dritten und vierten Flanker-Bedingung negativ miteinander korrelieren. In der dritten Flanker-Bedingung kamen kaum Fehler vor, was erklärt warum die Reaktionszeiten der dritten und vierten Flanker-Bedingung damit nicht korrelierten. In der vierten Flanker-Bedingung hingegen ergab sich eine negative Korrelation mit der Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung. Schnellere Reaktionszeiten in der dritten Flanker-

Bedingung gingen also mit höheren Fehlerraten in der vierten Flanker-Bedingung einher. Das spricht für den Einfluss unterschiedlicher Speed-Accuracy-Tradeoffs. Manche Vpn neigten im Aufgabenblock mit der dritten und vierten Flanker-Bedingung dazu, relativ schnell zu antworten, dafür aber teilweise die vierte Flanker-Bedingung nicht vollständig auszuführen. Das resultierte in falschen Antworten, weil die automatisch aktivierte Antwort nicht inhibiert werden konnte (Rinkenauer et al., 2004). Aber warum war die Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Fehlerrate der vierten Flanker-Bedingung nicht signifikant von null verschieden? Ein Grund dafür kann sein, dass in die Reaktionszeit nur korrekt beantwortet Durchgänge einfließen und damit insbesondere die schnellsten Reaktionszeiten ausgeschlossen wurden, bei welchen die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler am höchsten war (Rinkenauer et al., 2004). Die Reaktionszeit der dritten und die Fehlerrate der vierten Bedingung waren hingegen negativ korreliert, weil es in der dritten Flanker-Bedingung fast keine falschen Antworten gab, also auch schnelle Antworten korrekt waren. Das macht die Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung zu einer interessanten Aufgabe zur Erhebung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit. Sie ist durch die gemeinsame Präsentation mit der vierten Flanker-Bedingung relativ komplex, trotzdem kommen praktisch gar keine Fehler vor. Die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit kann am besten gemessen werden, wenn praktisch gar keine falschen Antworten vorkommen (Jensen, 2006). Die dritte Flanker-Bedingung ist also nicht so einfach, dass die Reaktionszeit von Varianzanteilen durch sensomotorische Aspekte dominiert wird, aber auch nicht so komplex, dass die Reaktionszeit durch falsche Antworten verunreinigt wird.

Wie bereits erwähnt, ging in der Flanker-Aufgabe die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit einer Zunahme der Fehlerrate aber nicht mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Ein ähnlicher Befund zeigte sich auch in der Arbeit von Schweizer (1998). Er arbeitete mit relativ komplexen Aufgaben (zwischen 1.5 und 8.66 Sekunden). Mit steigender Komplexität zeigte sich eine kontinuierliche Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation. Diese ging aber nicht mit einem entsprechenden systematischen Anstieg der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Der Autor wies darauf hin, dass die Fehleraten der untersuchten Aufgaben relativ niedrig waren. Auch in der vorliegenden Arbeit war die Fehlerrate der vierten Flanker-Bedingung relativ niedrig.

Auch andere Variablen wie das Alter der Vpn können einen Einfluss auf den Speed-Accuracy-Tradeoff haben (für eine Zusammenfassung siehe Heitz, 2014). So zeigten ältere Personen verglichen mit jüngeren eher ein vorsichtigeres Antwortverhalten. Sie begingen also einerseits zwar weniger Fehler, waren aber andererseits auch langsamer (Barral & Debû, 2004). In der vorliegenden Arbeit ergaben sich in den meisten Bedingungen keine signifikanten Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und dem Alter sowie zwischen den Fehlerraten und dem Alter. Allerdings wurde ein relativ enger Altersbereich untersucht. Nur die Fehlerrate der dritten Hick-Bedingung war mit dem Alter korreliert, wobei jüngere Vpn erwartungsgemäss im Vergleich zu älteren Vpn höhere Fehlerraten aufwiesen. Allerdings war die Reaktionszeit nicht mit dem Alter korreliert. Weil der Fokus dieser Arbeit auf der Intelligenz lag und das Alter weder mit der Intelligenz noch mit den Korrelaten der Intelligenz zusammenhing, wird auf diesen Effekte nicht weiter eingegangen.

Vergleicht man die Hick- und die Flanker-Aufgaben miteinander, fällt auf, dass die Reaktionszeit der Flanker-Bedingungen konsistent höher mit der Intelligenz assoziiert war als die Reaktionszeit der Hick-Bedingungen. Das obwohl die Aufgaben, abgesehen vom Reizmaterial, identisch programmiert waren, eine vergleichbare Komplexität aufwiesen und die ersten beiden Bedingungen jeweils sehr ähnlich waren. Eine mögliche Erklärung sind die unterschiedlichen Reize der beiden Aufgaben. Während in der Hick-Aufgabe der imperative Reiz immer dasselbe Pluszeichen war, basierten die imperativen Reize der Flanker-Bedingungen jeweils auf einem oder mehreren Pfeilen, die entweder nach links oder nach rechts zeigten. Das konnte zu Unterschieden in der Reiz-Verarbeitung und damit zu unterschiedlichen Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen geführt haben. Allerdings kann dieser Sachverhalt in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden, weil er nicht systematisch manipuliert wurde. Deshalb ist weitere Forschung in diesem Bereich notwendig. Dafür müssten die Eigenschaften verschiedener Stimuli gezielt experimentell manipuliert werden und der Einfluss dieser Manipulation auf den Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang untersucht werden.

Swaps-Aufgabe. In der Swaps-Aufgabe war das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation bei einer Komplexität von über vier Sekunde erreicht. Das ist eine mehr als vier Mal so grosse Komplexität, wie von Jensen (2006) vorgeschlagen. Die Reaktionszeit-In-

telligenz-Korrelation stieg über die ersten beiden Bedingungen an und nahm danach über die restlichen Bedingungen kontinuierlich ab. Auch in dieser Aufgabe kann der zunehmend weniger ins Gewicht fallende Anteil sensomotorischer Prozesse als Begründung für den Anstieg angebracht werden (Jensen, 1993). In der ersten Bedingung mussten drei Buchstaben in der richtigen Reihenfolge abgetippt werden, was einen relativ hohen Anteil sensomotorischer Prozesse beinhaltet. In der zweiten Bedingung musste zusätzlich ein mentaler Positionswechsel durchgeführt werden. Darum enthielt diese Bedingung verglichen mit der ersten mehr kognitive Prozesse. Die erste Bedingung war wenig anspruchsvoll, brauchte nur wenig kontrollierte Aufmerksamkeit, nahm aber relativ viel Zeit in Anspruch. Das kann erklären, warum diese Bedingung, trotz einer Komplexität von über einer Sekunde noch so stark mit der Intelligenz assoziiert war und die Korrelation in der zweiten Bedingung sogar noch zunahm. Die erste Bedingung war entsprechend der mittleren Reaktionszeit relativ komplex aber entsprechend der beteiligten Prozesse relativ wenig komplex. Auch in der Arbeit von Lindley et al. (1995) ergab sich in einer von drei Aufgaben ein linearer Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation über eine Sekunde hinaus. Die Autoren erklärten das ebenfalls mit dem hohen Anteil sensomotorischer Prozesse dieser Aufgabe.

Grundsätzlich war die erste Swaps-Bedingung stärker mit der Intelligenz korreliert als alle Hick-Bedingungen. Über die Gründe dafür, kann in dieser Arbeit nur spekuliert werden. Die erste Swaps-Bedingung war komplexer als die Hick-Bedingungen und beinhaltete mehr kognitive Prozesse, in denen sich interindividuelle Unterschiede in der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit akkumulieren konnten (Jensen, 2006). Eine solche kognitive Komponente, welche in der Swaps-Aufgabe aber nicht in der Hick-Aufgabe vorkam und relativ stark mit der Intelligenz zusammenhing, ist die Reiz-Antwort-Kompatibilität (Neubauer, 1995; Wilhelm & Oberauer, 2006). Verglichen mit kompatiblen Reiz-Antwort-Mustern ist die Korrelation mit der Intelligenz für Aufgaben mit inkompatiblen Reiz-Antwort-Mustern höher. Während die Antwort bei der Abfolge JKL kompatibel mit der Anordnung auf der Tastatur war, war die Antwort bei der Abfolge KLJ nicht kompatibel. Hier musste zuerst die zweite, dann die dritte und zum Schluss die erste Taste gedrückt werden. Allerdings unterschied sich die Swaps-Aufgabe auch in anderen Aspekten von der Hick-Aufgabe. Es ist also nur eine mögliche Hypothese, die in

weiterer Forschung systematisch untersucht werden müsste. Dafür könnte die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Swaps-Aufgabe für verschiedene Reiz-Antwort-Muster verglichen werden, wobei man erwarten würde, dass die inkompatiblen Durchgänge stärker mit der Intelligenz zusammenhängen. Allerdings sind für diese Analyse mehr als nur 12 Durchgänge pro Bedingung notwendig.

Womit kann aber begründet werden, dass die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation nach der zweiten Swaps-Bedingung wieder abnahm? In der Literatur wurde die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Aufgabenkomplexität mittels einer zu starken Beanspruchung des AG oder strategischen Unterschieden erklärt (Jensen, 2006). Es ist möglich, dass die Ausführung von einem Positionswechsel das AG kaum beanspruchte und deshalb die akkurate Messung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit nicht beeinträchtigt wurde. Deshalb war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in dieser Bedingung maximal. Auch Stankov und Crawford (1993) ging davon aus, dass die zweite Swaps-Bedingung kaum Anforderungen an das AG stellt, während die Anforderungen mit steigender Komplexität stetig zunehmen. Dies weil in der Bedingung nur ein Positionswechsel ausgeführt werden musste, ohne dass Zwischenschritte aktiv im Gedächtnis gehalten werden mussten. Damit kann die stetige Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation über die vier komplexesten Swaps-Bedingungen durch die zunehmende Inanspruchnahme des AG erklärt werden. Dafür spricht auch die Zunahme der Fehlerrate über diese Bedingungen. Diese stieg von der zweiten zur vierten Bedingung jeweils signifikant an, nahm aber in der fünften Bedingung nicht weiter zu. Fehler machen die Reaktionszeiten zu einem weniger präzisen Mass der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit (Jensen, 2006; Schweizer, 1996). Ebenfalls für das AG spricht, wie in Abbildung 11 dargestellt, die Tatsache, dass die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation tendenziell mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einherging. Wenn die AG-Kapazität, die stark mit der Intelligenz zusammenhängt (z.B. Conway et al., 2002), zu interindividuellen Unterschieden in den Fehlerraten führte, dann ist eine signifikante Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation zu erwarten. Während in der am wenigsten komplexen Swaps-Bedingung nur die Reaktionszeit signifikant mit der Intelligenz korreliert war, korrelierte in der komplexesten Swaps-Bedingung die Fehlerrate sogar leicht stärker mit der Intelligenz als die

Reaktionszeit.

Insgesamt spricht das dafür, dass in der Swaps-Aufgabe mit steigender Aufgabenkomplexität ein kontinuierlicher Übergang von einer signifikanten Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in eine signifikante Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation stattfand (Jensen, 2006; Schweizer, 1996).

Die Swaps-Aufgabe wurde auch in anderen Arbeiten mit der Intelligenz in Verbindung gebracht (O'Connor & Burns, 2003; Stankov, 2000; Stankov & Crawford, 1993; Stankov & Schweizer, 2007). Allerdings stimmen die Resultate der vorliegenden Arbeit nicht mit den Befunden bezüglich der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation überein. Während in der vorliegenden Arbeit alle Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen der Swaps-Aufgabe signifikant ausfielen, ergaben sich in anderen Arbeiten keine solchen Korrelationen (Stankov, 2000; Stankov & Schweizer, 2007). Allerdings wurden dort, im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit, auch falsch beantwortete Durchgänge in die Reaktionszeit-Berechnung miteinbezogen. Das kann die akurate Messung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit beeinträchtigen, weil richtigen Antworten andere Prozesse zugrunde liegen als falschen Antworten (Lohman, 1989). Daher sind Reaktionszeiten auf korrekt beantwortete Durchgänge validere Masse der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit.

In der Arbeit von O'Connor und Burns (2003), in der sich die mittlere Reaktionszeit ebenfalls nur aus korrekt beantworteten Durchgängen zusammensetzte, lud die Swaps-Aufgabe stark auf dem generellen Geschwindigkeitsfaktor (Gs). Obwohl die Intelligenz in dieser Arbeit nicht explizit untersucht wurde, ist bekannt, dass Gs auf dem g-Faktor lädt (Carroll, 1993). Das, sowie die Resultate der vorliegenden Arbeit, sprechen für einen Zusammenhang zwischen der Reaktionszeit auf korrekt beantwortete Durchgänge in der Swaps-Aufgabe und der Intelligenz.

Die vorgefundenen Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen der Swaps-Aufgabe entsprachen den Resultaten anderer Arbeiten (Stankov, 2000; Stankov & Crawford, 1993; Stankov & Schweizer, 2007). In zwei Arbeiten korrelierten die Fehlerraten der drei komplexesten Bedingungen mit der Intelligenz (Stankov & Crawford, 1993; Stankov & Schweizer, 2007). Allerdings war in der vorliegenden Arbeit im Unterschied zu diesen beiden Arbeiten, auch schon die zweite Swaps-Bedingung leicht mit der Intelligenz assoziiert. Das stimmt mit der Arbeit von Stankov

(2000) überein, wobei alle Swaps-Bedingungen auf der fluiden Intelligenz luden. Diese inkonsistenten Befunde bezüglich der Korrelation zwischen der Fehlerrate der zweiten Swaps-Bedingung und der Intelligenz könnten mit der untersuchten Stichprobe zusammenhängen. In der vorliegenden Arbeit war diese Bedingung nur in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz mit Intelligenz assoziiert. Vorstudien zur untersuchten Stichprobe von Stankov und Crawford (1993) haben gezeigt, dass die untersuchte Population eine mittlere Intelligenz von 115, mit einem Minimum von 99, aufwies. Diese Intelligenz ist eher vergleichbar mit der Stichprobe mit der höheren Intelligenz der vorliegenden Arbeit. In dieser Stichprobe war die zweite Swaps-Bedingung ebenfalls nicht mit der Intelligenz assoziiert. Ausserdem untersuchten Stankov und Crawford (1993) nur Studenten, während in der vorliegenden Arbeit darauf geachtet wurde, auch Vpn ohne Matura zu untersuchen. Zum mittleren Intelligenzquotienten der beiden anderen Studien fanden sich in den Texten keine Angaben (Stankov, 2000; Stankov & Schweizer, 2007).

Zusammenfassend wurde also insgesamt, wie vorhergesagt, ein kurvilinearere Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität gefunden. Allerdings hing dieser Verlauf von der untersuchten Aufgabe ab. In der Hick-Aufgabe stieg die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit der Komplexität der Bedingungen an, während die Korrelation sowohl in der Flanker- als auch der Swaps-Aufgabe mit steigender Komplexität zunächst zu- und dann wieder abnahm. Die maximale Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Flanker-Aufgabe war bei einer niedrigeren Komplexität erreicht als in der Swaps-Aufgabe. Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation ging für die Flanker-Aufgabe zwar mit einer Zunahme der Fehlerrate, nicht aber mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Das kann mit interindividuellen Unterschieden im Speed-Accuracy-Trade-off erklärt werden. In der Swaps-Aufgabe ging die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in den meisten Bedingungen mit einer Zunahme der Fehlerrate sowie tendenziell mit einer höheren Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Das kann mit interindividuellen Unterschieden in der AG-Kapazität erklärt werden.

Nicht nur die Aufgabenkomplexität war für die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation zentral, sondern auch aufgabenspezifische Varianzanteile waren wichtig. So korrelierten die Flanker-

ker-Bedingungen trotz vergleichbarer Aufgabenkomplexität stärker mit der Intelligenz als die Hick-Bedingungen. Zusätzlich korrelierten die Reaktionszeiten der ersten beiden Swaps-Bedingungen höher mit der Intelligenz als die Reaktionszeiten der Hick-Bedingungen, obwohl die Komplexität der Swaps-Bedingungen weit über einer Sekunde lag. Ausserdem war die maximale Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation sowohl für die Flanker- als auch die Swaps-Aufgabe trotz unterschiedlicher Aufgabenkomplexität vergleichbar hoch.

Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass für die Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation nicht nur die Aufgabenkomplexität von zentraler Bedeutung ist, sondern auch aufgabenspezifische Anforderungen sowie strategische Unterschiede wie z.B. der Speed-Accuracy-Tradeoff. Das kann mit ein Grund sein für die inkonsistenten Befunde bezüglich der Komplexitätshypothese (Frey, 2011; Sheppard & Vernon, 2008). Ein weiterer Grund kann aber auch die von Jensen (2011) vorgeschlagene Stichprobenabhängigkeit sein.

Stichprobenabhängigkeit. Um zu untersuchen, ob das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität erreicht war als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz, wurden zwei Stichproben gebildet. Eine Stichprobe bestand aus den 80 Vpn mit der höchsten und eine aus den 80 Vpn mit der niedrigsten Intelligenz. Getrennt für die beiden Stichproben wurde die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation sowie die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität betrachtet. Die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz wies mit einem mittleren Intelligenzquotienten von 95 eine Intelligenz auf, die etwas unter dem Durchschnitt von 100 lag (Weiss, 2006). Die Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen hatte im Mittel eine überdurchschnittliche Intelligenz von 124 (Weiss, 2006). Es wurde also eine Stichprobe mit einer etwa durchschnittlichen Intelligenz mit einer Stichprobe mit einer eher überdurchschnittlichen Intelligenz verglichen. Die Stichprobe mit der höheren Intelligenz wies in allen Bedingungen eine signifikant niedrigere Reaktionszeit auf als die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. In den Fehlerraten hingegen unterschieden sich die beiden Stichproben nur in der vierten und fünften Swaps-Bedingung, wobei die Stichprobe mit der höheren Intelligenz jeweils niedrigere Fehlerraten aufwies.

Der Verlauf des Zusammenhangs zwischen der Reaktionszeit und der Intelligenz in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität und der untersuchten Stichprobe zeigte ein unerwartetes Muster. Jensen (2006) ging davon aus, dass eine Stichprobe mit weniger intelligenten Vpn, im Durchschnitt länger braucht für jene Aufgabe, bei welcher die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation maximal ist, als eine Stichprobe mit intelligenteren Vpn. Er erwartete also, dass die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz bei einer höheren Komplexität maximal ist als für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz. In der vorliegenden Arbeit zeigte sich aber das Gegenteil. Die Aufgabenkomplexität wurde jeweils für beide Stichproben über die stichprobenabhängige Komplexität, operationalisiert über die mittlere Reaktionszeit der untersuchten Stichprobe, ermittelt. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation für die zweite Swaps-Bedingung bei einer Komplexität von 4072 ms maximal, für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz für die dritte Flanker-Bedingung bei einer Komplexität von 481 ms.

Aber was war der Grund für diesen Befund? Dieses Resultat hängt mit der Aufgabenabhängigkeit der maximalen Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation zusammen. In den beiden Stichproben war diese in verschiedenen komplexen Aufgaben maximal. Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz war das in einer Flanker-Bedingung und für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz in einer Swaps-Bedingung. Würde man aber nur die Swaps-Aufgabe betrachten, entspräche das Resultat der theoretischen Erwartung (Jensen, 2006). Innerhalb der Swaps-Aufgabe war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation für beide Stichproben in derselben Bedingung, nämlich der zweiten, maximal. Weil die zweite Swaps-Bedingung für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz komplexer war (höherer Mittelwert der Reaktionszeiten) als für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz, war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz bei einer niedrigeren Komplexität maximal. Es kann also vermutet werden, dass die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation insbesondere dann in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz bei einer höheren Aufgabenkomplexität maximal ist, wenn diese Korrelation in beiden Stichproben in derselben Bedingung maximal ist. Wenn aber abhängig von der Stichprobe verschiedene Aufgaben maximal mit der Intelligenz assoziiert sind, dann kann sich, wie in der vorliegenden Arbeit, ein Resultat zeigen, dass der Hypothese

widerspricht.

Vergleicht man die beiden Stichproben über alle Bedingungen hinweg, zeigte sich die Tendenz, dass in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen stärker mit der Intelligenz korrelierten und in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz die Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen. Signifikant mit der Intelligenz korrelierten waren in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz alle Hick- sowie alle Flanker-Bedingungen und zusätzlich die zweite Swaps-Bedingung. Mit einer Korrelation von $r = .20$ knapp nicht signifikant war die erste Swaps-Bedingung. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen korrelierten ausschliesslich jene Bedingungen signifikant mit der Intelligenz, welche kontrollierte Aufmerksamkeit benötigen. Das waren die beiden komplexesten Flanker-Bedingungen, die weil sie im selben Aufgabenblock präsentiert wurden, beide von der Inhibition abhingen (Kane & Engle, 2002) und die vier komplexesten Swaps-Bedingungen, für welche das AG (Stankov & Crawford, 1993) notwendig war. Mit einer Korrelation von $r = .20$ knapp nicht signifikant war die dritte Hick-Bedingung, die komplexeste der Hick-Bedingungen.

In beiden Stichproben signifikant mit der Intelligenz assoziiert waren also einzig die beiden komplexesten Flanker-Bedingungen und die zweite Swaps-Bedingung. Das waren jene Bedingungen, die nicht zu komplex waren, um in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz mit Intelligenz zu korrelieren und auch nicht zu wenig komplex, um in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz mit Intelligenz zu korrelieren.

Diese Resultate sollen im Folgenden auch getrennt für die beiden Stichproben für jede Aufgabe einzeln betrachtet und mit der bestehenden Literatur verglichen werden. Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz zeigte sich für die Hick-Aufgabe weder ein linearer Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität der Bedingungen noch ein kurvilinearere Verlauf. Das obwohl für diese Bedingungen generell ein linearer Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität nachgewiesen werden konnte (Sheppard & Vernon, 2008). Alle Bedingungen korrelierten aber signifikant mit der Intelligenz. Womit dieser Verlauf erklärt werden kann, bleibt unklar. Möglicherweise handelt es sich dabei lediglich um zufällige Schwankungen durch die Ungenauigkeit der Messung. Für die Flanker-

und die Swaps-Aufgabe ergab sich aber jeweils ein kurvilinearere Verlauf.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz zeigte sich sowohl für die Hick- als auch die Flanker-Aufgabe ein linear ansteigender Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität der Bedingungen. Nur für die Swaps-Aufgabe war der Verlauf kurvilinear, wobei das Maximum der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der zweiten Swaps-Bedingung erreicht war. Der in der Gesamtstichprobe vorgefundene lineare Anstieg in der Hick-Aufgabe zeigte sich also nur in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Der kurvilineare Verlauf der Flanker-Aufgabe in der Gesamtstichprobe zeigte sich nur in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Der kurvilineare Verlauf der Swaps-Aufgabe in der Gesamtstichprobe hingegen fand sich in beiden Stichproben gleichermassen.

In einem nächsten Schritt wurden die Aufgaben mit kurvilinearem Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität in den beiden Stichproben weiter untersucht. Wenn dieser Verlauf durch interindividuelle Unterschiede im AG erklärt werden konnte, sollte die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einhergehen, weil das AG mit der Intelligenz zusammenhängt (Conway et al., 2002) und sich interindividuelle Unterschiede im AG in die Fehlerraten verschieben (Schweizer, 1996). Für die Flanker-Aufgabe in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz traf das nicht zu. Die Fehlerrate der komplexesten Flanker-Bedingung korrelierte nicht signifikant mit der Intelligenz. Für die Swaps-Aufgabe konnte dieses Muster für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz bestätigt werden. In dieser Stichprobe ging nämlich mit der kontinuierlichen Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation über die vier komplexesten Swaps-Bedingungen eine kontinuierliche Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Damit bestätigte sich hier mit steigender Komplexität der Bedingungen der kontinuierliche Übergang von einer Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation (Jensen, 2006; Schweizer, 1996). Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz hingegen zeigte sich kein solcher Verlauf. Die Reaktionszeit sowie die Fehlerrate der zweiten Swaps-Bedingung waren die einzigen Masse, die signifikant mit der Intelligenz korreliert waren. Während also in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz die kurvilinearen Verläufe der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Flanker- und der Swaps-Aufgabe jeweils nicht

mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einhergingen, ging der kurvilineare Verlauf in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz in der Swaps-Aufgabe tendenziell mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Damit stellte sich die Frage, ob in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz die aufgeklärte Varianz der Intelligenz über die Bedingungen mit steigender Komplexität der Swaps-Aufgabe anstieg, wenn man die Reaktionszeit und die Fehlerrate in der Vorhersage der Intelligenz kombinierte. Tatsächlich zeigte sich in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz ein linearer Anstieg der aufgeklärten Varianz der Intelligenz über die verschiedenen Swaps-Bedingungen. Wenn also die Intelligenz sowohl durch die Fehlerrate als auch durch die Reaktionszeit vorausgesagt wurde, ergab sich für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz ein kontinuierlicher Anstieg der aufgeklärten Varianz der Intelligenz. Damit zeigte sich in dieser Stichprobe in allen drei Aufgaben ein linearer Anstieg der Stärke der Assoziation zwischen der Intelligenz und der Bedingung mit steigender Komplexität. Dabei wurde die Intelligenz in der Hick- und Flanker-Aufgabe mit der Reaktionszeit korreliert und in der Swaps-Aufgabe mit einer Kombination aus Reaktionszeit und Fehlerrate vorausgesagt. Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz hingegen ergab sich für keine einzige der drei Aufgaben ein kontinuierlicher Anstieg der aufgeklärten Varianz der Intelligenz.

Insgesamt korrelierten sowohl die Reaktionszeiten als auch die Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz stärker mit der Intelligenz und die Reaktionszeiten und Fehlerraten der komplexeren Bedingungen in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Ein vergleichbares Resultat wurde in einer anderen Arbeit mit der Hick-Aufgabe gefunden (Jensen, 1982). In einer Stichprobe aus Vpn mit einer niedrigeren Intelligenz korrelierte insbesondere der y-Achsenabschnitt der Regressionsgerade mit der Intelligenz. Der y-Achsenabschnitt wird nicht von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst und repräsentiert damit Prozesse mit niedriger Komplexität. In einer Stichprobe mit einer höheren Intelligenz hingegen, korrelierte insbesondere der Anstieg der Regressionsgerade mit der Intelligenz. Dieser repräsentiert die komplexitätsabhängigen Prozesse. Das heisst in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz korrelierten weniger komplexe Prozesse der Hick-Aufgabe stärker mit der Intelligenz und in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz komplexere Prozesse

der Hick-Aufgabe.

Jensen (2006) hat darauf hingewiesen, dass es schwierig ist, Aufgaben zu finden, die im gesamten Intelligenzbereich differenzieren können, weil die optimale Differenzierungsfähigkeit stark von der Aufgabenkomplexität und der Fähigkeit der Vpn abhängt. Nur die Reaktionszeit der zwei komplexesten Flanker-Bedingungen und der zweiten Swaps-Bedingung waren in beiden Stichproben signifikant mit der Intelligenz assoziiert.

Wie lassen sich aber die höheren Korrelationen der weniger komplexen Bedingungen in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz und die höheren Korrelationen der komplexeren Bedingungen in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz erklären? Die theoretischen Erklärungen für den kurvilinearen Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Aufgabenkomplexität sollten auch die Unterschiede der beiden untersuchten Stichproben in diesen Verläufen erklären können. Wie bereits erwähnt, wird der Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität theoretisch durch den immer kleiner werdenden Einfluss sensomotorischer Prozesse erklärt. Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit weiter steigender Komplexität hingegen wird mit der Kapazitätsgrenze des AG sowie strategischen Unterschieden erklärt (Jensen, 2006).

Nicht mit der Intelligenz korrelierte, sensomotorische Prozesse können aber schlecht erklären, warum weniger komplexe Bedingungen in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz stärker mit der Intelligenz korrelierten als in der Vergleichsstichprobe. Dafür müsste der relative Anteil sensomotorischer Prozesse in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz höher und der relative Anteil kognitiver Prozesse tiefer ausfallen als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Allerdings bleibt fraglich, warum in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz in einer so wenig komplexen Aufgabe wie der ersten Hick-Bedingung ein so viel grösserer Anteil kognitiver Prozesse vorkommen sollte als in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz.

Eine andere Erklärung dafür ist die relativ niedrige Varianz der Stichprobe mit der höheren Intelligenz in den wenig komplexen Bedingungen. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz war die Standardabweichung der ersten beiden Hick- sowie der zweiten Flanker-Bedingung jeweils kleiner als 40 ms, in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz hingegen über 60 ms. Möglicherweise waren also die Bedingungen nicht anspruchsvoll genug, um

in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz aussagekräftige intelligenzbedingte, interindividuelle Unterschiede abzubilden.

Um zu erklären, weshalb in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz die komplexeren Aufgaben stärker mit der Intelligenz korrelierten als in der Vergleichsstichprobe, müssen sowohl die Kapazitätsgrenze des AG als auch strategische Unterschiede kombiniert werden (Jensen, 2006). In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz zeigte sich nämlich in der Swaps-Aufgabe ein kurvilinearere Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation. Diese Korrelation wandelte sich aber allmählich in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation um. Wurden beide Leistungsmasse in der Vorhersage der Intelligenz kombiniert, erklärten die Swaps-Bedingungen mehr Varianz auf je komplexer sie waren. Das kann mit der zunehmenden Belastung des AG erklärt werden, welche zu mehr Fehlern und einer höheren Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation führte.

In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz zeigte sich aber ein anderes Resultat. Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation ging nicht mit einer Zunahme der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation einher. Der Reaktionszeit-Intelligenz-Zusammenhang der verschiedenen komplexen Bedingungen einer Aufgabe nahm jeweils ab, sobald kontrollierte Aufmerksamkeit benötigt wurde. So wie sie für die Inhibition in der vierten Flanker-Bedingung (Kane & Engle, 2002) oder das AG (Stankov & Crawford, 1993) in den komplexeren Swaps-Bedingungen nötig war. Wie in der Gesamtstichprobe können hier unbewusste strategische Unterschiede wie z.B. Unterschiede im Antwortmuster (z.B. Speed-Accuracy-Tradeoff) zu falschen Antworten geführt haben. Diese können nämlich dazu führen, dass Reaktionszeiten und Fehlerraten nicht mehr valide Masse darstellen (Lohman, 1989; Sorensen & Woltz, 2015). Aber auch andere Variablen wie z.B. unterschiedliche bewusste oder unbewusste Strategien in der Ausführung der mentalen Positionswechsel oder motivationale Probleme können dafür verantwortlich sein (Jensen, 2006). Weil diese Variablen nicht systematisch untersucht wurden, können diesbezüglich keine eindeutigen Schlüsse gezogen werden. Für zukünftige Forschung wäre es interessant zu untersuchen, wie verschiedene Manipulationen der Motivation oder der eingesetzten Strategien sich auf die Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität in den beiden Stichproben auswirken

würden.

Die Tatsache, dass in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz primär die komplexeren Aufgaben mit der Intelligenz korrelierten und in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz eher die weniger komplexen Aufgaben, kann aber auch mit dem Yerkes-Dodson-Gesetz in Verbindung gebracht werden (Yerkes & Dodson, 1908). Dieses sagt einen umgekehrt U-förmigen Verlauf zwischen Aufgabenkomplexität und Leistung voraus (Dunst et al., 2014). Je anspruchsvoller eine Aufgabe, desto mehr muss in die korrekte Ausführung dieser investiert werden. Während ein moderates Investment mit einer besonders hohen Motivation und damit einer optimalen Leistung einhergeht, lässt die Motivation und damit die Leistung bei zu einfachen oder zu anspruchsvollen Aufgaben nach. Wie anspruchsvoll eine Aufgabe für eine Vp ist, hängt von ihrer Fähigkeit ab. In der vorliegenden Arbeit war zu erwarten, dass die Bedingungen für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz anspruchsvoller waren als für die Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Das zeigte sich in der höheren Komplexität, also der höheren mittleren Reaktionszeit in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Die optimale Leistung einer Person wird also mit Aufgaben besonders gut gemessen, die nicht zu schwierig oder zu einfach für sie sind. Weil es aber von der Intelligenz abhängt, bei einer wie grossen Komplexität Leistung und damit Motivation optimal ausfallen, korrelierten in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz eher die weniger komplexen Bedingungen mit der Intelligenz und in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz eher die komplexeren Bedingungen. Das weil in diesen Bedingungen die optimale Leistung einer Vp am besten gemessen werden konnte, weil die Motivation der Vp jeweils maximal war.

Auf der Annahme, dass weniger komplexe Aufgaben besser im unteren Leistungsbereich mit der Intelligenz zusammenhängen und komplexere Aufgaben im oberen Leistungsbereich basieren rasch-homogene Intelligenz-Skalen (Moosbrugger & Kelava, 2007). In einem rasch-homogenen Intelligenztest zum Beispiel sagen ebenfalls jene Items am meisten über die Intelligenz einer Person aus, die für sie nicht zu schwierig oder zu einfach sind. Ein besonders reliables Mass der Intelligenz findet man deshalb beim adaptiven Testen, wobei den Vpn bei adaptiven Tests in erster Linie Items vorgegeben werden, die ihrer Fähigkeit entsprechen und damit nicht zu schwierig oder zu einfach für sie sind. Das sind die Items, die am meisten über

die Intelligenz der Vpn aussagen.

Die Tatsache, dass komplexere Aufgaben in der Stichprobe mit höheren Intelligenz stärker mit der Intelligenz korrelierten und weniger komplexe in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz könnten deshalb auch teilweise erklären, warum adaptiv vorgegeben Aufgaben wie die *Inspection-Time* (Fox, Roring & Mitchum, 2009) oder Aufgaben zur Erhebung der *Temporal-Resolution-Power* (Rammsayer & Brandler, 2007) trotz ihrer relativ niedrigen Komplexität vergleichsweise stark mit der Intelligenz zusammenhängen. In der *Inspection-Time*-Aufgabe zum Beispiel werden zusätzlich zu der adaptiven Vorgabe Geschwindigkeit und Genauigkeit in einer Aufgabe kombiniert. Was entsprechend der vorliegenden Arbeit ebenfalls zu einer höheren Korrelation mit der Intelligenz führen sollte, weil damit auch Unterschiede in der Präferenz für Geschwindigkeit und Genauigkeit berücksichtigt werden können. In der Aufgabe wird nämlich ein zweischenkliger Stimulus, mit einem kürzeren und einem längeren Schenkel kurz vorgegeben und dann maskiert. Die Vpn müssen dann entscheiden welcher der beiden Schenkel kürzer war. Was adaptiv an die Fähigkeit der Vpn angepasst wird, ist die Präsentationsdauer des Stimulus. Die Vpn müssen also einerseits schnell wahrnehmen können und andererseits korrekt antworten. Für zukünftige Forschung wäre es interessant zu sehen, ob z.B. die Korrelationen zwischen der Leistung und der Intelligenz in der Hick-Aufgabe höher ausfallen, wenn sie ebenfalls adaptiv vorgegeben wird. Wenn also die Präsentationsdauer des Kreuzes im Rechteck adaptiv an die Fähigkeit der Vpn angepasst wird. Das heisst es wird nur so lange präsentiert, bis die Vp meistens (als Grenzwert kommt z.B. in 75% der Fälle in Frage) richtig angeben kann, in welchem Rechteck das Kreuz erschienen ist.

Obwohl sich beim Vergleich der Stichprobe mit der höheren und der niedrigeren Intelligenz ein relativ konsistentes Muster dahingehend zeigte, dass weniger komplexe Bedingungen besser im unteren Leistungsbereich und komplexere Bedingungen besser im oberen Leistungsbereich differenzierten, waren die Unterschiede zwischen den Korrelationskoeffizienten nur selten signifikant. Wie in einem späteren Teil der Diskussion noch genauer erörtert wird, macht es aber im Kontext dieser Arbeit mehr Sinn, Höhe und Richtung der Korrelationen zu vergleichen als sie auf signifikante Unterschiedlichkeit zu prüfen.

Zusammenfassung. Im Folgenden werden alle bisher diskutierten Analysen zum Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität kurz zusammengefasst. Insgesamt zeigte sich ein kurvilinearere Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Aufgabenkomplexität. Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation ging dabei teilweise in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation über. Allerdings war das nicht immer der Fall. Zusätzlich waren auch aufgabenspezifische Varianzanteile zentral sowie Unterschiede in den Antwortmustern, wie z.B. im Speed-Accuracy-Tradeoff.

Entgegen den Erwartungen war die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz nicht bei einer niedrigeren Aufgabenkomplexität maximal als in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz war der Zusammenhang in der dritten Flanker-Bedingung bei einer Komplexität von unter einer halben Sekunde und in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz in der zweiten Swaps-Bedingung bei einer Komplexität von über vier Sekunden maximal.

Die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation nahm in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz mit steigender Aufgabenkomplexität tendenziell ab, sobald der Anteil an höheren kognitiven Prozessen wie Inhibition und AG zunahm. Das resultierte für diese Stichprobe in der Flanker- und der Swaps-Aufgabe in einem kurvilineareren Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität. Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation ging in dieser Stichprobe in beiden Fällen nicht in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation über. Das kann damit zusammenhängen, dass gewisse Bedingungen zu komplex waren, um mit der Intelligenz zu korrelieren. Es kann aber auch an unterschiedlichen Antwortmustern wie dem Speed-Accuracy-Tradeoff liegen oder an anderen Einflüssen, welche die Validität der Reaktionszeiten und Fehlerraten beeinträchtigten.

In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen ergab sich lediglich in der Swaps-Aufgabe ein kurvilinearere Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität. Die Abnahme der Korrelation mit steigender Komplexität ging in dieser Stichprobe in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation über. Wenn in der Swaps-Aufgabe jeweils Reaktionszeit und Fehlerrate der Bedingungen zur Vorhersage der Intelligenz kombiniert wurden, zeigte sich ein Anstieg des Zusammenhangs mit der Intelligenz mit steigender Komplexität. Mit einem hö-

heren Anteil höherer kognitiver Prozesse wie Inhibition und AG nahm der Zusammenhang mit der Intelligenz in dieser Stichprobe also tendenziell zu. Signifikante Intelligenz-Korrelationen kamen nur in Bedingungen vor, die diese höheren kognitiven Prozesse beinhalteten.

Weniger komplexe Bedingungen korrelierten in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz stärker mit der Intelligenz und komplexere in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz. Gründe dafür könnten die eingeschränkte Varianz der wenig komplexen Bedingungen in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz sein sowie implizite und explizite Strategien in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz. Andererseits könnten auch Motivations- und Leistungseinbussen durch Bedingungen, welche für die gegebene Stichprobe zu anspruchsvoll oder zu wenig anspruchsvoll waren dafür verantwortlich sein.

Bisher wurden nur Korrelationen mit der Intelligenz auf manifester Ebene untersucht. Obwohl auf manifester Ebene konsistent weniger komplexe Bedingungen stärker in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz mit der Intelligenz korrelierten und komplexere Bedingungen in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz unterschieden sich die Korrelationen in den meisten Fällen nicht signifikant voneinander (siehe Anhang F). Vernon und Weese (1993) haben wie bereits erwähnt betont, dass bei der Komplexitätshypothese nur das Muster der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation betrachtet werden muss, nicht aber die Signifikanz der Unterschiede. Trotzdem verstärkt ein zusätzlicher Signifikanztest die Evidenz. Eine solche Signifikanzprüfung kann auf latenter Ebene durchgeführt werden.

Doch zunächst soll erklärt werden, warum auf manifester Ebene eine rein statistische Betrachtung nach Vernon und Weese (1993) nicht zielführend ist. Bei einer Stichprobe von 200 Personen müssen sich zwei Korrelationskoeffizienten um einen Betrag von mehr als $r = .15$ unterscheiden, um signifikant voneinander abzuweichen. In einem Bereich von Korrelationskoeffizienten zwischen 0 und 1 sind damit also maximal sechs signifikant unterschiedliche Korrelationskoeffizienten überhaupt möglich. Da aber bei der Komplexitätshypothese von einem kontinuierlichen Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität ausgegangen wird, ist ein Maximum von nur sechs unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten eine implausible Annahme. Aus diesem Grund kann die Komplexitätshypothese durch ein konsistentes, immer wieder belegtes Korrelationsmuster in Abhängigkeit von leichten Verän-

derungen der Aufgabenkomplexität bestätigt werden (Vernon & Weese, 1993).

Zusätzlich ergibt sich auf manifester Ebene das Problem, dass manifeste Messungen einerseits fehlerbehaftet sind und andererseits verschiedene Komponenten enthalten. Auf latenter Ebene können sowohl Fehleranteile als auch verschiedene Komponenten voneinander getrennt werden (Schweizer, 2006b). Auf diese Weise kann untersucht werden, ob eine ausschliesslich von der Komplexitätsmanipulation abhängige Komponente, signifikant mit der Intelligenz assoziiert ist.

Isolierung der Komplexität

Hick-Aufgabe. In der Hick-Aufgabe war es nicht möglich eine komplexitätsabhängige Komponente zu isolieren. Das weil die Komponente keine signifikant von null verschiedene Varianz aufwies und damit keine aussagekräftigen interindividuellen Unterschiede vorhanden waren. Stattdessen konnten die Varianzen und Kovarianzen sowie die Mittelwerte der drei Bedingungen auf eine latente Variable reduziert werden. Dieses einfaktorielle Modell passte sehr gut zu den Daten und alle drei Bedingungen luden stark auf der latenten Variable. Ausserdem war dieser Faktor mit der Intelligenz korreliert. Die Korrelation war höher als die Korrelationen zwischen den drei Bedingungen und der Intelligenz auf manifester Ebene. Das spricht dafür, dass die Fehlervarianz auf latenter Ebene erfolgreich reduziert werden konnte. Rammsayer und Brandler (2007) fanden ein vergleichbares Modell. Eine einfaktorielle Lösung repräsentierte dieselben drei Hick-Bedingungen gut und dieser Faktor korrelierte mit der Intelligenz. Im Unterschied zu der Arbeit von Rammsayer und Brandler (2007) wurden in der vorliegenden zusätzlich noch die Mittelwerte der Reaktionszeiten der drei Bedingungen mitmodelliert, weil darüber die Komplexitätsmanipulation operationalisiert wurde. Aber warum reichte eine latente Variable aus, um die Zusammenhänge zwischen den drei Bedingungen zu repräsentieren? Ein möglicher Grund dafür kann eine lineare Abhängigkeit zwischen der nicht von der Komplexitätsmanipulation abhängigen und der komplexitätsabhängigen latenten Komponente sein (Wothke, 1993). Das bedeutet, dass die beiden extrahierten Komponenten so stark miteinander korreliert waren, dass sie nur schwer voneinander separiert werden konnten. Das kann auf zwei verschiedene Arten interpretiert werden. Die erste ist, dass die beiden Komponen-

ten tatsächlich fast perfekt miteinander korreliert waren. Die zweite ist, dass der Einfluss der Komplexitätsmanipulation nicht gross genug war, um genug zusätzliche Varianz für eine eigenständige, varianzstarke Komponente zu erzeugen. Für die zweite Möglichkeit spricht, dass sich auf manifester Ebene ein Anstieg der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität zeigte. Die Komplexitätsmanipulation hat also spezifische Varianzanteile erzeugt, die über die erste Bedingung hinaus mit der Intelligenz korreliert waren.

Zusätzlich dafür spricht, dass die Reaktionszeit der dritten Hick-Bedingung im Strukturmodell mit allen Bedingungen nicht nur auf dem Hick-Faktor, sondern auch auf dem komplexeren Flanker-Faktor lud. Diese Bedingung enthielt also komplexere Prozesse als die ersten beiden Hick-Bedingungen. Um diese Frage abschliessend beantworten zu können müsste die Hick-Aufgabe in zukünftiger Forschung mit zusätzlichen, komplexeren Bedingungen erweitert werden. Wenn sich daraus dann eine nur von der Manipulation der Komplexität abhängige Komponente mit signifikanter Varianz extrahieren liesse, würde das dafür sprechen, dass die Komplexitätsmanipulation in der vorliegenden Arbeit nicht gross genug war, um genug zusätzliche Varianz für eine eigenständige varianzstarke Komponente zu erzeugen.

Flanker-Aufgabe. In der Flanker-Aufgabe konnte eine ansteigende, ausschliesslich von der Komplexitätsmanipulation beeinflusste Komponente extrahiert werden. Diese korrelierte signifikant mit der Intelligenz und bestätigte damit den signifikanten Einfluss der Komplexitätsmanipulation auf die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation statistisch. Die Komplexitätsmanipulation bezog sich in der Flanker-Aufgabe auf Entscheidungsprozesse. Während in der ersten Bedingung keine Entscheidung getroffen werden musste, bestand die Aufgabe in allen komplexitätsabhängigen Bedingungen darin, zu entscheiden, ob ein Pfeil nach links oder nach rechts zeigte. In den beiden komplexesten Bedingungen musste zusätzlich flexibel zwischen ausführen und unterdrücken einer automatisch aktivierten Antwort hin und her gewechselt werden (Kane & Engle, 2002). Die konstante Komponente setzte sich aus allen nicht von der Entscheidung und der Inhibition abhängigen Prozessen zusammen, die auch schon in der ersten Flanker-Bedingung vorkamen. Diese konstante Komponente korrelierte höher mit der Intelligenz als die ansteigende Komponente. Das passt zu den Analysen auf manifester Ebene, bei denen auch schon die Reaktionszeit der ersten Flanker-Bedingung relativ stark mit der

Intelligenz assoziiert war. Demgegenüber fiel die Veränderung der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität relativ gering aus. Die konstante und die ansteigende Komponente waren unabhängig voneinander.

Der kurvilineare Verlauf auf manifester Ebene kann mit dem relativen Anteil der konstanten und der ansteigenden Komponente erklärt werden. Die beiden mit der Intelligenz korrelierten Komponenten erklärten den höchsten Varianzanteil der Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung. Die nicht aufgeklärte Varianz betrug in dieser Bedingung weniger als 20%. Alle anderen Bedingungen enthielten mehr nicht aufgeklärte Varianz, also Fehlervarianz und korrelierten dementsprechend auf manifester Ebene weniger stark mit der Intelligenz. Zusätzlich enthielt die Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung einen vergleichbar hohen Anteil der konstanten und der ansteigenden Komponente. Die vierte und damit komplexeste Flanker-Bedingung hingegen enthielt einen höheren Anteil der ansteigenden Komponente. Weil die ansteigende Komponente insgesamt weniger stark mit der Intelligenz korrelierte, fiel die Korrelation zwischen der Reaktionszeit der komplexesten Bedingung und der Intelligenz weniger hoch aus als die zwischen der Reaktionszeit der dritten Bedingung und der Intelligenz. Ein relativ grosser Varianzanteil der Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung und ein gewisser Varianzanteil der Reaktionszeit der komplexesten Flanker-Bedingung waren also auf basale, entscheidungs-unabhängige Informationsverarbeitungsgeschwindigkeits-Prozesse zurückzuführen, welche in allen Flanker-Bedingungen gleichermassen vorkommen und relativ stark mit der Intelligenz assoziiert waren.

Die Korrelation zwischen der ansteigenden Komponente und der Intelligenz fiel, entsprechend der Kategorisierung nach Cohen (1992), gering aus. Die Korrelation zwischen der konstanten Komponente und der Intelligenz fiel hingegen moderat aus, war aber nahe an der Grenze zu einem hohen Zusammenhang. Das kann die inkonsistenten Resultate (Bexkens et al., 2014; Friedman et al., 2006; Unsworth & Spillers, 2010; van Leeuwen et al., 2007) bezüglich der Korrelation zwischen dem Flanker-Effekt und der Intelligenz erklären. Dafür war also nicht nur die niedrige Reliabilität von Differenzmassen (Miller & Ulrich, 2013) verantwortlich. Auch die fehlerbereinigte ansteigende Komponente, welche entscheidungsspezifische Aspekte und somit auch die Inhibition beinhaltetete, korrelierte nur schwach mit der Intelligenz. Um einen so

schwachen Effekt nachweisen zu können, sind relativ grosse Stichproben notwendig. Die Flanker-Bedingungen korrelierten in erster Linie mit der Intelligenz, weil sie mit entscheidungsunabhängigen Prozessen der konstanten Komponente konfundiert waren. Dementsprechend korrelierte im Gegensatz zum Flanker-Effekt die Reaktionszeit sowohl der kongruenten als auch der inkongruenten Bedingung auch in anderen Arbeiten (Colom et al., 2007; van Leeuwen et al., 2007) mit der Intelligenz. Ausserdem wurde die Flanker-Aufgabe auch zur Operationalisierung der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit eingesetzt (Kail, 1991; Ridderinkhof & Van der Molen, 1997).

Dieses Resultat kann auch mit der Stichprobenabhängigkeit der Komplexitätshypothese in Verbindung gebracht werden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz beide Reaktionszeit-Komponenten, die konstante und die ansteigende, mit der Intelligenz korreliert waren, was dem kurvilinearen Verlauf in dieser Stichprobe entspricht. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen korrelierte nur die ansteigende Reaktionszeit-Komponente, welche kontrollierte Aufmerksamkeitsprozesse repräsentierte, mit der Intelligenz, weshalb signifikante Korrelationen nur für die Reaktionszeit der beiden komplexesten Flanker-Bedingungen vorkamen. Leider konnte diese These in der vorliegenden Arbeit empirisch nicht eindeutig überprüft werden, weil eine Stichprobe von 80 Vpn nicht ausreicht, um ein Fixed-Links-Modell für beide Stichproben getrennt zu berechnen. Für zukünftige Forschung wäre es aber sicher interessant zu sehen, ob in einer Stichprobe mit niedrigerer Intelligenz die konstante und die ansteigende Komponente mit der Intelligenz korrelieren und in einer Stichprobe mit höherer Intelligenz nur die ansteigende Komponente.

Swaps-Aufgabe. Weil in der Swaps-Aufgabe sowohl Reaktionszeiten als auch Fehlerraten mit der Intelligenz korreliert waren, wurden beide Leistungsmasse zunächst getrennt voneinander modelliert. Aus den Reaktionszeiten konnte eine ansteigende, komplexitätsabhängige Komponente extrahiert werden. Diese korrelierte signifikant mit der Intelligenz und bestätigte damit den signifikanten Einfluss der Komplexitätsmanipulation auf die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation statistisch.

Weil die konstante Komponente der Fehlerraten keine signifikante Varianz aufwies, wurde das einfaktorielle Modell dem Fixed-Links-Modell gegenüber präferiert. Aus den Fehlerraten

konnte also keine ansteigende, komplexitätsabhängige Komponente extrahiert werden. Trotzdem sah man in den mit der Komplexität ansteigenden Ladungen auf der Fehler-Komponente, die steigende Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation mit zunehmender Komplexität. Während die Fehlerraten der ersten beiden Bedingungen kaum auf der Fehler-Komponente luden, luden die Fehlerraten der anderen drei Bedingungen relativ stark darauf. Die Fehlerraten der ersten beiden Swaps-Bedingungen wiesen eine sehr hohe Residualvarianz auf. Mit der hohen Fehlervarianz, der niedrigen Fehlerzahl sowie der tiefen internen Konsistenz der ersten beiden Swaps-Bedingungen kann erklärt werden, warum die Varianz der konstanten Komponente nicht signifikant von null abwich.

Alle drei aus den Reaktionszeiten und Fehlerraten extrahierten Komponenten waren signifikant mit der Intelligenz korreliert. Grundsätzlich reagierten also intelligentere Personen in der Swaps-Aufgabe schneller und akkurater (Rabbitt, 1990). Die konstante Reaktionszeit-Komponente korrelierte höher mit der Intelligenz als die ansteigende Komponente. Darin zeigt sich der kurvilineare Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation auf manifester Ebene. Die Reaktionszeit der ersten Swaps-Bedingung setzte sich aus einem relativ grossen Anteil nicht aufgeklärter Varianz und der konstanten Komponente zusammen. Wegen dem Anteil der konstanten Komponente korreliert auch schon diese Bedingung relativ stark mit der Intelligenz. Mit steigender Komplexität nahm der Anteil der konstanten Komponente kontinuierlich ab, während der Anteil der ansteigenden, weniger stark mit der Intelligenz korrelierten Komponente, zunahm. Das führte insgesamt zunächst zu einer Zunahme und dann zu einer Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation auf manifester Ebene. Zusätzlich lud die Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingung negativ auf dem Fehlerfaktor. So war ein gewisser Varianzanteil dieser Bedingung durch diese Ladung negativ mit der Intelligenz korreliert, was ebenfalls zu einer, verglichen mit den anderen Bedingungen, niedrigeren Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation geführt hat. Auf diese negative Ladung wird in einem späteren Teil der Diskussion genauer eingegangen. Die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation der zweiten Swaps-Bedingung war maximal, weil sie verglichen zur ersten Bedingung weniger Fehlervarianz, einen grösseren Anteil der ansteigenden Komponente sowie einen zwar kleineren aber dennoch gewissen Anteil der konstanten Komponente enthielt.

Zusammenfassend korrelierte also die von der Komplexitätsmanipulation abhängige Reaktionszeit-Komponente sowohl in der Flanker- als auch in der Swaps-Aufgabe signifikant mit der Intelligenz, womit der komplexitätsabhängige Einfluss auf die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation statistisch bestätigt werden konnte. In der Hick-Aufgabe hingegen konnte keine komplexitätsabhängige Komponente extrahiert werden, was eine statistische Überprüfung der Komplexitätshypothese verhinderte. Auch aus den Fehlerraten der Swaps-Aufgabe konnte keine komplexitätsabhängige Komponente extrahiert werden, weil die konstante Komponente keine von null verschiedene Varianz aufwies. Auf dem Fehler-Faktor luden aber in erster Linie die Fehlerraten der komplexeren Bedingungen der Swaps-Aufgabe. Sowohl in der Flanker-Aufgabe als auch in der Swaps-Aufgabe korrelierte aber die konstante Komponente signifikant stärker mit der Intelligenz als die komplexitätsabhängige Komponente der Reaktionszeit und die Komponente der Fehlerraten der Swaps-Aufgabe.

Wenig komplexe Prozesse, wie sie gleichermassen in der konstanten Komponente der Flanker- und der Swaps-Aufgabe vorkamen, korrelieren also stärker mit der Intelligenz als die von der Komplexitätsmanipulation abhängigen Komponenten. Das spricht für eine *Bottom-Up-Erklärung* von Intelligenzunterschieden. Diese Erklärung kommt aus dem Mental-Speed-Ansatz und besagt, dass interindividuelle Unterschiede in der Intelligenz auf angeborene Unterschiede zurückzuführen sind. Diese Unterschiede manifestieren sich in allen kognitiven Prozessen, auch den wenig komplexen. Im Gegensatz dazu wird bei einer *Top-Down-Erklärung* davon ausgegangen, dass höhere kognitive Prozesse, wie z.B. kontrollierte Aufmerksamkeit, Intelligenzunterschieden zugrunde liegen (Neubauer, 1995).

Wenn eine strikte Bottom-Up-Erklärung für Intelligenzunterschiede verantwortlich ist, dann sollte es ausreichen, die Intelligenz alleine durch die konstante Komponente vorauszusagen, ohne dass sich der Modellfit verschlechtert. Weil diese Komponente jene Prozesse darstellt, die in allen Bedingungen gleichermassen vorkommen. Damit sollte die konstante Komponente ein gutes Mass für diese angeborenen Unterschiede darstellen. Die komplexitätsabhängigen Komponenten können auch mit der Intelligenz korrelieren. Dies aber nur weil sie mit der konstanten Komponente zusammenhängen, da sie ebenfalls von diesen angeborenen Unterschieden abhängen. Ist hingegen eine strikte Top-Down-Erklärung für Intelligenzunterschiede verantwortlich,

dann sollte es ausreichen, die Intelligenz nur durch die komplexitätsabhängigen Komponenten vorauszusagen, ohne dass sich der Modellfit verschlechtert. Der Grund dafür ist, dass in diesem Fall komplexere Prozesse wie kontrollierte Aufmerksamkeit oder Prozesse des AG Intelligenzunterschieden zugrunde liegen sollten. Die konstante Komponente korreliert in diesem Fall nur mit der Intelligenz, weil auch sie Prozesse enthält, die von der kontrollierten Aufmerksamkeit abhängen. Sie korreliert also nur mit der Intelligenz, weil sie mit den komplexitätsabhängigen Komponenten zusammenhängt.

Die Flanker-Aufgabe sprach weder für eine Bottom-Up-Erklärung noch für eine Top-Down-Erklärung. Die konstante und die ansteigende Komponente waren unabhängig voneinander. Obwohl also die konstante Komponente stärker mit der Intelligenz korrelierte, hing auch die ansteigende Komponente unabhängig davon mit der Intelligenz zusammen. Die Ergebnisse der Swaps-Aufgabe sprachen hingegen für eine Bottom-Up-Erklärung von Intelligenzunterschieden. Verglichen mit einem Modell, bei welchem alle extrahierten Komponenten mit der Intelligenz zusammenhingen, passte ein Modell, bei dem die Intelligenz nur durch die konstante Komponente vorausgesagt wurde, nicht schlechter zu den Daten. Das Modell, bei welchem die Intelligenz nur durch die komplexitätsabhängigen Komponenten vorausgesagt wurde, passte hingegen schlechter zu den Daten.

Doch wie kann ein Bottom-Up-Ansatz gelten, wenn grundsätzlich komplexere Aufgaben stärker mit der Intelligenz korreliert sind (Spearman, 1927)? Eine Antwort darauf liefert Jensen (2011) mit seiner Intelligenztheorie. Er geht davon aus, dass ein physiologisches Substrat sowohl interindividuellen Unterschieden in Reaktionszeit-Aufgaben als auch in der Intelligenz zugrunde liegt. Sein Vorschlag für ein solches Substrat ist die Oszillationsrate. Das ist die Geschwindigkeit der neuronalen Transmission von Informationen im Nervensystem. Weil die Ausführung aller kognitiven Prozesse von dieser Oszillationsrate abhängt, korrelieren sowohl die Reaktionszeiten der sehr wenig komplexen als auch der komplexen Aufgaben mit der Intelligenz. Da für die Oszillationsrate bisher keine biologische Grundlage gefunden wurde (Deary, Penke & Johnson, 2010; Mackintosh, 2011), ist sie lediglich eine Metapher. Komplexere Aufgaben korrelieren im Vergleich zu weniger komplexen Aufgaben stärker mit der Intelligenz, weil sich interindividuelle Unterschiede in der Oszillationsrate über die vielen zur Ausführung

benötigten Prozesse aufsummieren. Damit ist ein grösserer Varianzanteil auf die Oszillationsrate zurückzuführen und sie kann damit reliabler gemessen werden (Jensen, 1982, 2011). Wenig komplexe Aufgaben korrelieren also weniger stark mit der Intelligenz, weil der Einfluss der Oszillationsrate zu klein ist und durch andere Varianzanteile überlagert wird. Komplexere Aufgaben hingegen korrelieren stärker mit der Intelligenz, weil der Einfluss der Oszillationsrate reliabler gemessen werden kann. Wie stark die Ausführung einer Aufgabe von der Oszillationsrate beeinflusst wird, ergibt sich jeweils aus der Multiplikation der Oszillationsrate mit der Aufgabenkomplexität (Jensen, 2006). Wird die Reaktionszeit-Aufgabe aber zu komplex, wird die Messung der Oszillationsrate wieder weniger reliabel, weil andere Einflüsse, wie Strategien oder die begrenzte AG-Kapazität, die reliable Messung der Oszillationsrate beeinträchtigen. Dann gehen die interindividuellen Unterschiede in der Oszillationsrate in die Fehlerraten über (Jensen, 2006). Das kann den kurvilinearen Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation erklären. Danach steigt auch die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation mit zunehmender Komplexität an, weil interindividuelle Unterschiede in der Oszillationsrate darin immer besser abgebildet werden. Es ist zu erwarten, dass ab einer gewissen Komplexität dann auch die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation wieder nachlässt. Eine Aufgabe nämlich, die niemand korrekt lösen kann, kann nicht mit der Intelligenz korrelieren, weil sie keine Varianz aufweist.

Die Befunde der Swaps-Aufgabe sprechen gegen den Top-Down-Ansatz und für den Bottom-Up-Ansatz. Die Befunde zur Flanker-Aufgabe hingegen sprechen wegen der Unabhängigkeit der konstanten und der komplexitätsabhängigen Komponente weder ausschliesslich für den einen noch den anderen Ansatz. Entscheidungsspezifische Aspekte, wie sie in der komplexitätsabhängigen Komponente der Flanker-Aufgabe isoliert wurden, korrelierten also unabhängig von den Prozessen, die in allen Bedingungen gleichermassen vorkamen, mit der Intelligenz. Trotzdem fiel die Korrelation zwischen der konstanten Komponente und der Intelligenz signifikant höher aus als die Korrelation zwischen der ansteigenden Komponente und der Intelligenz. Damit sprechen auch die Befunde der Flanker-Aufgabe für die zentrale Rolle von basalen, wenig komplexen Prozessen und damit eher für einen Bottom-Up-Ansatz. Dennoch spricht die eigenständige, wenn auch kleine Korrelation zwischen der ansteigenden Komponente und der Intelligenz für eine Kombination aus Bottom-Up- und Top-Down-Ansatz.

Andererseits ist auch möglich, dass in der konstante Komponente nicht alle notwendigen Bottom-Up-Prozesse isoliert werden konnten. Diese Komponente repräsentierte nämlich entscheidungsunabhängige Prozesse, welche in allen Bedingungen, sogar den am wenigsten komplexen, enthalten waren. In der wenigsten komplexen Bedingung musste keine Entscheidung getroffen werden, da es jeweils nur eine Antwortalternative gab. Es ist als möglich, dass entscheidungsunabhängige Prozesse nicht ausreichen, um alle zentralen Bottom-Up-Prozesse zu repräsentieren und deshalb auch die ansteigende Komponente zusätzlich mit der Intelligenz assoziiert war. Der Flanker-Effekt, die Differenz zwischen der inkongruenten und der kongruenten Flanker-Bedingung, wurde nämlich sowohl mit Bottom-Up-Prozessen als auch mit Top-Down-Prozessen in Verbindung gebracht (Avital-Cohen & Tsal, 2016). Das ist allerdings nur eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen der Flanker- und der Swaps-Aufgabe. Um diese besser verstehen zu können, müsste man die Swaps-Aufgabe mit einer noch weniger komplexen Bedingung ohne entscheidungsspezifische Prozesse erweitern. Die Vpn müssten z.B. nur eine Taste drücken, sobald die drei Buchstaben auf dem Bildschirm erscheinen. Wenn dann die konstante und die ansteigenden Reaktionszeit-Komponente wie in der Flanker-Aufgabe unabhängig voneinander wären, würde das weiter für die Unabhängigkeit von nicht entscheidungsspezifischen und entscheidungsspezifischen Prozessen in der Vorhersage der Intelligenz sprechen. Klar ist aber, dass sowohl die konstante Komponente der Flanker-Aufgabe als auch die der Swaps-Aufgabe relativ hoch mit der Intelligenz korreliert waren und beide signifikant höher als die anderen extrahierten Komponenten.

In der Swaps-Aufgabe waren die ansteigende Komponente der Reaktionszeit und die Komponente extrahiert aus den Fehlerraten unabhängig voneinander. Zusätzlich lud die Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingung negativ auf der Komponente der Fehlerraten. Diese Unabhängigkeit ist interessant, weil alle Komponenten positiv mit der Intelligenz korreliert waren. Wenn Intelligenzeffekte dominieren, würde man erwarten, dass intelligentere Personen in der ansteigenden Komponente schneller und in der Fehler-Komponente genauer arbeiten. In diesem Fall sollten die beiden Komponenten positiv miteinander korrelieren. Wenn aber nur Antworttendenzen vorliegen, wie z.B. ein Speed-Accuracy-Tradeoff, dann würde man eine negative Korrelation erwarten (Goldhammer, 2015). Vpn, welche die Geschwindigkeit für eine

hohe Genauigkeit opfern, würden sehr wenig Fehler begehen aber eine längere Reaktionszeit aufweisen. Die Unabhängigkeit zwischen der ansteigenden Reaktionszeit-Komponente und der Komponente der Fehlerraten spricht dafür, dass sich Intelligenzeffekt und Antworttendenzen überlagerten. Intelligenteren Vpn antworteten in den komplexeren Bedingungen schneller und akkurater, aber wegen interindividuellen Unterschieden im Speed-Accuracy-Tradeoff nicht unbedingt beides gleichzeitig.

Um dieses Antwortverhalten besser verstehen zu können, wurde es auch im CFT 20-R weiter untersucht. Grundsätzlich gibt es in Multiple-Choice-Aufgaben mit Zeitbegrenzung zwei verschiedene Fehlerquellen: falsche Antworten und Auslassungen. Die Anzahl korrekt beantworteter Items hängt also direkt von der Anzahl falsch beantworteter und nicht bearbeiteter oder ausgelassener Items ab. Aus den falschen Antworten und den Auslassungen der vier Skalen liessen sich zwei latente Variablen extrahieren. Interindividuelle Unterschiede in den falsch beantworteten und nicht beantworteten Durchgängen waren also über die vier Bedingungen stabil. Die beiden Komponenten dieser Fehlerarten waren negativ miteinander korreliert. Mehr falsch beantwortete Durchgänge gingen also mit weniger nicht beantworteten Durchgängen einher. Intelligenteren Personen gaben also im CFT 20-R nicht gleichzeitig weniger falsche Antworten ab und liessen weniger Items aus, sondern hatten weniger falsche Antworten und/oder weniger Auslassungen, was auch wieder für Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff sprach. Würden nämlich intelligenteren Vpn gleichermassen weniger Fehler machen und weniger Items unbeantwortet lassen, müsste sich eine positive Korrelation zwischen diesen beiden Leistungsmassen ergeben. Die Korrelation war aber negativ.

Um dieses Antwortverhalten mit jenem in der Swaps-Aufgabe in Beziehung setzen zu können, wurden die beiden Aufgaben in einem Modell kombiniert (siehe Abbildung 19). Ein Modell, bei dem die Komponente der falschen Antworten im CFT 20-R nur durch die Fehler-Komponente in der Swaps-Aufgabe und die Komponente der Auslassungen im CFT 20-R nur durch die konstante Reaktionszeit-Komponente der Swaps-Aufgabe vorausgesagt wurde, passte gut zu den Daten. Es zeigten sich also über die beiden Aufgaben mit unterschiedlichen Antwortformaten interindividuell stabile Antwortpräferenzen. Wer in der Swaps-Aufgabe mehr Fehler machte, hatte auch im CFT 20-R mehr falsche Antworten. Wer in der Swaps-Aufgabe

grundsätzlich langsamer war, hatte auch im CFT 20-R mehr Auslassungen. Die Stabilität von solchen Antwortmustern über verschiedene Aufgaben hinweg konnte auch in anderen Arbeiten nachgewiesen werden (Lohman, 1979; Nietfeld & Bosma, 2003). Lohman (1979) hat gezeigt, dass interindividuelle Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff neun Mal grösser sind als intraindividuelle Unterschiede über verschiedene Aufgaben hinweg.

Doch welche Antwortmuster würden ein solches Resultat erklären? Wenn z.B. einige Vpn zu einem vorsichtigen Antwortverhalten neigten, hätten sie sowohl in der Swaps-Aufgabe als auch im CFT 20-R falsche Antworten vermeiden können. Gleichzeitig hätten sie aber durch ihr vorsichtiges Verhalten in der Swaps-Aufgabe relativ lange Reaktionszeiten aufweisen und im CFT 20-R viele Items unbeantwortet lassen können. Andere Vpn hingegen hätten zu einem weniger vorsichtigen Antwortverhalten neigen können und deshalb sowohl im CFT 20-R als auch in der Swaps-Aufgabe relativ viele Items falsch beantwortet haben können. Gleichzeitig hätten sie aber durch ihr weniger vorsichtiges Antwortverhalten im CFT 20-R nur wenige Items unbeantwortet lassen und in der Swaps-Aufgabe kurze Reaktionszeiten aufweisen können. Das impliziert also, dass Vpn mit unterschiedlichen Antwortmustern eine vergleichbare Intelligenz aufweisen können. Bei verschiedenen Vpn mit vergleichbarer Intelligenz könnten einige relativ schnell sein, dafür aber viele Fehler machen. Andere könnten wenige Fehler machen, dafür aber relativ langsam sein.

Die gleichzeitige Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation in den komplexeren Bedingungen der Swaps-Aufgabe kann also durch Unterschiede in der Gewichtung von Geschwindigkeit und Genauigkeit erklärt werden. Die Abnahme der korrekt beantworteten Durchgänge pro Skala von CFT1 bis CFT4 spricht dafür, dass die Items nicht nur innerhalb der Skalen, sondern auch über die Skalen hinweg immer anspruchsvoller wurden, was auch im Manual betont wird (Weiss, 2006). Gleichzeitig nahmen insbesondere die Auslassungen von Skala zu Skala stetig zu. Das kann nun dafür sprechen, dass die Vpn durch die höhere Schwierigkeit immer mehr Items unbeantwortet gelassen haben, weil sie die korrekte Antwort nicht gefunden haben, oder daran, dass sie nicht genug Zeit hatten, um diese zu bearbeiten. Die Dauer der Vorgabe der vier Skalen wurde aber, basierend auf empirischen Daten, so gewählt, dass zusätzliche Zeit nicht zu einem nennenswerten Anstieg der korrekt beantworteten

Items führte (Weiss, 2006). Das bedeutet also, dass zusätzliche Zeit vielleicht zu mehr falschen Antworten aber nicht zu viel mehr korrekten Antworten geführt hätte.

Die Auslassungen und die falschen Antworten waren auf latenter Ebene negativ korreliert. Die zusätzlichen negativen Korrelationen zwischen den Auslassungen und Fehlern der einzelnen Skalen deuteten darauf hin, dass diese negative Korrelation ausgeprägter war, je anspruchsvoller die untersuchte Skala war. Deshalb ergab sich eine kontinuierlich stärker ausgeprägte Residualkorrelation über die verschiedenen Skalen hinweg, die ja immer anspruchsvoller wurden (Weiss, 2006). Dafür kann es zwei Erklärungen geben. Das kann damit zu tun haben, dass durch die Schwierigkeit der Items der Skalen mehr Varianz in den Auslassungen und Fehlern vorkam, was zu höheren Korrelationen geführt hat. Es kann aber auch damit zu tun haben, dass durch die steigende Schwierigkeit der Skalen der Zeitdruck stärker wurde und die Vpn sich implizit oder explizit stärker entscheiden mussten, ob sie sich in der begrenzten Zeit stärker auf die Geschwindigkeit oder auf die Genauigkeit der Antworten fokussierten.

Womit kann aber erklärt werden, dass der Zusammenhang zwischen den Auslassungen im CFT 20-R und der konstanten Reaktionszeit-Komponente der Swaps-Aufgabe stärker war als der Zusammenhang zwischen den falschen Antworten in den beiden Aufgaben? Das kann auf Eigenschaften der Instrumente zurückgeführt werden. In der Swaps-Aufgabe wurde jeweils ein Feedbackton präsentiert, um falsche Antworten möglichst zu verhindern. Das kann insgesamt dazu geführt haben, dass sich Intelligenzunterschiede stärker in den Reaktionszeiten manifestierten. Gleichzeitig können die Bearbeitungszeiten im CFT 20-R dazu geführt haben, dass verhältnismässig wenig Vpn geraten haben und entsprechend wenige falsche Antworten abgegeben haben, weil die Zeit so berechnet war, dass sie nur die Items bearbeiten konnten, die sie potenziell noch lösen konnten. Damit manifestierten sich interindividuelle Unterschiede in der Intelligenz relativ stark in den nicht bearbeiteten Items und damit in den Auslassungen.

Für zukünftige Forschung wäre es interessant zu sehen, wie sich die Zusammenhänge zwischen den beiden Instrumenten verändern würden, wenn man den CFT 20-R ohne Zeitbegrenzung vorgeben würde oder in der Swaps-Aufgabe schnellere Reaktionszeiten stärker belohnen würde. Es wäre möglich, dass sich Intelligenzunterschiede dann stärker in den falschen Antworten beider Instrumente manifestieren, weshalb die Korrelation zwischen der Fehler-Kom-

ponente in der Swaps-Aufgabe und der Komponente der falschen Antworten im CFT 20-R stärker ausfallen würden.

Allerdings muss bei dieser These beachtet werden, dass sich im CFT 20-R bei längeren Bearbeitungszeiten zwei Probleme ergeben. Einerseits führt ein leichter zeitlicher Druck zu einer höheren Motivation und damit zu einer besseren Leistung (Breznitz, 1987; Walczyk & Griffith-Ross, 2006; Walczyk, Kelly, Meche & Braud, 1999; Weiss, 2006) und andererseits führt genügend Zeit dazu, dass manche Vpn mehr Antworten raten, was durch die Ratewahrscheinlichkeit in einer höheren Rohwertsumme resultiert. Diese Rohwertsumme würde aber die wahre Fähigkeit dieser Vpn schlechter abbildet und damit durch das Raten weniger valide sein. Wilhelm und Schulze (2002) haben aber drauf hingewiesen, dass die zeitliche Begrenzung von Intelligenztest zu einer Überschätzung der Korrelation zwischen der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und der Intelligenz führen kann. Damit stellt sich auch die Frage, ob der g_{CFT} -Faktor in der vorliegenden Arbeit so stark mit dem G-Faktor extrahiert aus den experimentellen Aufgaben korrelierte, weil im CFT 20-R die Skalen zeitlich limitiert vorgegeben wurden. Dagegen spricht, dass diese Zeitgrenzen so gewählt wurden, dass auch zusätzliche Zeit zu keinem nennenswerten Anstieg der korrekt beantworteten Items mehr führte (Weiss, 2006). Ausserdem wurden in anderen Arbeiten verschiedene, fast perfekt miteinander korrelierte g-Faktoren aus Testbatterien extrahiert, die teilweise primär Geschwindigkeit, primär Kapazität oder beides massen (Johnson et al., 2008; Valerius & Sparfeldt, 2014). Auch andere Autoren haben darauf hingewiesen, dass es für die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation keine grosse Rolle spielt, ob die Intelligenz mit oder ohne Zeitlimit erhoben wird (Vernon & Kantor, 1986; Vernon et al., 1985). Die meisten Tests enthalten sowohl eine zeitliche Komponente als auch eine Leistungskomponente, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass sowohl Geschwindigkeit als auch Fehlerraten für die Intelligenz zentral sind (Goldhammer et al., 2015; Wilhelm & Schulze, 2002).

Es macht also grundsätzlich Sinn, auch Intelligenztests mit einer gewissen Zeitbegrenzung vorzugeben. Damit wäre es für zukünftige Forschung sinnvoller, die Genauigkeit in der Swaps-Aufgabe weniger und die Geschwindigkeit mehr zu betonen, um dann zu untersuchen, wie die Swaps-Komponenten in diesem Fall mit den Komponenten des CFT 20-R zusammenhän-

gen. Die Genauigkeit der Swaps-Aufgabe könnte z.B. durch Verzicht auf den Feedbackton und Instruktionen mit Betonung auf die Geschwindigkeit weniger und die Geschwindigkeit damit mehr betont werden. Es wäre möglich, dass sich in diesem Fall interindividuelle Unterschiede in der Intelligenz stärker in den Fehlerraten manifestieren und deshalb die Fehler-Komponente in der Swaps-Aufgabe und die Komponente der falschen Antworten im CFT 20-R eine höhere Korrelation aufweisen würden.

Zusammengenommen spricht in der vorliegenden Arbeit vieles für die Überlagerung von Intelligenzeffekten, die sich in positiven Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und den Fehlerraten der verschiedenen Bedingungen manifestierten, und Antwortmustern, die sich in negativen Korrelationen manifestierten. Für Intelligenzeffekt in der Swaps-Aufgabe sprach die positive Korrelation zwischen allen extrahierten Komponenten und dem g_{CFT} -Faktor. Dabei waren alle Leistungsmasse so codiert, dass ein höherer Wert mit einer besseren Leistung einherging. Für eine zusätzliche Überlagerung mit Antworttendenzen sprachen die Unabhängigkeit zwischen der ansteigenden Reaktionszeit-Komponente und der Komponente der Fehlerraten, sowie die negative Ladung der Reaktionszeit der komplexesten Swaps-Bedingung auf der Komponente der Fehlerraten. Zusätzlich für die Überlagerung von Intelligenzeffekten und Antworttendenzen sprachen die negative Korrelation zwischen den Auslassungen und den falschen Antworten im CFT 20-R. Diese negative Korrelation, die für die Dominanz von Antworttendenzen sprach, trat auf, obwohl die Leistung im g_{CFT} -Faktor von beiden Fehlerarten gleichermaßen negativ abhing. Je mehr Auslassungen und je mehr falsche Antworten die Vpn nämlich aufwiesen, desto niedriger war ihre Leistung auf dem g_{CFT} -Faktor. Ebenfalls für den Einfluss von Antwortmustern wie dem Speed-Accuracy-Tradeoff sprachen die abnehmenden Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelationen mit steigender Komplexität der Bedingungen, die zwar in höhere Fehlerraten, nicht aber in höhere Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen übergingen. Das sprach nämlich dafür, dass dieser Übergang in die Fehlerraten nicht durch die erreichte Kapazitätsgrenze standfand, weil sonst die Fehlerrate mit der Intelligenz hätte korrelieren müssen. Deshalb kamen dafür Antwortmuster wie interindividuelle Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff in Frage. Das wurde durch negative Fehlerrate-Reaktionszeit-Korrelationen in diesen Bedingungen noch untermauert. Zusätzlich sprach das spezifische Vorhersagemuster der Swaps- und

CFT 20-R-Komponenten dafür, dass diese Antwortmuster konsistent über verschiedene Antwortformate auftraten. Weil der CFT 20-R als Papier-Bleistift-Version vorgegeben wurde und keine Reaktionszeiten auf spezifische Items erhoben wurden, ist es in der vorliegenden Arbeit lediglich möglich, den Einfluss von Antwortmustern und Intelligenzeffekten zu beschreiben. Eine systematische Untersuchung dieser ist aber nicht möglich. Das war auch nicht Ziel der vorliegenden Arbeit und bedarf weiterer Forschung.

Was aber noch untersucht werden konnte war, ob die Antworttendenzen systematisch mit der Intelligenz korrelierten. Dafür wurde aus den beiden Fehlerarten des CFT 20-R der von Phillips und Rabbitt (1995), in Anlehnung an Salkind und Wright (1977), vorgeschlagene Impulsivitätswert berechnet. Wer relativ zur untersuchten Stichprobe schnell war, also viele Items bearbeitete, aber auch viele Fehler machte, wies einen hohen Impulsivitätswert auf. Wer hingegen wenig Fehler machte und langsam war, wies einen niedrigen Impulsivitätswert auf. Wer gleichermassen schnell war und wenige Fehler machte oder langsam war und viele Fehler machte, hatte einen Wert nahe null. Dieser Impulsivitätswert korrelierte in der vorliegenden Arbeit nicht signifikant mit der Intelligenz. Die Antwortmuster hingen also nicht systematisch mit der Intelligenz zusammen. Die Vpn neigten also unabhängig von ihrer Intelligenz eher zu schnellen Reaktionen mit mehr Fehlern oder weniger Fehlern mit langsameren Reaktionen. Die relative Häufigkeit von falsch beantworteten Items und nicht beantworteten Items in Multiple-Choice-Aufgaben hängt aber z.B. positiv mit dem Risikoverhalten zusammen (Lesage, Valcke & Sabbe, 2013).

Zusammenfassung. Insgesamt konnten die Korrelation der Reaktionszeiten innerhalb der drei untersuchten Aufgaben (Hick, Flanker, Swaps) sowie der Fehlerraten der Swaps-Aufgabe auf wenige latente, mit der Intelligenz korrelierte, Variablen reduziert werden. Nur bei den Reaktionszeiten der Hick-Aufgabe und den Fehlerraten der Swaps-Aufgabe konnte die komplexitätsabhängige Komponente nicht von einer konstanten Komponente getrennt werden, weil mindestens eine der Komponenten keine von null verschiedene Varianz aufwies. In der Hick-Aufgabe lag das vermutlich am geringen Komplexitätsunterschied zwischen den Bedingungen und in der Swaps-Aufgabe an der niedrigen Reliabilität der Fehlerraten der am wenigsten komplexen Bedingung. Wenn eine komplexitätsabhängige, ansteigende Komponente aus

der Aufgabe extrahiert wurde, korrelierte diese auch mit der Intelligenz, aber jeweils weniger stark, als die konstante Komponente, die nicht von der Komplexitätsmanipulation beeinflusst wurde. Das spricht für eine der Intelligenz zugrunde liegende Komponente, die in allen kognitiven Aufgaben gleichermassen vorkommt und damit für eine Bottom-Up-Erklärung von Intelligenzunterschieden.

In den Aufgaben mit Anteilen der kontrollierten Aufmerksamkeit (Flanker und Swaps) wurden neben Intelligenzeffekten auch Antworttendenzen festgestellt. In der Flanker-Aufgabe wurden diese durch die negative Korrelation zwischen der Reaktionszeit der am stärksten mit der Intelligenz korrelierten Bedingung und der Fehlerrate der komplexesten Bedingung festgestellt. In der Swaps-Aufgabe wurden sie durch die Unabhängigkeit der Fehler-Komponente und der ansteigenden Reaktionszeit-Komponente sowie der negativen Ladung der Reaktionszeit der komplexesten Bedingung auf der Fehler-Komponente festgestellt. Dieses Antwortmuster sagte vergleichbare Tendenzen im CFT 20-R voraus. Das sprach für stabile interindividuelle Unterschiede solcher Antwortmuster über verschiedene Antwortformate hinweg. Die Korrelationen mit der Intelligenz fielen insgesamt latent höher aus als manifest, was für eine erfolgreiche Fehlerreduktion spricht.

In den Analysen mit Fixed-Links-Modellen wurden jeweils nur die Zusammenhänge der Reaktionszeiten und Fehlerraten der Bedingungen einer Aufgabe untersucht. In einem nächsten Schritt wurden dann die Zusammenhänge zwischen allen untersuchten Bedingungen betrachtet. Diese Analyse hatte zum Ziel, die Frage zu beantworten, ob die Reaktionszeiten von weniger komplexen Bedingung mit den Fehlerraten und den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen zusammenhängen.

Struktur: manifest

Reaktionszeiten von wenig komplexen und Fehlerraten von komplexeren Bedingungen. Für diese Analysen wurden die Fehlerraten der zwei komplexesten Flanker-Bedingungen und der vier komplexesten Swaps-Bedingungen untersucht, weil diese Bedingungen mit höheren kognitiven Fähigkeiten wie der kontrollierten Aufmerksamkeit in Verbindung gebracht wurden (Schweizer & Moosbrugger, 2004; van Leeuwen et al., 2007). Dabei wurde jeweils un-

tersucht, ob die Reaktionszeiten aller weniger komplexen Bedingungen, operationalisiert über die mittlere Reaktionszeit, mit den Fehlerraten dieser Bedingungen zusammenhängen.

Die Fehlerraten der beiden komplexesten Flanker-Bedingungen korrelierten in den meisten Fällen nicht signifikant mit den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen. Es gab nur eine signifikante Korrelation und die war entgegen den Erwartungen negativ. Die Reaktionszeit der kongruenten Bedingung korrelierte negativ mit der Fehlerrate der inkongruenten Bedingung. Wer also tendenziell in der kongruenten Bedingung schneller war, macht in der inkongruenten Bedingung mehr Fehler. Wie bereits erörtert, kann das mit interindividuellen Unterschieden im Speed-Accuracy-Tradeoff erklärt werden. Vpn die also im Aufgabenblock mit den zwei komplexesten Flanker-Bedingungen dazu neigten schneller zu antworten, waren zwar in der dritten Bedingung schneller, machten in der komplexesten Bedingung aber mehr Fehler. Damit konnte also mit den Fehlerraten der Flanker-Aufgabe die Hypothese nicht bestätigt werden, dass die Reaktionszeiten von weniger komplexen Bedingungen positiv mit den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen zusammenhängen.

Die Fehlerrate der komplexesten Swaps-Bedingung korrelierte mit allen Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen signifikant und war auch die Bedingung mit der stärksten Intelligenz-Korrelation. Die Fehlerraten der zweiten bis vierten Swaps-Bedingung korrelierten zwar auch alle mit mindestens einer Reaktionszeit der weniger komplexen Bedingungen, aber keine korrelierte mit allen Reaktionszeiten. Insgesamt waren die Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Fehlerraten der komplexen Bedingungen in der Swaps-Aufgabe durchweg positiv, aber nicht immer signifikant. Damit konnte also für die Fehlerraten der Swaps-Aufgabe die Hypothese teilweise bestätigt werden, dass die Reaktionszeiten von weniger komplexen Bedingungen positiv mit den Fehlerraten der komplexeren Bedingungen zusammenhängen. Dabei ergaben sich tendenziell mehr signifikant positive Korrelationen, je stärker die Fehlerrate mit der Intelligenz zusammenhing.

Der Vollständigkeit halber wurden auch die Korrelationen zwischen der Reaktionszeit und Fehlerrate innerhalb einer Bedingung sowie zwischen den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen und den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen betrachtet. Dabei zeigte sich ein interessantes Bild. Diese Korrelationen waren alle entweder nicht signifikant oder

signifikant negativ. Das spricht wie in der Flanker-Aufgabe für Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff, wobei Vpn, die z.B. in der komplexesten Swaps-Bedingung dazu neigten schneller zu antworten, auch mehr Fehler machen.

Reaktionszeiten von wenig komplexen und komplexen Bedingungen. In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen mit den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen zusammenhingen. Weil (Jensen, 2006) von einer Komplexitätsgrenze von einer Sekunde ausging, nach der die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität wieder abnimmt, wurde für die Unterteilung in komplexere und weniger komplexe Bedingung dieser Grenzwert gewählt. Die Hick- und die Flanker-Aufgabe gehörten zu den weniger komplexen Bedingungen und die Swaps-Aufgabe zu den komplexeren Bedingungen. Wie erwartet korrelierten die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen oft signifikant mit den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen. Die Analysen ergaben, dass die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen insbesondere dann mit den komplexeren Bedingungen zusammenhingen, wenn sich diese in der Komplexität am wenigsten von ihnen unterschieden. Darum ergaben sich die meisten signifikanten Korrelationen mit der am wenigsten komplexen Swaps-Bedingung. Um weiter zu untersuchen, ob die Reaktionszeiten der verschiedenen Bedingungen tatsächlich insbesondere dann am stärksten korrelierten, wenn sie ähnlich komplex waren, wurden die Zusammenhänge zwischen allen untersuchten Bedingungen mittels MDS dargestellt (siehe Abbildung 20). Die Distanz zwischen den Bedingungen zeigte dabei, wie stark diese miteinander korrelierten, wobei stärker korrelierte eine niedrigere Distanz aufwiesen. Die Anordnung war halbkreisförmig, wobei die Bedingungen relativ konsistent entsprechend ihrer Komplexität angeordnet waren. Besonders gross war die Distanz zwischen der ersten Hick-Bedingung (HR0) und der komplexesten Swaps-Bedingung (SR4), der am wenigsten komplexen und der komplexesten Bedingung. Alle anderen Bedingungen waren weitgehend entsprechend ihrer Komplexität dazwischen angeordnet. Allerdings zeigten sich auch aufgabenspezifische Cluster. Die Bedingungen von der Hick-, der Flanker- und der Swaps-Aufgabe wiesen jeweils niedrige Distanzen zueinander auf, weil sie dieselben aufgabenspezifischen Anteile enthielten. Das passte zum Intelligenzmodell von (Guttman, 1954), der ebenfalls eine MDS einsetzte. Allerdings untersuchte er die Zusammen-

hänge von verschiedenen Intelligenztests. Aber auch in seinem Modell spielten insbesondere zwei Dimensionen eine wichtige Rolle: die Aufgabenkomplexität und spezifische Faktoren.

Die Bedingungen, welche die höchste Korrelation mit allen anderen Bedingungen aufwiesen, waren jene im mittleren Komplexitätsbereich: die Reaktionszeit der dritten Flanker-Bedingung und die Reaktionszeit der ersten Swaps-Bedingung. Das waren die einzigen beiden Bedingungen, die mit einer Ausnahme mit den Reaktionszeiten von allen anderen Bedingungen signifikant korrelierten.

Diese Bedingungen gehörten in dieser Arbeit zu den Bedingungen im mittleren Komplexitätsbereich und waren, wie bereits erwähnt, nicht zu komplex um mit den wenig komplexen Bedingungen zu korrelieren aber auch nicht zu wenig komplex, um mit den komplexen Bedingungen zu korrelieren.

Insgesamt korrelierten die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen teilweise mit den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen. Damit konnte die entsprechende Hypothese teilweise bestätigt werden. Allerdings korrelierten insbesondere jene Bedingungen signifikant miteinander, die sich am wenigsten in der Aufgabenkomplexität unterschieden. Zusätzlich spielten auch aufgabenspezifische Anforderungen eine zentrale Rolle. Ausserdem fiel auf, dass auch bei dieser Analyse insbesondere Korrelationen mit den komplexeren Bedingungen vorkamen, wenn diese höher mit der Intelligenz zusammenhingen (die ersten drei Bedingungen).

Zusammenfassend korrelierten also die Reaktionszeiten in den Bedingungen mit niedrigerer Komplexität insbesondere dann mit den Fehlerraten und Reaktionszeiten der Bedingungen mit höherer Komplexität, wenn die Bedingungen mit höherer Komplexität vergleichsweise höher mit der Intelligenz zusammenhingen.

Aus diesem Grund wurde die Analyse erneut getrennt für die beiden Stichproben dieser Arbeit untersucht. Das weil in den beiden Stichproben verschiedene Bedingungen mit der Intelligenz korreliert waren. Wenn nun die obige Hypothese zutrifft, dass weniger komplexe Bedingungen mit komplexeren Bedingungen korrelieren, wenn die komplexeren Bedingungen mit der Intelligenz zusammenhängen, dann sollten sich in den beiden Stichproben unterschiedliche Korrelationsmuster zeigen.

Stichprobenabhängigkeit der Struktur auf manifester Ebene. In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz korrelierten die weniger komplexen Bedingungen nur signifikant positiv mit den komplexeren Bedingungen, wenn die komplexeren Bedingungen ihrerseits auch mindestens in der Tendenz mit der Intelligenz korreliert waren. Das traf für die Reaktionszeiten der ersten beiden Swaps-Bedingungen sowie für die Fehlerrate der zweiten Swaps-Bedingung zu. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz zeigte sich ein weniger deutliches Muster. Aber auch hier ergaben sich die höchsten und meisten signifikant positiven Korrelationen mit den Bedingungen, die am stärksten mit der Intelligenz zusammenhingen. Das waren die Reaktionszeiten der zweiten und dritten Swaps-Bedingung sowie die Fehlerrate der komplexesten Swaps-Bedingung. Ausserdem korrelierte in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz die Reaktionszeit der dritten Swaps-Bedingung mit der Fehlerrate dieser Bedingung signifikant positiv. Das heisst innerhalb dieser Bedingung waren Geschwindigkeit und Genauigkeit positiv korreliert. Schweizer (1996) interpretierte eine solche Korrelation in seiner Studie als Zeichen für eine Transformation der Reaktionszeit in die Fehlerrate. Das stimmt auch mit der vorliegenden Arbeit überein. In dieser Bedingung nahm nämlich die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation im Vergleich zur weniger komplexen Bedingung leicht ab, wobei die Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation leicht zunahm und dann in der darauf folgenden Bedingung signifikant positiv ausfiel.

In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz kam in der Swaps-Aufgabe keine signifikant positive Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Fehlerrate einer Bedingung vor. Dementsprechend konnte keine Transformation der Reaktionszeit in die Fehlerrate nachgewiesen werden (Schweizer, 1996). Das stimmt mit dem Befund überein, dass in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz die Fehlerraten der komplexeren Bedingungen nicht mit der Intelligenz korrelierten. In dieser Stichprobe ergaben sich auch signifikant negative Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen und den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen. In der Arbeit von Schweizer (1996) zeigte sich auch eine signifikante Korrelation, die in diese Richtung ging. Weil es sich aber um nur einen Koeffizienten handelte, ging der Autor von einem zufälligen Resultat aus. In der vorliegenden Arbeit kamen aber mehrere negative Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen und

den Fehlerraten der weniger komplexen Bedingungen vor. Die höchste negative Korrelation ergab sich zwischen der Reaktionszeit und der Fehlerrate der komplexesten Swaps-Bedingung. Allerdings traten diese negativen Korrelationen ausschliesslich in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz auf. Diese negativen Korrelationen bedeuteten z.B., dass Vpn, die in der komplexesten Swaps-Bedingung schneller waren, gleichzeitig mehr Fehler machten.

Insgesamt sprach das Muster aus positiven und negativen Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten in den beiden Stichproben weiter für die Überlappung von Intelligenzeffekten und Antwortmustern. Weil in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz die Fehlerraten der komplexeren Bedingungen mit der Intelligenz korreliert waren, dominierten hier Intelligenzeffekte und es ergaben sich nur positive Korrelationen mit den Reaktionszeiten. In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz hingegen waren die Reaktionszeiten der komplexeren Bedingungen nicht mit der Intelligenz korreliert. Entsprechend dominierten in diesen Bedingungen Antworttendenzen über Intelligenzeffekte, weshalb sich negative Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten fanden.

Zusammenfassung. Insgesamt korrelierten also die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen sowohl mit den Fehlerraten als auch mit den Reaktionszeiten der komplexeren Swaps-Bedingungen wenn, dann signifikant positiv. Fast alle Reaktionszeiten und Fehlerraten der komplexeren Swaps-Bedingungen, die mit der Intelligenz zusammenhingen, korrelierten mit mindestens einer Reaktionszeit der weniger komplexen Bedingung signifikant positiv. Das traf sowohl für die Gesamtstichprobe als auch für die Stichprobe mit der niedrigeren und die Stichprobe mit der höheren Intelligenz zu.

Zusätzlich ergaben sich für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz signifikant negative Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der komplexeren Swaps-Bedingungen und den Fehlerraten der weniger komplexen Swaps-Bedingungen. Das heisst kürzere Reaktionszeiten gingen mit höheren Fehlerraten einher. Diese kamen ausschliesslich bei solchen Bedingungen vor, die nicht signifikant mit der Intelligenz zusammenhingen. Diese negativen Korrelationen sprachen für einen schwächeren Einfluss von Intelligenzeffekten und einen stärkeren Einfluss von Antworttendenzen wie dem Speed-Accuracy-Tradeoff. Auch bei den Fehlerraten der beiden komplexesten Flanker-Bedingungen gab es eine signifikant negative Korrelation.

Die Reaktionszeit der kongruenten Bedingung korrelierte negativ mit der Fehlerrate der inkongruenten Bedingung, was ebenfalls für interindividuelle Unterschiede im Speed-Accuracy-Tradeoff sprach.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob sich diese Zusammenhänge zwischen den verschiedenen komplexen Bedingungen auf manifester Ebene mittels konfirmatorischer Faktorenanalyse auf wenige Faktoren reduzieren lassen. Eine hierarchische Struktur verschiedener Leistungsmasse wurde nicht nur in Intelligenzmodellen, sondern auch in verschiedenen Informationsverarbeitungsgeschwindigkeits-Aufgaben nachgewiesen (Roberts & Stankov, 1999).

Struktur: latent

Wie erwartet (Carroll, 2003; Roberts & Stankov, 1999) konnten die Zusammenhänge zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschiedenen komplexen Bedingungen durch ein hierarchisches Strukturgleichungsmodell gut abgebildet werden. Zuerst wurde aus den Reaktionszeiten der Hick-, Flanker- und Swaps-Bedingungen sowie aus den Fehlerraten der Swaps-Bedingungen jeweils eine latente Variable extrahiert. Dieses Modell passte nicht gut zu den Daten. Deshalb wurde in der Folge ein exploratives Vorgehen gewählt. Mittels Modifizierungsindikatoren wurden zusätzliche Ladungen auf den latenten Variablen zugelassen. Grundsätzlich mussten zusätzliche Ladungen nur wegen der ähnlichen Komplexität von Bedingungen oder wegen der negativen Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und den Fehlerraten der Swaps-Bedingungen zugelassen werden. Die Grundlage dieser Struktur konnte auf manifester Ebene konsistent und nicht nur innerhalb einer Bedingung nachgewiesen werden. Nicht nur für die Gesamtstichprobe sondern auch für die Stichprobe mit der höheren und der niedrigeren Intelligenz konnten die Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen und den Reaktionszeiten und Fehlerraten der komplexeren Bedingungen durch gut interpretierbare Gesetzmässigkeiten erklärt werden, die sich im Gesamtmodell auch auf latenter Ebene fanden. Das spricht gegen ein *Overfitting* des Strukturmodells aller Bedingungen auf latenter Ebene. Trotzdem wäre es sinnvoll, die Struktur auch mit anderen Stichproben zu untersuchen.

Wegen ähnlicher Komplexität luden auf der latenten Hick-Variable zusätzlich noch die

Reaktionszeiten der beiden am wenigsten komplexen Flanker-Bedingungen. Damit setzte sich diese latente Variable einerseits aus aufgabenspezifischen Anteilen der Hick-Bedingungen und andererseits aus Bedingungen mit niedriger Komplexität zusammen. Auf der latenten Flanker-Variablen luden neben den Flanker-Bedingungen auch die komplexeste Hick- und die am wenigsten komplexe Swaps-Bedingung. Damit setzte sich dieser Faktor aus aufgabenspezifischen Anteilen der Flanker-Bedingungen sowie aus Bedingungen mit einer mittleren Komplexität zusammen. Sowohl aufgabenspezifische Varianzanteile als auch die Aufgabenkomplexität bestimmten also die Korrelationen zwischen den verschiedenen komplexen Bedingungen. Wegen Antworttendenzen luden die Reaktionszeiten der komplexesten Swaps-Bedingungen negativ auf dem Fehlerfaktor, was bereits auf manifester Ebene erörtert wurde. Die wichtige Rolle der Aufgabenkomplexität in der Struktur von verschiedenen kognitiven Aufgaben, wurde schon mehrfach nachgewiesen (Guttman, 1954; Krohne & Hock, 2007; Lohman, 1986; Mumaw, Pellegrino, Kail & Carter, 1984; Zimmerman, 1954).

Die in der vorliegenden Arbeit extrahierten latenten Variablen korrelierten alle signifikant mit dem g_{CFT} -Faktor und fast alle auch miteinander. Deshalb wurde aus ihnen auf zweiter Hierarchiestufe ein allgemeiner G-Faktor extrahiert. Allerdings führte das zu einer Verschlechterung des Modellfits. Der Grund dafür war, dass der Hick- und der Flanker-Faktor, verglichen mit den anderen latenten Variablen, stärker miteinander zusammenhingen und deshalb eine zusätzliche Korrelation zwischen diesen beiden latenten Variablen zugelassen werden musste. Das kann daran liegen, dass die Hick- und Flanker-Bedingungen abgesehen vom Reizmaterial praktisch identisch programmiert waren oder daran, dass diese Bedingungen eine vergleichbare Komplexität aufwiesen. Der so extrahierte G-Faktor hing perfekt mit dem g_{CFT} -Faktor, extrahiert aus den Skalen des CFT 20-R, zusammen. Das spricht für die Validität des g_{CFT} -Faktors als Mass für den g-Faktor von Spearman (1927). Weil g-Faktoren extrahiert aus verschiedenen Testbatterien sich dadurch auszeichnen, dass sie bis auf den Messfehler perfekt miteinander korreliert sind (Jensen, 1998a). Zusätzlich wurden in einer anderen Arbeit (Valerius & Sparfeldt, 2014) dieselben Skalen des CFT 20-R eingesetzt und aus diesen sowie der Rohwertsumme der Raven-Matrizen eine latente Variable extrahiert. Diese korrelierte zu $r = .92$ bis $r = 1$ mit zwei anderen g-Faktoren aus anderen Intelligenztestbatterien. Diese anderen beiden g-

Faktoren wurden mittels hierarchischen Strukturgleichungsmodellen aus zwei Intelligenztestbatterien, der Kurzversion des Berliner Intelligenzstrukturtests (Jäger et al., 1997) sowie dem kognitiven Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen (Heller & Perleth, 2000) extrahiert. Die Analyse basierte auf einer grossen Stichprobe mit 562 Gymnasiasten.

In der vorliegenden Arbeit ist es aber zum ersten Mal gelungen, einen Faktor, der ein gutes Mass für den g-Faktor darstellt, aus Aufgaben zu extrahieren, deren Anforderungen durch die systematische Komplexitätsmanipulation sehr spezifisch untersucht werden konnten. Auf diese Weise konnten Hypothesen und Methoden aus dem Mental-Speed-Ansatz und dem psychometrischen Ansatz direkt verglichen und gesamthaft interpretiert werden. Auch Johnson und Deary (2011) ist es gelungen, aus verschiedenen Verarbeitungsgeschwindigkeitsmassen einen Faktor zu extrahieren, der perfekt mit dem g-Faktor korreliert war. Sie erklärten das damit, dass sie sowohl Reaktionszeit-Masse als auch Masse basierend auf der Anzahl korrekt beantworteter Items miteinbezogen. Das stimmt mit den Befunden der vorliegenden Arbeit überein. Allerdings manipulierten die Autoren die beteiligten Prozesse nicht systematisch und hatten deshalb im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit keine experimentelle Kontrolle über diese. Die vorliegende Arbeit weist zusätzlich darauf hin, dass es nicht in erster Linie darauf ankam, ob Reaktionszeiten oder Fehlerraten betrachtet wurden, sondern darauf, ob verschieden komplexe Aufgaben untersucht wurden.

Welche Eigenschaften der untersuchten experimentellen Aufgaben haben aber in der vorliegenden Arbeit dazu geführt, dass der G-Faktor perfekt mit dem g_{CFT} -Faktor korreliert war? Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Grund darin liegt, dass die kognitiven Aufgaben verschieden komplex waren und damit im gesamten untersuchten Leistungsbereich differenzieren konnten. In den komplexesten Bedingungen mussten dabei sowohl Fehlerraten als auch Reaktionszeiten miteinbezogen werden. Ausserdem mussten im hierarchischen Modell aufgabenspezifische Varianzanteile in Faktoren erster Ordnung gebündelt werden, damit auf oberster Hierarchieebene ein G-Faktor extrahiert werden konnte.

Es ist aber darauf hinzuweisen, dass in der vorliegenden Arbeit primär V_{pn} aus dem mittleren und höheren Intelligenzbereich untersucht wurden. Damit bleibt offen, ob die hier gezogenen Schlüsse auch auf Personen mit niedriger Intelligenz generalisiert werden können.

Grundsätzlich ist es wichtig vergleichbare Studien auch mit anderen Stichproben durchzuführen. Ausserdem wäre die Untersuchung von grösseren Stichproben sinnvoll, um die Modelle weiter validieren zu können. Zusätzlich basieren die Schlüsse auf den in dieser Arbeit eingesetzten kognitiven Bedingungen und können damit nicht auf alle kognitiven Aufgaben generalisiert werden. Auch andere Aufgaben, deren Komplexität systematisch manipuliert werden kann, sollten untersucht werden, um weitere komplexitätsabhängige Komponenten auf ihre Korrelation mit der Intelligenz zu untersuchen.

Die vorliegende Arbeit hat auch gezeigt, dass die Operationalisierung der Aufgabenkomplexität über die mittlere Reaktionszeit kritisch hinterfragt werden muss. Weil nicht nur die mittlere Reaktionszeit, sondern auch die Art der Aufgabe sowie die beteiligten Prozesse eine wichtige Rolle spielten. Trotzdem ist die mittlere Reaktionszeit ein einfach zu erhebendes und objektives Mass, das es ermöglicht die Komplexität von sehr unterschiedlichen Aufgaben zu vergleichen (Jensen, 2006). Von daher macht es Sinn die Komplexität, wenn sehr verschiedene Aufgaben verglichen werden, von denen man die Rangordnung der Komplexität nicht kennt, zunächst über die mittlere Reaktionszeit operational zu definieren, aber dann zu überprüfen, welche Manipulationen der Komplexität die Korrelation mit der Intelligenz auf welche Weise beeinflussen.

Integration der Befunde

Ein zentraler Punkt dieser Arbeit ist die Tatsache, dass der G-Faktor extrahiert aus den Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Bedingungen mit jeweils konstanter Komplexität, perfekt mit dem g_{CFT} -Faktor korreliert war. In den Leistungsmassen der verschieden komplexen, experimentell manipulierten Bedingungen, war also alle Information enthalten, die für die Extraktion eines g-Faktors notwendig war. Die experimentelle Manipulation dieser Aufgaben erlaubte es aber, spezifische Komponenten gezielt zu isolieren und untersuchen zu können. Das ermöglicht ein besseres und konkreteres Verständnis des g-Faktors.

Der G-Faktor wurde auf der zweiten Hierarchieebene eines hierarchischen Strukturgleichungsmodells extrahiert. Die latenten Variablen der ersten Hierarchieebene hingen von aufgabenspezifischen Varianzanteilen, von Antworttendenzen und von der Aufgabenkomplexität

ab.

Weil die Aufgabenkomplexität operationalisiert über die mittlere Reaktionszeit stichprobenabhängig war, ist es aber denkbar, dass diese Struktur in Abhängigkeit von der untersuchten Stichprobe variieren kann. Es gab nämlich Hinweise, dass sich z.B. die Struktur eines Intelligenztests in Abhängigkeit von der stichprobenabhängigen, subjektiven Komplexität der Aufgaben verändern kann. Eine Aufgabe lud nämlich in zwei verschiedenen Stichproben auf unterschiedlichen latenten Variablen (Schmidt, 1983). In einer Stichprobe aus Studenten lud sie auf der Bearbeitungsgeschwindigkeit, auf der primär wenig komplexe Aufgaben laden. In einer Stichprobe aus Lehrlingen lud sie hingegen auf dem Kapazitätsfaktor, auf dem primär komplexe Aufgaben laden. Der Autor erklärte sich das damit, dass die Aufgabe für die Stichprobe, bestehend aus Lehrlingen, komplexer war als für die Stichprobe, bestehend aus Studenten und dass sie deshalb auf dem entsprechenden Faktor lud.

Die Stichprobenabhängigkeit der Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation sowie der Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten war ein wichtiger Befund dieser Arbeit. Die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen korrelierten insbesondere mit den Reaktionszeiten und Fehlerraten der komplexeren Bedingungen, wenn diese ebenfalls in der jeweiligen Stichprobe mit der Intelligenz zusammenhingen. Auch das spricht für eine stichprobenabhängige Struktur der Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Aufgaben. Weil aber die beiden untersuchten Stichproben nicht gross genug waren, um jeweils ein hierarchische Strukturgleichungsmodell zu berechnen, wäre das für zukünftige Forschung interessant.

Insgesamt luden auf dem G-Faktor aber nicht, wie erwartet die Reaktionszeiten der komplexesten Bedingungen am stärksten (Guttman, 1954; Spearman, 1927), sondern die Bedingungen im mittleren Bereich des untersuchten Komplexitätsspektrums. Das kann damit begründet werden, dass in der vorliegenden Arbeit weniger komplexe Bedingungen besser im mittleren als im oberen Leistungsbereich und komplexere Bedingungen besser im oberen als im mittleren Leistungsbereich differenzierten. Es kann ebenfalls damit begründet werden, dass die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität teilweise in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation überging. Es brauchte also sowohl Reaktionszeiten von wenig komple-

nen als auch Reaktionszeiten und Fehlerraten von komplexeren Aufgaben, um im gesamten Leistungsbereich optimal zu differenzieren. In der Gesamtstichprobe korrelierten diejenigen Bedingungen am stärksten mit der Intelligenz, die sowohl in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz als auch in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz signifikant mit der Intelligenz assoziiert waren. Dabei handelte es sich insbesondere um jene Bedingungen, die genug komplex waren, um in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz mit Intelligenz zu korrelieren und nicht zu komplex, um in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz mit Intelligenz zu korrelieren.

Damit stellte sich die Frage, warum sowohl im Mental-Speed-Ansatz, als auch in den Intelligenzstrukturmodellen jeweils primär komplexere Aufgaben mit der Intelligenz, respektive dem g-Faktor assoziiert waren (Carroll, 1993; Jensen, 2006). Ein möglicher Grund ist, dass die Komplexität üblicherweise in komplexen Aufgaben wie AG-Aufgaben oder Tests zur Erhebung der fluiden Intelligenz nicht konstant gehalten wird (Roskam, 1997). Um die Motivation der Probanden aufrechtzuerhalten und um in allen Intelligenzbereichen zu differenzieren, werden die Items mit steigender Komplexität vorgegeben. Weil weniger komplexe Bedingungen stärker in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz und komplexere Bedingungen stärker in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz mit dem g_{CFT} -Faktor korrelierten, ist zu erwarten, dass Aufgaben mit variierender Komplexität in einer Stichprobe mit Vpn aus einem breiten Intelligenzbereich, am stärksten mit dem g_{CFT} -Faktor zusammenhängen.

Ein Beispiel für einen Test mit steigender Komplexität ist der CFT 20-R. Genau diese Skalen, die einzigen Aufgaben der vorliegenden Arbeit mit steigender Komplexität, luden am stärksten auf dem g_{CFT} -Faktor. Im CFT 20-R folgten auf ganz einfache Items, die praktisch alle Vpn lösen konnten, Items im mittleren Komplexitätsbereich und im Anschluss daran sehr komplexe Items, die fast niemand mehr lösen konnte (Weiss, 2006).

AG-Aufgaben könnten also besonders stark mit der Intelligenz korrelieren, weil die Komplexität innerhalb der Aufgabe stark variiert. Damit sind Rohwertsummen in AG-Aufgaben unreine Masse und enthalten verschiedene Verarbeitungskomponenten (Ackerman & Cianciolo, 2002; Thomas, Rammsayer, Schweizer & Troche, 2015). Thomas et al. (2015) haben mit Fixed-Links-Modellen eine komplexe AG-spezifische Komponente von einer wenig komplexen, nicht

von der Manipulation des AG beeinflussten Komponente getrennt. Wie in der Swaps-Aufgabe der vorliegenden Arbeit waren beide Komponenten signifikant mit der Intelligenz korreliert. Das zeigt, dass Leistungen in AG-Aufgaben auch Varianzanteile enthalten, die mit Intelligenz korreliert sind, aber nicht AG-spezifisch sind.

Um einen g-Faktor isolieren zu können, der im gesamten Leistungsbereich differenzieren kann, müssen deshalb entweder Aufgaben mit variierender Komplexität oder aber verschiedenen komplexe Aufgaben, bei denen die Komplexität jeweils konstant gehalten wird, eingesetzt werden. Das zweite konnte in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden. Es wurden nämlich verschiedenen komplexe Bedingungen eingesetzt, deren Komplexität jeweils konstant gehalten wurde. Der daraus auf zweiter Hierarchieebene extrahierte G-Faktor war perfekt mit dem g_{CFT} -Faktor extrahiert aus dem CFT 20-R korreliert. Wenn die Komplexität systematisch manipuliert wird, innerhalb der Bedingungen aber konstant gehalten wird, bringt das den Vorteil einer höheren Kontrolle über die Komplexität sowie der daran beteiligten Prozesse.

Womit kann aber begründet werden, dass weniger komplexe Bedingungen stärker im mittleren Intelligenzbereich mit der Intelligenz korrelierten und komplexere Aufgaben stärker im höheren Intelligenzbereich? Das kann daran liegen, dass die Stichprobe mit der höheren Intelligenz in den wenig komplexen Bedingungen kaum Varianz aufwies. Varianzeinschränkungen führen zu niedrigen Korrelationen (Moosbrugger & Kelava, 2007). Die wenig komplexen Bedingungen waren also zu wenig komplex, um ausgeprägte interindividuelle Unterschiede im höheren Leistungsbereich hervorzurufen.

Demgegenüber korrelierten die komplexesten Bedingungen in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz nicht signifikant mit der Intelligenz. Das kann auf unterschiedliche Antwortmuster zurückzuführen sein. Verschiedene Vpn können vergleichbar intelligent sein, manche arbeiten aber sehr schnell und riskieren damit mehr Fehler, andere dagegen arbeiten sehr genau, langsam sowie fehlerarm. Daher ergaben sich für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz auf manifester Ebene teilweise negative Korrelationen zwischen den Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschiedenen Swaps-Bedingungen. Vpn die also mehr Fehler machten, wiesen kürzere Reaktionszeiten auf und umgekehrt. Solche Effekte können dazu führen, dass weder die Reaktionszeiten noch die Fehlerraten ein valides Mass darstellen, weil beide durch inter-

individuelle Unterschiede in den Antwortmustern verunreinigt sind (Lohman, 1989; Sorensen & Woltz, 2015). Aber auch andere strategische Effekte, Motivationsprobleme und andere Fehlereinflüsse, die in der vorliegenden Arbeit nicht systematisch untersucht wurden, können zu einer Verunreinigung von Reaktionszeiten und Fehlerraten geführt haben.

Ein anderer Grund könnte die erreichte Kapazitätsgrenze sein. Aufgaben, die viele Vpn nicht korrekt lösen können, weil sie ihre Kapazitätsgrenze überschreiten, können zwischen diesen Vpn nicht differenzieren, weil die Fehlerraten dieser Vpn keine Varianz aufweisen (Moosbrugger & Kelava, 2007). Allerdings hat das in der vorliegenden Arbeit aufgrund der relativ niedrigen Fehlerraten sogar in den komplexesten Bedingungen fast keine Vpn betroffen und sollte deshalb die Resultate nicht stark beeinflusst haben.

Grundsätzlich können diese stichprobenabhängigen Korrelationen mit der Intelligenz mit dem Yerkes-Dodson-Gesetz in Verbindung gebracht werden (Yerkes & Dodson, 1908). Dieses Gesetz besagt, dass Vpn dann eine optimale Leistung erbringen, wenn die Aufgabe nicht zu komplex oder zu wenig komplex für sie ist. Weil diese optimale Komplexität stichprobenabhängig ist, ist auch die Reaktionszeit-Intelligenz- sowie Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation stichprobenabhängig. Es ist davon auszugehen, dass die optimale Leistung das beste Mass für die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit ist, weil sie die nicht von Fehleranteilen überlagerte maximale Leistung einer Vp darstellt. Zu leichte Aufgaben können bei den Vpn Langeweile und zu anspruchsvolle Frustration auslösen, was dazu führt, dass sie sich weniger anstrengen und nicht ihre maximale Leistung erbringen. So sind z.B. Motivation und Aufmerksamkeit maximal, wenn eine Vp sich im sogenannten *Flow-Zustand* befindet. Ein Zustand, der eintritt wenn die Anforderung der Aufgabe und Fähigkeit der Vp übereinstimmen (Ullén, Söderlund, Kääriä & Madison, 2012). Es ist zu erwarten, dass in diesem Zustand maximale Leistung am besten gemessen werden kann.

Grundsätzlich nahm die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation zunächst mit steigender Komplexität zu, danach wieder ab. Nur in der Hick-Aufgabe zeigte sich erwartungsgemäss ein linearer Anstieg, weil die Bedingungen relativ wenig komplex waren. Die Abnahme der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Aufgabenkomplexität konnte verschiedene Gründe haben und hing von der untersuchten Stichprobe ab. In der Stichprobe mit der niedrigeren In-

telligenz waren komplexere Bedingungen nicht signifikant mit der Intelligenz assoziiert und es liessen sich Antworttendenzen feststellen wie die Präferenz für Schnelligkeit oder Genauigkeit. Auch strategische und motivationale Gründe könnten dafür verantwortlich gewesen sein. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz hingegen, vollzog sich ein Übergang von der Reaktionszeit als signifikanter Prädiktor der Intelligenz hin zur Fehlerrate als signifikanter Prädiktor.

Insgesamt korrelierten in der Gesamtstichprobe sowohl die Reaktionszeiten als auch die Fehlerraten der Bedingungen der Swaps-Aufgabe mit relativ hoher Komplexität mit der Intelligenz. Dabei waren die Reaktionszeiten in den vier weniger komplexen Bedingungen stärker mit der Intelligenz assoziiert und die Fehlerrate in der komplexesten Bedingung. Dieses Ergebnis wird durch Befunde gestützt, die aufzeigen, dass einerseits die Geschwindigkeit der Ausführung einer Aufgabe und andererseits die Anzahl korrekter Antworten eine Aussage über die Intelligenz von Vpn erlauben (Goldhammer, 2015). Während in wenig komplexen Aufgaben die Reaktionszeit wichtiger ist, ist in komplexen Aufgaben die Fehlerrate wichtiger (Dodonova & Dodonov, 2013). Die meisten Aufgaben beinhalten aber beides, eine Komponente der Geschwindigkeit und eine Komponente der Genauigkeit (Roskam, 1997). So auch der CFT 20-R, weil es sich um einen zeitlich begrenzten Power-Test handelt.

In der Swaps-Aufgabe zeigten sich individuell stabile Präferenzen für Geschwindigkeit oder Genauigkeit über die verschiedenen Bedingungen hinweg. Vergleichbare Antwortmuster fanden sich auch im CFT 20-R. Zusätzlich wurden die falschen Antworten im CFT 20-R auf latenter Ebene durch die Fehler in der Swaps-Aufgabe vorausgesagt. Gleichzeitig wurden die Auslassungen im CFT 20-R durch die konstante Reaktionszeit-Komponente vorausgesagt. Diese Antworttendenzen zeigten sich also nicht nur innerhalb der Swaps-Aufgabe und innerhalb vom CFT 20-R, sie zeigten auch eine gewisse Stabilität über die beiden Instrumente und damit über verschiedene Antwortformate hinweg. Das spricht für interindividuell stabile Antworttendenzen über verschiedene Instrumente und bestätigt andere Arbeiten auf diesem Gebiet (Lohman, 1989; Sorensen & Woltz, 2015).

Diese Antwortmuster waren aber entsprechend dem Impulsivitätswert nicht mit der Intelligenz korreliert. Der Impulsivitätswert setzt die individuelle Geschwindigkeit und Genauigkeit im Vergleich zur Gesamtstichprobe miteinander in Beziehung.

Insgesamt betrachtet können die Resultate der vorliegenden Arbeit mit der Intelligenztheorie von Jensen (2011) erklärt werden. Dabei stellt die Oszillationsrate eine nützliche Metapher zur Veranschaulichung dar. Nach dieser Theorie basieren Intelligenzunterschiede auf interindividuellen Unterschieden in der Oszillationsrate. Diese Unterschiede in der Oszillationsrate kommen in komplexeren Aufgaben stärker zur Geltung als in weniger komplexen Aufgaben. Die Leistung in allen Aufgaben hängt also von der Oszillationsrate ab, am stärksten zeigt sich ihr Einfluss aber in komplexeren Aufgaben, weil hier ihr Einfluss über verschiedene Prozesse aufsummiert wird. Diese dürfen aber nicht zu komplex sein, weil der Einfluss der Oszillationsrate dann durch andere Störeinflüsse wie z.B. Motivations- und Aufmerksamkeitsproblemen oder einer Varianzeinschränkung in den Fehlerraten überlagert wird und somit nicht mehr optimal gemessen werden kann.

Von den Aufgaben aus denen eine konstante und eine ansteigende Reaktionszeit-Komponente extrahiert werden konnten, korrelierte nicht nur die ansteigenden sondern auch die konstanten Komponente mit der Intelligenz. Dabei korrelierte sowohl die konstante Komponente der Flanker-Aufgabe als auch die konstante Komponente der Swaps-Aufgabe signifikant stärker mit der Intelligenz als die jeweiligen ansteigenden Komponenten. Die konstante Komponente war jeweils jene, die in allen Bedingungen einer Aufgabe gleichermassen vorkam. Die unstandardisierten Ladungen auf dieser konstanten Komponente waren jeweils auf eins fixiert. Weil Unterschiede in der Oszillationsrate die Leistung in allen Bedingungen beeinflussten, diese aber aufgabenabhängig durch Störeinflüsse überlagert werden, sollte in einer messfehlerbereinigten konstanten Komponente der Einfluss der Oszillationsrate besonders gut gemessen werden können. Weil Fehleranteile über verschiedene Aufgaben unabhängig voneinander sind, wird die wahre Varianz nämlich durch die Bildung einer latenten Variablen extrahiert und von den Fehleranteilen befreit (Moosbrugger & Kelava, 2007). Die wahre Varianz, welche stark von der Oszillationsrate beeinflusst wird, kann auf diese Weise von den Fehleranteilen getrennt werden.

Die Oszillationsrate kann deshalb erklären, warum die konstante Komponente der Swaps-Aufgabe besonders stark mit der Intelligenz korreliert war. Ausserdem passte ein Modell, in welchem die Intelligenz nur durch diese konstante Komponente vorausgesagt wurde, gut zu

den Daten. Der Zusammenhang zwischen der ansteigenden, komplexitätsabhängigen Reaktionszeit-Komponente und der Intelligenz sowie der Fehler-Komponente und der Intelligenz kam also in erster Linie durch die gemeinsame Korrelation mit der konstanten Komponente zustande. Das spricht weiter für einen grundlegenden Prozess der Intelligenz wie die Oszillationsrate. Wenn nämlich diese fehlerfrei gemessen werden kann, sollten alle anderen Prozesse nur noch mit der Intelligenz korrelieren, weil sie mit der Oszillationsrate zusammenhängen. Das weil diese die Grundlage der Intelligenz darstellt.

Allerdings korrelierte in der Flanker-Aufgabe die ansteigende Komponente unabhängig von der konstanten Komponente leicht mit der Intelligenz. Mit der Oszillationsrate kann das nur erklärt werden, wenn die konstante Komponente nicht gut geeignet war, um die Oszillationsrate zu isolieren. Der Vergleich von Flanker- und Swaps-Aufgabe könnte darauf hinweisen, dass entscheidungsspezifische Prozesse, wie sie in der ansteigenden Komponente der Flanker-Aufgabe enthalten waren, neben weniger komplexen, sehr basalen Prozessen, einen eigenständigen Beitrag zur Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation leisteten. Das spricht dafür, dass solche entscheidungsspezifischen Prozesse notwendig sind um die Oszillationsrate sauber extrahieren zu können.

Wie von Jensen (2006) postuliert, hing die Korrelation zwischen einer Aufgabe und der Intelligenz in erster Linie von zwei Variablen ab: der Aufgabenkomplexität und der Intelligenz der untersuchten Stichprobe. Trifft diese Annahme generell zu, könnte die etwas gewagte Hypothese aufgestellt werden, dass im Grunde fast jedes Konstrukt die Grundlage der Intelligenz darstellen kann. Es muss nur möglich sein mit diesem Konstrukt einen genug grossen Komplexitätsbereich abzudecken und es müssen Aufgaben gewählt werden, die im gesamten Intelligenzbereich der untersuchten Stichprobe differenzieren können.

Aufbauend auf dieser Annahme, sollte beispielsweise nachgewiesen werden können, dass Inhibition Intelligenzunterschieden zugrunde liegt. Dazu benötigt man Aufgaben, welche Inhibition messen und gleichzeitig einen genügend grossen Komplexitätsbereich abdecken, um in der gesamten untersuchten Stichprobe differenzieren zu können. Zusätzlich sollten Aufgaben mit unterschiedlichen aufgabenspezifischen Anforderungen untersucht werden, damit diese vom g-Faktor getrennt werden können. Das würde zum Fehlschluss führen, dass Inhibition der

Intelligenz zugrunde liegt. In Wirklichkeit könnte aber die Intelligenz nicht durch die Inhibition, sondern dadurch bestimmt sein, wie schnell und/oder akkurat die Vpn in Aufgaben arbeiten, die für sie nicht zu anspruchsvoll oder zu einfach sind. Allerdings sind das nur theoretische Überlegungen, die einer weiteren empirischen Überprüfung bedürfen. Eine Möglichkeit wäre, verschiedene psychologische Konstrukte mit unterschiedlich komplexen Aufgaben zu erfassen und dann deren Korrelation mit der Intelligenz zu untersuchen. Dafür sollte möglichst, wie in der vorliegenden Arbeit, ein hierarchisches Strukturgleichungsmodell eingesetzt werden, um aufgabenspezifische Varianzanteile und Anteile vom g-Faktor in einem Modell voneinander trennen zu können.

Allerdings bedeutet die Extraktion eines g-Faktors nicht, dass diesem Faktor ein einziger Prozess zugrunde liegen muss (Horn & McArdle, 2007). Der g-Faktor kann sich nämlich aus vielen verschiedenen Prozessen zusammensetzen. Das lässt sich auch anhand der Metapher der Oszillationsrate veranschaulichen. Weil in der vorliegenden Arbeit schon sehr wenig komplexe Bedingungen mit der Intelligenz zusammenhängen, manifestierten sich interindividuelle Unterschiede in der Oszillationsrate schon in diesen Bedingungen. Allerdings sind diese Bedingungen nicht komplex genug, um im gesamten Intelligenzbereich differenzieren zu können, weil sie zu stark durch Fehleranteile überlagert waren. In der Stichprobe mit der höheren Intelligenz brauchte es zusätzlich komplexere Aufgaben um aussagekräftige interindividuelle Unterschiede hervorzurufen. Obwohl also interindividuelle Unterschiede in der Oszillationsrate auch in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz schon in wenig komplexen Bedingungen vorhanden sein konnten, waren sie nicht ausgeprägt genug, um zuverlässig gemessen werden zu können. Es brauchte also verschieden komplexe Aufgaben, die verschiedene Prozesse enthalten, um im gesamten Intelligenzbereich differenzieren zu können. Das heisst obwohl die Oszillationsrate die Grundlage der Intelligenz sein kann, ist es theoretisch trotzdem möglich, dass z.B. AG-Prozesse nur Intelligenzunterschiede im oberen Leistungsbereich voraussagen und die Stimulusdikrimination nur im unteren Leistungsbereich. Es ist dementsprechend möglich, dass die Intelligenztheorie von Jensen (2011) zutrifft, also Intelligenzunterschiede durch Unterschiede in der Oszillationsrate zustande kommen, aber gleichzeitig für die Extraktion eines g-Faktors verschieden komplexe Prozesse notwendig sind. Das legt die Vermutung nahe,

dass die Oszillationsrate weiterhin nur als Metapher gesehen werden kann und auch in Zukunft kein einzelner biologischer Prozess gefunden wird, der perfekt mit der Intelligenz korreliert (Deary et al., 2010; Mackintosh, 2011). Hier ergeben sich nämlich ähnliche Probleme wie bei der Untersuchung von Reaktionszeiten auf manifester Ebene. Es ist zum Beispiel denkbar, dass auch auf neuronaler Ebene die Oszillationsrate nur zuverlässig gemessen werden kann, wenn die untersuchten Aufgaben für die Vpn nicht zu komplex oder zu wenig komplex sind, weil sie sonst von Fehleranteilen überlagert wird. Wenn sich die Leistung also im individuell optimalen Bereich befindet. Damit ist es denkbar, dass verschiedene neuronale Prozesse oder Komponenten Intelligenzunterschieden zugrunde liegen abhängig von der Intelligenz der untersuchten Stichprobe.

Zusammenfassung

Die Komplexitätshypothese besagt, dass die Reaktionszeiten von komplexeren Aufgaben stärker mit Intelligenz korreliert sind als die Reaktionszeiten von weniger komplexen Aufgaben. Die Komplexität wird dabei typischerweise über die mittlere Reaktionszeit zur Ausführung der Aufgabe operationalisiert. Allerdings wurden in diesem Kontext primär relativ wenig komplexe Aufgaben mit einer mittleren Reaktionszeit von unter einer Sekunde untersucht. In komplexeren Aufgaben geht die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation allmählich in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation über, bis ab einer gewissen Komplexität nur noch die Fehlerrate mit der Intelligenz zusammenhängt.

Ziel dieser Arbeit war es, den Zusammenhang zwischen der Aufgabenkomplexität und der Reaktionszeit-Intelligenz- sowie der Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation über einen grossen Teil des Komplexitätskontinuums zu untersuchen. Für eine ganzheitliche Betrachtung wurden dafür Aspekte aus dem Mental-Speed-Ansatz und aus dem psychometrischen Ansatz kombiniert und an einer Stichprobe von 200 Vpn mit einem Alter zwischen 17 und 30 Jahren empirisch überprüft. Untersucht wurden drei Aufgaben, deren Komplexität zwischen 200 ms und 23 Sekunden variierte. Die drei Aufgaben bestanden jeweils aus drei bis fünf homogenen Bedingungen, die sich ausschliesslich in der Komplexität unterschieden. Das erlaubte eine gezielte Isolierung der komplexitätsabhängigen Prozesse. Die Intelligenz wurde über den g_{CFT} -Faktor

operationalisiert, der aus den vier Unterskalen des CFT 20-R extrahiert wurde. Der Verlauf der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation mit steigender Komplexität über alle Bedingungen war kurvilinear. Mit steigender Aufgabenkomplexität folgte also auf einen linearen Anstieg der Korrelation ein linearer Rückgang der Korrelation. Dieser Rückgang ging in den meisten Fällen mit einem signifikanten Anstieg der Fehlerrate einher. Allerdings war dieser Verlauf auch aufgabenabhängig. Der lineare Rückgang der Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation trat nicht primär aufgrund der Aufgabenkomplexität auf, sondern immer dann, wenn für die Bedingung Aspekte der kontrollierten Aufmerksamkeit wie die Inhibition einer dominanten Antwort in der Flanker-Aufgabe oder das AG in der Swaps-Aufgabe benötigt wurden.

Die Beziehung zwischen Aufgabenkomplexität und Intelligenz wurde zusätzlich getrennt für die 80 Vpn mit der höchsten und der niedrigsten Intelligenz untersucht und verglichen. Nur in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz ging die Reaktionszeit-Intelligenz-Korrelation bei einem kurvilinearen Verlauf in eine Fehlerrate-Intelligenz-Korrelation über. In der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz korrelierten in den komplexesten Bedingungen weder die Fehlerraten noch die Reaktionszeiten signifikant mit der Intelligenz. Insgesamt korrelierten in der Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz in erster Linie die weniger komplexen Bedingungen mit der Intelligenz und in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz nur jene, die so komplex waren, dass Aspekte der kontrollierten Aufmerksamkeit wie Inhibition und AG benötigt wurden. Wenn Fehlerraten und Reaktionszeiten in der Vorhersage der Intelligenz kombiniert wurden, ergab sich in der Stichprobe mit der höheren Intelligenz für jede Aufgabe mit steigender Komplexität ein Anstieg der an der Intelligenz erklärten Varianz. Für die Stichprobe mit der niedrigeren Intelligenz hingegen in keiner einzigen. Insgesamt differenzierten also komplexere Bedingungen besser im oberen Leistungsbereich und weniger komplexe im unteren Leistungsbereich.

In der Gesamtstichprobe konnte der Einfluss der Komplexitätsmanipulation auf die Reaktionszeiten nur in der Flanker- und Swaps-Aufgabe isoliert werden. Die auf diese Weise isolierten Prozesse bezogen sich auf Aspekte der kontrollierten Aufmerksamkeit wie Inhibition und AG. In beiden Fällen korrelierte diese Komponente mit der Intelligenz. Allerdings war jeweils die von der Komplexitätsmanipulation nicht beeinflusste, konstante Komponente stärker

mit der Intelligenz assoziiert. Das spricht für eine basale Verarbeitungskomponente, die allen Aufgaben zugrunde liegt und somit für eine Bottom-Up-Erklärung von Intelligenzunterschieden. Ausserdem zeigten sich in der AG-Aufgabe und im CFT 20-R stabile interindividuelle Unterschiede in der Tendenz für Geschwindigkeit und/oder Genauigkeit der Antworten. Diese Resultate sprechen dafür, dass ab einer gewissen Aufgabenkomplexität sowohl die Reaktionszeiten als auch die Fehlerraten für die Untersuchung der Zusammenhänge mit der Intelligenz herangezogen werden sollten.

Was die Struktur der verschieden komplexen Bedingungen betrifft, korrelierten die Reaktionszeiten der weniger komplexen Bedingungen mit den Reaktionszeiten und Fehlerraten der komplexeren Bedingungen und zwar insbesondere dann, wenn beide Leistungsmasse mit der Intelligenz assoziiert waren. Das galt sowohl für die Gesamtstichprobe als auch für die Stichprobe mit der niedrigeren und der höheren Intelligenz. Auf latenter Ebene liess sich erkennen, dass die Korrelationen zwischen den verschieden komplexen Bedingungen auf verschiedene Faktoren zurückzuführen waren. Diese Faktoren basierten einerseits auf der gemeinsamen Korrelation mit dem g_{CFT} -Faktor und andererseits auf der Ähnlichkeit in der Komplexität sowie auf aufgabenspezifischen Varianzanteilen und Unterschieden im Speed-Accuracy-Tradeoff.

Ein latenter G-Faktor, extrahiert aus den unterschiedlich komplexen Bedingungen, war perfekt mit dem g_{CFT} -Faktor assoziiert. Die Bedingungen enthielten also alle Informationen auf denen der g_{CFT} -Faktor basierte. Auf dem G-Faktor luden nicht die Reaktionszeiten der komplexesten Bedingungen am stärksten, sondern jene im mittleren Komplexitätsbereich, die sowohl in der Stichprobe mit der niedrigeren als auch in der mit der höheren Intelligenz mit der Intelligenz assoziiert waren.

Zusammenfassend ist die Aufgabenkomplexität eine wichtige Determinante für den Zusammenhang zwischen der Leistung in einer kognitiven Aufgabe und der Intelligenz. Zentral ist dabei, dass in verschiedenen Intelligenzbereichen unterschiedlich komplexe Aufgaben optimal differenzieren. Zusätzlich sollten in komplexeren Aufgaben sowohl Reaktionszeiten als auch Fehlerraten eingesetzt werden, um unterschiedliche Antwortmuster berücksichtigen zu können. Weil aber auch aufgabenspezifische Varianzanteile von Bedeutung sind, sollte nicht nur die Komplexität für die Korrelation mit der Intelligenz betrachtet werden, sondern auch die

spezifischen Prozesse, die mit den mittleren Reaktionszeiten gemessen werden.

Literatur

- Ackerman, P. L. & Cianciolo, A. T. (2002). Ability and task constraint determinants of complex task performance. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8, 194–208. doi:10.1037/1076-898X.8.3.194
- Anderson, M. (1992). *Intelligence and development: A cognitive theory*. Oxford, England: Blackwell Publishing.
- Anderson, M. (2005). Marrying intelligence and cognition: A developmental view. In R. J. Sternberg & J. E. Pretz (Eds.), *Cognition and intelligence: Identifying the mechanisms of the mind* (pp. 268–287). New York, NY: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511607073.015
- Avital-Cohen, R. & Tsal, Y. (2016). Top-down processes override bottom-up interference in the flanker task. *Psychological Science, Prepublished March, 18, 2016*. doi:10.1177/0956797616631737
- Barral, J. & Debû, B. (2004). Aiming in adults: Sex and laterality effects. *Laterality*, 9, 299–312. doi:10.1080/13576500342000158
- Bexkens, A., Van der Molen, M. W., Collot d’Escury-Koenigs, A. M. L. & Huizenga, H. M. (2014). Interference control in adolescents with mild-to-borderline intellectual disabilities and/or behavior disorders. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 20, 398–414. doi:10.1080/09297049.2013.799643
- Breznitz, Z. (1987). Increasing first graders’ reading accuracy and comprehension by accelerating their reading rates. *Journal of Educational Psychology*, 79, 236–242. doi:10.1037/0022-0663.79.3.236
- Burt, C. (1949). The structure of the mind. *British Journal of Educational Psychology*, 19, 176–199. doi:10.1111/j.2044-8279.1949.tb01621.x
- Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. New York, NY: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511571312
- Carroll, J. B. (2003). The higher-stratum structure of cognitive abilities. Current evidence supports g and about ten broad factors. In N. Nyborg (Ed.), *The scientific study of general*

- intelligence: Tribute to Arthur Jensen* (pp. 5–21). Oxford, England: Elsevier. doi:10.1016/B978-008043793-4/50036-2
- Cattell, R. B. (1940). A culture-free intelligence test, Part 1. *Journal of Educational Psychology*, 31, 161–179.
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: Their structure, growth, and action*. Boston, MA: Mifflin.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112, 155–159. doi:10.1037/0033-2909.112.1.155
- Cohn, S. J., Carlson, J. S. & Jensen, A. R. (1985). Speed of information processing in academically gifted youths. *Personality and Individual Differences*, 6, 621–629. doi:10.1016/0191-8869(85)90012-1
- Colom, R., Escorial, S., Shih, P. C. & Privado, J. (2007). Fluid intelligence, memory span, and temperament difficulties predict academic performance of young adolescents. *Personality and Individual Differences*, 42, 1503–1514. doi:10.1016/j.paid.2006.10.023
- Conway, A. R., Cowan, N., Bunting, M. F., Theriault, D. J. & Minkoff, S. R. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30, 163–183. doi:10.1016/S0160-2896(01)00096-4
- Crawford, J. D. (1991). Intelligence, task complexity, and the distinction between automatic and effortful mental processing. In H. A. H. Rowe (Ed.), *Intelligence: Reconceptualization and measurement* (pp. 119–144). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Danthiir, V., Wilhelm, O. & Roberts, R. D. (2012). Further evidence for a multifaceted model of mental speed: Factor structure and validity of computerized measures. *Learning and Individual Differences*, 22, 324–335. doi:10.1016/j.lindif.2011.12.010
- Deary, I. J. (2001). Human intelligence differences: Towards a combined experimental-differential approach. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 164–170. doi:10.1016/S1364-6613(00)01623-5
- Deary, I. J., Bell, P. J., Bell, A. J., Campbell, M. L. & Fazal, N. D. (2004). Sensory discrimination and intelligence: Testing Spearman's other hypothesis. *The American Journal of Psychology*, 117, 1–19. doi:10.2307/1423593

- Deary, I. J., Penke, L. & Johnson, W. (2010). The neuroscience of human intelligence differences. *Nature Review Neuroscience*, *11*, 201–211. doi:10.1038/nrn2793
- Deary, I. J., Whalley, L. J., Lemmon, H., Crawford, J. R. & Starr, J. M. (2000). The stability of individual differences in mental ability from childhood to old age: Follow-up of the 1932 Scottish Mental Survey. *Intelligence*, *28*, 49–55. doi:10.1016/S0160-2896(99)00031-8
- Dodonov, Y. S. & Dodonova, Y. A. (2011). Robust measures of central tendency: Weighting as a possible alternative to trimming in response-time data analysis. *Psikhologicheskie Issledovaniya*, *5*, 1–11.
- Dodonova, Y. A. & Dodonov, Y. S. (2013). Faster on easy items, more accurate on difficult ones: Cognitive ability and performance on a task of varying difficulty. *Intelligence*, *41*, 1–10. doi:10.1016/j.intell.2012.10.003
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, *30*, 412–431. doi:10.1016/0001-6918(69)90065-1
- Duncan, J., Parr, A., Woolgar, A., Thompson, R., Bright, P., Cox, S., ... Nimmo-Smith, I. (2008). Goal neglect and Spearman's g: Competing parts of a complex task. *Journal of Experimental Psychology: General*, *137*, 131–148. doi:10.1037/0096-3445.137.1.131
- Dunst, B., Benedek, M., Jauk, E., Bergner, S., Koschutnig, K., Sommer, M., ... Neubauer, A. C. (2014). Neural efficiency as a function of task demands. *Intelligence*, *42*, 22–30. doi:10.1016/j.intell.2013.09.005
- Eid, M., Gollwitzer, M. & Schmitt, M. (2011). *Statistik und Forschungsmethoden* (2. Aufl.). Basel, Schweiz: Beltz.
- Elliott, C. D. & Murray, D. J. (1977). The measurement of speed of problem solving and its relation to children's age and ability. *British Journal of Educational Psychology*, *47*, 50–59. doi:10.1111/j.2044-8279.1977.tb03000.x
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E. & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology*, *128*, 309–331.

- 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*, 143–149. doi:10.3758/BF03203267
- Eysenck, H. J. (1967). Intelligence assessment: A theoretical and experimental approach. *British Journal of Educational Psychology*, *37*, 81–98.
- Eysenck, H. J. (1986). Toward a new model of intelligence. *Personality and Individual Differences*, *7*, 731–736. doi:10.1016/0191-8869(86)90044-9
- Eysenck, M. W. & Keane, M. T. (2010). *Cognitive Psychology: A student's handbook* (6th ed.). East Sussex, England: Psychology Press.
- Fernandez, S., Fagot, D., Dirk, J. & de Ribaupierre, A. (2014). Generalization of the worst performance rule across the lifespan. *Intelligence*, *42*, 31–43. doi:10.1016/j.intell.2013.10.001
- Fox, M. C., Roring, R. W. & Mitchum, A. L. (2009). Reversing the speed-IQ correlation: Intra-individual variability and attentional control in the inspection time paradigm. *Intelligence*, *37*, 76–80. doi:10.1016/j.intell.2008.08.002
- Frey, M. C. (2011). The relationship between performance in near match-to-sample tasks and fluid intelligence. *Intelligence*, *39*, 273–280. doi:10.1016/j.intell.2011.04.004
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., Defries, J. C. & Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science*, *17*, 172–179. doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x
- Galton, F. (1869). *Hereditary genius: An inquiry into its laws and consequences*. London, England: Macmillan.
- Galton, F. (1907). *Inquiries into human faculty and its development*. London, England: J. M. Dent & Sons.
- Goldhammer, F. (2015). Measuring ability, speed, or both? Challenges, psychometric solutions, and what can be gained from experimental control. *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives*, *13*, 133–164. doi:10.1080/15366367.2015.1100020

- Goldhammer, F., Naumann, J. & Greiff, S. (2015). More is not always better: The relation between item response and item response time in Ravens Matrices. *Journal of Intelligence*, 3, 21–40. doi:10.3390/jintelligence3010021
- Gottfredson, L. S. (1997). Mainstream science on intelligence: An editorial with 52 signatories, history, and bibliography. *Intelligence*, 24, 13–23. doi:10.1016/S0160-2896(97)90011-8
- Gustafsson, J. (1988). Hierarchical models of individual differences in cognitive abilities. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (4th ed., pp. 35–71). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associated.
- Guttman, L. (1954). A new approach to factor analysis: The radex. In P. F. Lazarsfeld (Ed.), *Mathematical thinking in the social sciences* (pp. 258–348). New York, NY: Free Press.
- Hale, S. & Jansen, J. (1994). Global processing-time coefficients characterize individual and group differences in cognitive speed. *Psychological Science*, 5, 384–389. doi:10.1111/j.1467-9280.1994.tb00290.x
- Heitz, R. P. (2014). The speed-accuracy tradeoff: History, physiology, methodology, and behavior. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 1–19. doi:10.3389/fnins.2014.00150
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision*. Göttingen, Deutschland: Beltz-Test.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 11–26. doi:10.1080/17470215208416600
- Horn, J. L. & McArdle, J. J. (2007). Understanding human intelligence since Spearman. In R. Cudeck & R. C. MacCallum (Eds.), *Factor analysis at 100 years* (pp. 205–247). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. doi:10.1207/S15327906MBR3803__06
- Hu, L. & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 6, 1–55. doi:10.1080/10705519909540118
- Jäger, A. O., Süss, H.-M. & Beauducel, A. (1997). *Berliner Intelligenzstruktur Test*. Göttingen, Deutschland: Hogrefe.
- Jensen, A. R. (1982). Reaction time and psychometric g. In H. J. Eysenck (Ed.), *A model for intelligence* (pp. 93–132). New York, NY: Springer.

- Jensen, A. R. (1986). g: Artifact or reality? *Journal of Vocational Behavior*, 29, 301–331. doi:10.1016/0001-8791(86)90011-4
- Jensen, A. R. (1987). Individual differences in the Hick paradigm. In P. A. Vernon (Ed.), *Speed of information-processing and intelligence* (pp. 101–175). Norwood, NJ: Ablex.
- Jensen, A. R. (1993). Why is reaction time correlated with psychometric g? *Current Directions in Psychological Science*, 2, 53–56.
- Jensen, A. R. (1998a). *The g factor: The science of mental ability*. Westport, CT: Praeger.
- Jensen, A. R. (1998b). The suppressed relationship between IQ and the reaction time slope parameter of the Hick function. *Intelligence*, 26, 43–52. doi:10.1016/S0160-2896(99)80051-8
- Jensen, A. R. (2006). *Clocking the mind: Mental chronometry and individual differences*. Oxford, England: Elsevier.
- Jensen, A. R. (2011). The theory of intelligence and its measurement. *Intelligence*, 39, 171–177. doi:10.1016/j.intell.2011.03.004
- Johnson, W., Bouchard, T. J. & Krüger, R. F. (2004). Just one g: Consistent results from three test batteries. *Intelligence*, 32, 95–107. doi:10.1016/S0160-2896(03)00062-X
- Johnson, W. & Deary, I. J. (2011). Placing inspection time, reaction time, and perceptual speed in the broader context of cognitive ability: The VPR model in the Lothian Birth Cohort 1936. *Intelligence*, 39, 405–417. doi:10.1016/j.intell.2011.07.003
- Johnson, W., Nijenhuis, J. & Bouchard, T. J. (2008). Still just 1 g: Consistent results from five test batteries. *Intelligence*, 36, 81–95. doi:10.1016/j.intell.2007.06.001
- Kail, R. (1991). Developmental change in speed of processing during childhood and adolescence. *Psychological Bulletin*, 109, 490–501. doi:10.1037/0033-2909.109.3.490
- Kane, M. J. & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 637–671. doi:10.3758/BF03196323
- Kline, R. B. (2010). *Principles and practice of structural equation modeling* (3rd ed.). New York, NY: Guilford Press.

- Knorr, E. & Neubauer, A. C. (1996). Speed of information-processing in an inductive reasoning task and its relationship to psychometric intelligence. *Personality and Individual Differences*, 20, 653–660. doi:10.1016/0191-8869(96)00020-7
- Krohne, H. W. & Hock, M. (2007). *Psychologische Diagnostik: Grundlagen und Anwendungsfelder*. Stuttgart, Deutschland: Kohlhammer.
- Kyllonen, P. (1985). *Dimensions of information processing speed*. Brooks Air Force Base, TX: Air Force Systems Command.
- Larson, G. E. & Saccuzzo, D. P. (1989). Cognitive correlates of general intelligence: Toward a process theory of *g*. *Intelligence*, 13, 5–31. doi:10.1016/0160-2896(89)90003-2
- Lavergne, C. & Vigneau, F. (1997). Response speed on aptitude tests as an index of intellectual performance: A developmental perspective. *Personality and Individual Differences*, 23, 283–290. doi:10.1016/S0191-8869(97)00037-8
- Lesage, E., Valcke, M. & Sabbe, E. (2013). Scoring methods for multiple choice assessment in higher education - Is it still a matter of number right scoring or negative marking? *Studies in Educational Evaluation*, 39, 188–193. doi:10.1016/j.stueduc.2013.07.001
- Levine, G., Preddy, D. & Thorndike, R. L. (1987). Speed of information processing and level of cognitive ability. *Personality and Individual Differences*, 8, 599–607. doi:10.1016/0191-8869(87)90057-2
- Lindley, R. H., Smith, W. R. & Thomas, T. J. (1988). The relationship between speed of information processing as measured by timed paper-and-pencil tests and psychometric intelligence. *Intelligence*, 12, 17–25. doi:10.1016/0160-2896(88)90020-7
- Lindley, R. H., Wilson, S. M., Smith, W. R. & Bathurst, K. (1995). Reaction time (RT) and IQ: Shape of the task complexity function. *Personality and Individual Differences*, 18, 339–345. doi:10.1016/0191-8869(94)00154-K
- Lohman, D. F. (1979). *Spatial ability: Individual differences in speed and level*. Stanford, CA: Stanford University, Aptitude Research Project, School of Education.
- Lohman, D. F. (1986). The effect of speed-accuracy tradeoff on sex differences in mental rotation. *Perception & Psychophysics*, 39, 427–436. doi:10.3758/BF03207071

- Lohman, D. F. (1989). Individual differences in errors and latencies on cognitive tasks. *Learning and Individual Differences, 1*, 179–202. doi:10.1016/1041-6080(89)90002-2
- Mackintosh, N. (2011). *IQ and human intelligence* (2nd ed.). New York, NY: Oxford University Press.
- Marshalek, B., Lohman, D. F. & Snow, R. E. (1983). The complexity continuum in the radex and hierarchical models of intelligence. *Intelligence, 7*, 107–127. doi:10.1016/0160-2896(83)90023-5
- Mayr, U. & Kliegl, R. (1993). Sequential and coordinative complexity: Age-based processing limitations in figural transformations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 19*, 1297–1320. doi:10.1037/0278-7393.19.6.1297
- Merkel, J. (1885). Die zeitlichen Verhältnisse der Willenstätigkeit. *Philosophische Studien, 2*, 73–127.
- Miller, J. & Ulrich, R. (2013). Mental chronometry and individual differences: Modeling reliabilities and correlations of reaction time means and effect sizes. *Psychonomic Bulletin & Review, 20*, 819–858. doi:10.3758/s13423-013-0404-5
- Moosbrugger, H. & Kelava, A. (2007). *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Heidelberg, Deutschland: Springer.
- Mumaw, R. J., Pellegrino, J. W., Kail, R. V. & Carter, P. (1984). Different slopes for different folks: Process analysis of spatial aptitude. *Memory & Cognition, 12*, 515–521. doi:10.3758/BF03198314
- Neisser, U., Boodoo, G., Bouchard, T. J., Boykin, A. W., Brody, N., Ceci, S. J., ... Urbina, S. (1996). Intelligence: Knowns and unknowns. *American Psychologist, 51*, 77–101. doi:10.1037/0003-066X.51.2.77
- Neubauer, A. C. (1995). *Intelligenz und Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung*. Graz, Österreich: Springer.
- Neubauer, A. C., Bauer, C. & Höller, G. (1992). Intelligence, attention, motivation and speed-accuracy trade-off in the Hick paradigm. *Personality and Individual Differences, 13*, 1325–1332. doi:10.1016/0191-8869(92)90175-O

- Neubauer, A. C. & Bucik, V. (1996). The mental speed-IQ relationship: Unitary or modular? *Intelligence*, 22, 23–48. doi:10.1016/S0160-2896(96)90019-7
- Neubauer, A. C. & Fink, A. (2003). Fluid intelligence and neural efficiency: Effects of task complexity and sex. *Personality and Individual Differences*, 35, 811–827.
- Nietfeld, J. & Bosma, A. (2003). Examining the self-regulation of impulsive and reflective response styles on academic tasks. *Journal of Research in Personality*, 37, 118–140. doi:10.1016/S0092-6566(02)00564-0
- Oberauer, K., Schulze, R., Wilhelm, O. & Süß, H.-M. (2005). Working memory and intelligence - their correlation and their relation: Comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2005). *Psychological Bulletin*, 131, 61–65. doi:10.1037/0033-2909.131.1.61
- O'Connor, T. A. & Burns, N. R. (2003). Inspection time and general speed of processing. *Personality and Individual Differences*, 35, 713–724. doi:10.1016/S0191-8869(02)00264-7
- Penrose, L. & Raven, J. (1936). A new series of perceptual tests: Preliminary communication. *British Journal of Medical Psychology*, 16, 97–104. doi:10.1111/j.2044-8341.1936.tb00690.x
- Phillips, L. H. & Rabbitt, P. M. A. (1995). Impulsivity and speed-accuracy strategies in intelligence test performance. *Intelligence*, 21, 13–29. doi:10.1016/0160-2896(95)90036-5
- Plomin, R., DeFries, J., Knopik, V. & Neiderhiser, J. (2013). *Behavioral genetics* (6th ed.). New York, NY: Word Publisher.
- Rabbitt, P. M. A. (1990). Applied cognitive gerontology: Some problems, methodologies and data. *Applied Cognitive Psychology*, 4, 225–246. doi:10.1002/acp.2350040402
- Rammsayer, T. H. & Brandler, S. (2007). Performance on temporal information processing as an index of general intelligence. *Intelligence*, 35, 123–139. doi:10.1016/j.intell.2006.04.007
- Raven, J. (1938). *Progressive Matrices: A perceptual test of intelligence*. London, England: H. K. Lewis.
- Raykov, T. & Marcoulides, G. A. (2000). *A first course in structural equation modeling*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

- Ridderinkhof, K. R. & Van der Molen, M. W. (1997). Mental resources, processing speed, and inhibitory control: A developmental perspective. *Biological Psychology*, 45, 241–261. doi:10.1016/S0301-0511(96)05230-1
- Rinkenauer, G., Osman, A., Ulrich, R., Müller-Gethmann, H. & Mattes, S. (2004). On the locus of speed-accuracy trade-off in reaction time: Inferences from the lateralized readiness potential. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 261–282. doi:10.1037/0096-3445.133.2.261
- Roberts, R. D. & Stankov, L. (1999). Individual differences in speed of mental processing and human cognitive abilities: Toward a taxonomic model. *Learning and Individual Differences*, 11, 1–120. doi:10.1016/S1041-6080(00)80007-2
- Roskam, E. E. (1997). Models for speed and time-limit tests. In W. J. van der Linden & R. K. Hambleton (Eds.), *Handbook of modern item response theory* (pp. 187–208). New York, NY: Springer. doi:10.1007/978-1-4757-2691-6_11
- Rosseel, Y. (2012). Lavaan: An R package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software*, 48, 1–36.
- Roth, E. (1964). Die Geschwindigkeit der Verarbeitung von Information und ihr Zusammenhang mit Intelligenz. *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, 11, 616–623.
- Salkind, N. J. & Wright, J. C. (1977). The development of reflection-impulsivity and cognitive efficiency. *Human Development*, 20, 377–387. doi:10.1159/000271569
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103, 403–428.
- Satorra, A. & Bentler, P. M. (1988). Scaling corrections for chi-square statistics in covariance structure analysis. In *Proceedings of the Business and Economic Statistics Section of the American Statistical Association* (pp. 308–313). Alexandria, VA: American Statistical Association.
- Satorra, A. & Bentler, P. M. (2001). A scaled difference chi-square test statistic for moment structure analysis. *Psychometrika*, 66, 507–514.

- Scheres, A., Oosterlaan, J., Swanson, J., Morein-Zamir, S., Meiran, N., Schut, H., . . . Sergeant, J. A. (2003). The effect of methylphenidate on three forms of response inhibition in boys with ADHD. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 31, 105–120.
- Schmidt, J. U. (1983). *Berliner Lehrlingsuntersuchung 1982*. Berlin, Deutschland: Freie Universität Berlin, Fachbereich Erziehungs- und Unterrichtswissenschaften, Institut für Psychologie.
- Schneider, W., Eshman, A. & Zuccolotto, A. (2002). *E-prime 2.0 user's guide*. Pittsburg, PA: Psychological Software Tools.
- Schweizer, K. (1989). Relating reaction time components and intelligence. *Personality and Individual Differences*, 10, 701–707.
- Schweizer, K. (1991). On the replicability of the relation between reaction time components and intelligence. *Personality and Individual Differences*, 12, 857–864. doi:10.1016/0191-8869(91)90152-2
- Schweizer, K. (1996). The speed-accuracy transition due to task complexity. *Intelligence*, 22, 115–128. doi:10.1016/S0160-2896(96)90012-4
- Schweizer, K. (1998). Complexity of information processing and the speed-ability relationship. *The Journal of General Psychology*, 125, 89–102. doi:10.1080/00221309809595578
- Schweizer, K. (2006a). The fixed-links model for investigating the effects of general and specific processes on intelligence. *Methodology*, 2, 149–160. doi:10.1027/1614-2241.2.4.149
- Schweizer, K. (2006b). The fixed-links model in combination with the polynomial function as a tool for investigating choice reaction time data. *Structural Equation Modeling*, 13, 403–419. doi:10.1207/s15328007sem1303_4
- Schweizer, K. & Moosbrugger, H. (2004). Attention and working memory as predictors of intelligence. *Intelligence*, 32, 329–347.
- Sheppard, L. D. & Vernon, P. A. (2008). Intelligence and information processing: A review of 50 years of research. *Personality and Individual Differences*, 44, 535–551. doi:10.1016/j.paid.2007.09.015

- Sorensen, L. J. & Woltz, D. J. (2015). Transforming response time and errors to address trade-offs in complex measures of processing speed. *Learning and Individual Differences*, 40, 73–83. doi:10.1016/j.lindif.2015.04.002
- Spearman, C. (1904). General intelligence, objectively determined and measured. *American Journal of Psychology*, 15, 201–293.
- Spearman, C. (1914). The theory of two factors. *Psychological Review*, 12, 101–115.
- Spearman, C. (1927). *The abilities of man: Their nature and measurement*. New York, NY: Macmillan.
- Spearman, C. & Jones, L. W. (1950). *Human ability*. Oxford, England: Macmillan.
- Stankov, L. (2000). Complexity, metacognition, and fluid intelligence. *Intelligence*, 28, 121–143. doi:10.1016/S0160-2896(99)00033-1
- Stankov, L. & Crawford, J. D. (1993). Ingredients of complexity in fluid intelligence. *Learning and Individual Differences*, 5, 73–111. doi:10.1016/1041-6080(93)90007-F
- Stankov, L. & Roberts, R. D. (1997). Mental speed is not the basic process of intelligence. *Personality and Individual Differences*, 22, 69–84. doi:10.1016/S0191-8869(96)00163-8
- Stankov, L. & Schweizer, K. (2007). Ravens Progressive Matrices, manipulations of complexity and measures of accuracy, speed and confidence. *Psychology Science*, 49, 326–342.
- Sternberg, R. J. (1977). Component processes in analogical reasoning. *Psychological Review*, 84, 353–378. doi:10.1037/0033-295X.84.4.353
- Strenze, T. (2007). Intelligence and socioeconomic success: A meta-analytic review of longitudinal research. *Intelligence*, 35, 401–426. doi:10.1016/j.intell.2006.09.004
- Thomas, P., Rammsayer, T. H., Schweizer, K. & Troche, S. J. (2015). Elucidating the functional relationship between working memory capacity and psychometric intelligence: A fixed-links modeling approach for experimental repeated-measures designs. *Advances in Cognitive Psychology*, 11, 3–13. doi:10.5709/acp-0166-6
- Thurstone, L. L. (1931). Multiple factor analysis. *Psychological Review*, 38, 406–427. doi:10.1037/h0069792

- Thurstone, L. L. (1938). *Primary mental abilities*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Ullén, F., Söderlund, T., Kääriä, L. & Madison, G. (2012). Bottom-up mechanisms are involved in the relation between accuracy in timing tasks and intelligence - further evidence using manipulations of state motivation. *Intelligence*, 40, 100–106. doi:10.1016/j.intell.2012.01.012
- Unsworth, N., Redick, T. S., Lakey, C. E. & Young, D. L. (2010). Lapses in sustained attention and their relation to executive control and fluid abilities: An individual differences investigation. *Intelligence*, 38, 111–122. doi:10.1016/j.intell.2009.08.002
- Unsworth, N. & Spillers, G. J. (2010). Working memory capacity: Attention control, secondary memory, or both? A direct test of the dual-component model. *Journal of Memory and Language*, 62, 392–406. doi:10.1016/j.jml.2010.02.001
- Valerius, S. & Sparfeldt, J. R. (2014). Consistent g- as well as consistent verbal-, numerical- and figural-factors in nested factor models? Confirmatory factor analyses using three test batteries. *Intelligence*, 44, 120–133. doi:10.1016/j.intell.2014.04.003
- van Leeuwen, M., van den Berg, S. M., Hoekstra, R. A. & Boomsma, D. I. (2007). Endophenotypes for intelligence in children and adolescents. *Intelligence*, 35, 369–380. doi:10.1016/j.intell.2006.09.008
- Verhaeghen, P., Kliegl, R. & Mayr, U. (1997). Sequential and coordinative complexity in time-accuracy functions for mental arithmetic. *Psychology and Aging*, 12, 555–564. doi:10.1037/0882-7974.12.4.555
- Vernon, P. A. (1987). *Speed of information processing and intelligence*. Norwood, NJ: Ablex.
- Vernon, P. A. (1989). The generality of g. *Personality and Individual Differences*, 10, 803–804. doi:10.1016/0191-8869(89)90129-3
- Vernon, P. A. & Jensen, A. R. (1984). Individual and group differences in intelligence and speed of information processing. *Personality and Individual Differences*, 5, 411–423. doi:10.1016/0191-8869(84)90006-0

- Vernon, P. A. & Kantor, L. (1986). Reaction time correlations with intelligence test scores obtained under either timed or untimed conditions. *Intelligence*, 10, 315–330. doi:10.1016/0160-2896(86)90002-4
- Vernon, P. A., Nador, S. & Kantor, L. (1985). Reaction times and speed-of-processing: Their relationship to timed and untimed measures of intelligence. *Intelligence*, 9, 357–374. doi:10.1016/0160-2896(85)90020-0
- Vernon, P. A. & Weese, S. E. (1993). Predicting intelligence with multiple speed of information-processing tests. *Personality and Individual Differences*, 14, 413–419. doi:10.1016/0191-8869(93)90310-Y
- Vernon, P. E. (1950). *The structure of human abilities*. New York, NY: Wiley.
- Vernon, P. E. (1969). *Intelligence and cultural environment*. London, England: Methuen.
- Vigneau, F., Blanchet, L., Loranger, M. & Pépin, M. (2002). Response latencies measured on IQ tests: Dimensionality of speed indices and the relationship between speed and level. *Personality and Individual Differences*, 33, 165–182. doi:10.1016/S0191-8869(01)00145-3
- Walczyk, J. J. & Griffith-Ross, D. A. (2006). Time restriction and the linkage between subcomponent efficiency and algebraic inequality success. *Journal of Educational Psychology*, 98, 617–627. doi:10.1037/0022-0663.98.3.617
- Walczyk, J. J., Kelly, K. E., Meche, S. D. & Braud, H. (1999). Time limitations enhance reading comprehension. *Contemporary Educational Psychology*, 24, 156–165. doi:10.1006/ceps.1998.0992
- Weiss, R. H. (2006). *Grundintelligenztest Skala 2 - Revision CFT 20-R - Manual*. Göttingen, Deutschland: Hogrefe.
- Wilhelm, O. & Oberauer, K. (2006). Why are reasoning ability and working memory capacity related to mental speed? An investigation of stimulus-response compatibility in choice reaction time tasks. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18, 18–50. doi:10.1080/09541440500215921
- Wilhelm, O. & Schulze, R. (2002). The relation of speeded and unspeeded reasoning with mental speed. *Intelligence*, 30, 537–554. doi:10.1016/S0160-2896(02)00086-7

- Wothke, W. (1993). Nonpositive definite matrices in structural modeling. In K. A. Bollen & J. S. Long (Eds.), *Testing structural equation models* (pp. 256–293). Newbury Park, CA: Sage.
- Yerkes, R. M. & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459–482. doi:10.1002/cne.920180503
- Zebec, M. S. (2004). A contribution to the analysis of human speed of information processing: Developmental and differential arguments. *Drutvena Istraivanja*, 13, 267–292.
- Zimmerman, W. S. (1954). Hypotheses concerning the nature of the spatial factors. *Educational and Psychological Measurement*, 14, 396–400. doi:10.1177/001316445401400220

Anhang A

Die Instruktionen der experimentellen Aufgaben

Allgemeine Instruktion, für alle Aufgaben identisch

1. Antworten Sie so schnell wie möglich, versuchen Sie aber auch Fehler zu vermeiden. Wenn Sie einen Fehler machen ertönt ein Warnsignal.

2. Zuerst gibt es einen Übungsdurchgang. Falls es noch Fragen gibt können Sie diese jetzt oder nach dem Übungsdurchgang stellen.

Hick-Aufgabe

1. Einfachste Bedingung (H0): In dieser Aufgabe wird Ihnen jeweils ein Rechteck präsentiert. In diesem Rechteck erscheint in unterschiedlichen Zeitabständen ein Pluszeichen. Ihre Aufgabe besteht darin, sobald das Pluszeichen erscheint, die entsprechende Taste zu drücken. Wenn Sie Linkshänder sind benutzen sie die gelbe Taste mit dem linken Zeigefinger. Wenn Sie Rechtshänder sind benutzen Sie die grüne Taste mit dem rechten Zeigefinger. Platzieren Sie bitte Ihren Zeigefinger so, dass er auf der richtigen Taste ist.

2. Zweite Bedingung (H1): In der nächsten Aufgabe werden Ihnen jeweils zwei Rechtecke präsentiert. In unterschiedlichen Zeitabständen erscheint jeweils ein Pluszeichen in einem der beiden Rechtecke. Ihre Aufgabe ist es, wenn das Pluszeichen links erscheint mit dem linken Zeigefinger die gelbe und, wenn es rechts erscheint mit dem rechten Zeigefinger die grüne Taste zu drücken. Platzieren Sie bitte Ihre Finger so, dass die beiden Zeigefinger auf den unteren Tasten (gelb und grün) sind.

3. Dritte Bedingung (H2): In der nächsten Aufgabe werden Ihnen jeweils vier Rechtecke präsentiert. In unterschiedlichen Zeitabständen erscheint jeweils ein Pluszeichen in einem der vier Rechtecke. Ihre Aufgabe ist es, wenn das Pluszeichen oben links erscheint mit dem rechten Mittelfinger die rote, unten links mit dem linken Zeigefinger die gelbe, unten rechts mit dem rechten Zeigefinger die grüne und oben rechts mit dem rechten Mittelfinger die blaue Taste zu drücken. Platzieren Sie bitte Ihre Finger so, dass die beiden Zeigefinger auf den unteren Tasten (gelb und grün) und die beiden Mittelfinger auf den oberen Tasten (rot und blau) sind.

Flanker-Aufgabe

1. Allgemein: Zum Antworten verwenden Sie die beiden Zeigefinger. Platzieren Sie den linken Zeigefinger auf der gelben und den rechten auf der grünen Taste.

2. Einfachste Bedingung (F0): In der folgenden Übung wird Ihnen immer ein Kreuz gefolgt von einem Pfeil in der Mitte des Bildschirms präsentiert. Jedes Mal, wenn ein Pfeil erscheint, sollen Sie so schnell wie möglich mit dem Zeigefinger die entsprechende Taste drücken. Wenn Sie Linkshänder sind benutzen sie die gelbe Taste mit dem linken Zeigefinger. Wenn Sie Rechtshänder sind benutzen Sie die grüne Taste mit dem rechten Zeigefinger.

3. Zweite Bedingung (F1): Im zweiten Durchgang sollen Sie nun angeben, in welche Richtung der Pfeil zeigt. Falls der Pfeil nach rechts zeigt, drücken Sie bitte die grüne Taste, falls er nach links zeigt die gelbe Taste.

4. Dritte und vierte Bedingung (F2* und F3*): In diesem Durchgang werden die Pfeile jeweils rechts und links entweder von zwei anderen oder von zwei gleichen Pfeilen umgeben sein (z.B. <<<<< oder >><>>). Sie sollen jeweils angeben, in welche Richtung der MITTLERE Pfeil zeigt. Wenn der mittlere Pfeil nach rechts zeigt, drücken Sie wiederum die grüne und wenn er nach links zeigt die gelbe Taste.

Swaps-Aufgabe

1. Einfachste Bedingung (S0): In der folgenden Aufgabe werden Ihnen jeweils die Buchstaben J K L in unterschiedlichen Reihenfolgen in der Mitte des Bildschirms präsentiert. Ihre Aufgabe ist es, die Reihenfolge so schnell wie möglich mit dem Zeigefinger ihrer dominanten Hand auf der Tastatur einzugeben.

2. Zweite bis fünfte Bedingung (S1 bis S4): Im Folgenden besteht Ihre Aufgabe darin, die Positionen der drei Buchstaben im Kopf auszutauschen. Wie oft und welche Position Sie tauschen sollen, sehen Sie im oberen Teil des Bildschirms. Geben Sie ihre Lösung jeweils mit der Tastatur ein. Führen Sie von links nach rechts einen Tausch nach dem anderen durch.

Ein Beispiel

Die zu Beginn präsentierte Reihenfolge ist:

J K L

Am oberen Seitenrand steht:

1 und 2

1 und 3

2 und 3

Die richtigen Antworten sind nacheinander:

K J L

L J K

L K J

Behalten Sie die Zwischenschritte im Kopf und geben Sie jeweils nur die letzte Lösung mit dem Zeigefinger ihrer dominanten Hand auf der Tastatur ein (hier LKJ). Pro Präsentation muss ein bis vier Mal getauscht werden.

Anhang B

Tabelle B1

Prozentuale Häufigkeit von Fehlern erster (zu früh geantwortet) und zweiter Art (falsche Antwort) an allen korrekten Antworten der 200 untersuchten Vpn

	Fehler 1. Art: zu früh geantwortet	Fehler 2. Art: falsch geantwortet
Hick 0	1.60 %	
Hick 1	0.10 %	0.60 %
Hick 2	0.02 %	2.00 %
Flanker 0	0.20 %	
Flanker 1		3.10 %
Flanker 2*		0.30 %
Flanker 3*		5.00 %

Anmerkungen. Wenn eine Fehlerarte in einer Bedingung überhaupt nicht vorkam, ist kein Wert eingetragen.

Anhang C

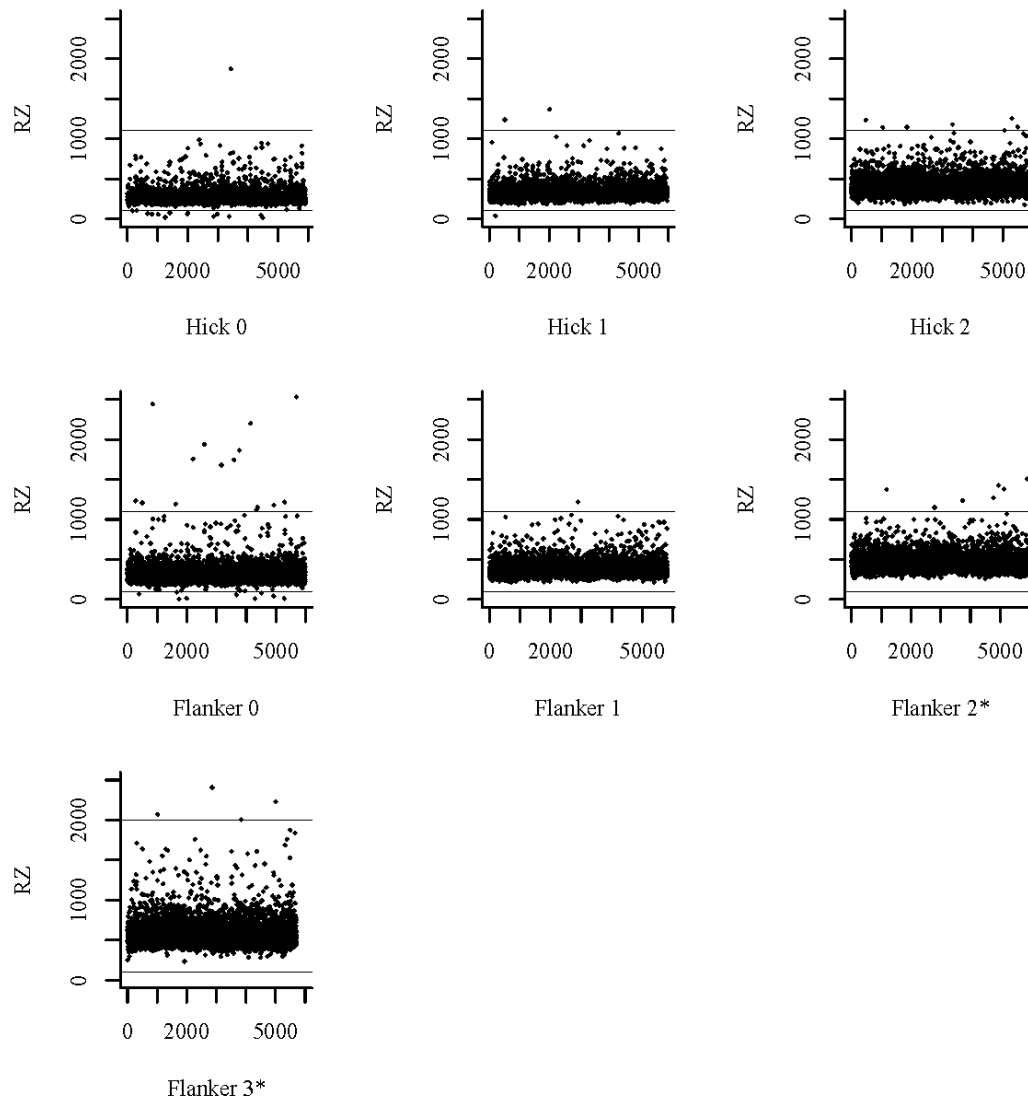


Abbildung C1. Ausreisser. Dargestellt sind alle Reaktionszeiten auf korrekt beantwortete Trials der Hick- und Flanker-Bedingungen. Die Reaktionszeiten wurden ungeordnet durchnummeriert. Diese Nummer ist auf der x-Achse abgetragen. Auf der y-Achse ist die Reaktionszeit abgetragen. Mit einer horizontalen Linie ist jeweils eingezeichnet, welche Werte ausgeschlossen wurden. Werte unterhalb der unteren Grenze und solche oberhalb der oberen wurden ausgeschlossen. Die untere Grenze lag für alle Bedingungen bei 100 ms, die obere für alle Bedingungen ausser F3* bei 1100 ms. Für F3* musste eine höhere Grenze von 2000 ms gewählt werden, weil diese Bedingung insgesamt komplexer war. Zwei Werte von F2* und ein Wert von F3* sind nicht abgebildet, weil diese höher als 25 Sekunden waren. RZ = Reaktionszeit. $N = 200$.

Anhang D

Tabelle D1
Prozentuale Häufigkeit von Ausreissern

	Ausreisser
Hick 0	.20 %
Hick 1	.05 %
Hick 2	.10 %
Flanker 0	.40 %
Flanker 1	.02 %
Flanker 2*	.20 %
Flanker 3*	.10 %

Anmerkungen. Für alle Hick- und Flanker-Bedingungen ist angegeben, wie viel Prozent der Antworten Ausreisser waren und deswegen ausgeschlossen werden mussten.

Anhang E

Tabelle E1
Kontrollvariablen: Alter und Geschlecht

			Geschlechtsunterschied				Korrelation mit Alter				
			Welchs <i>t</i> -Test			Wilcoxon-Rang-summentest		Pearson-Korrelation		Spearman-Korrelation	
			<i>t</i>	df	<i>p</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
g _{CFT} -Faktor			-0.28	131.7	.78	4388	.86	.10	.14	.08	.25
RZ	Hick	0	0.57	143.9	.57	0.92	.36	-.13	.06	-.05	.47
		1	0.26	119.0	.80	0.47	.64	-.13	.07	-.08	.24
		2	1.39	144.4	.17	1.09	.27	-.07	.31	.00	.95
	Flanker	0	-0.06	124.1	.95	0.05	.96	.04	.60	.09	.18
		1	1.52	113.8	.13	2.81	.005	-.02	.74	-.01	.84
		2	2.61	156.8	.01	2.33	.02	.04	.55	.08	.29
	Swaps	3	2.19	143.7	.03	2.41	.02	-.02	.74	.04	.55
		0	-0.85	123.6	.40	-0.63	.53	.02	.78	-.01	.91
		1	-1.75	100.7	.08	-1.41	.16	.09	.19	.08	.27
		2	-1.08	97.2	.28	-0.19	.85	.00	.97	.00	.99
		3	-0.83	102.1	.41	-0.38	.71	.12	.10	.10	.18
		4	-1.50	111.0	.13	-1.40	.16	.04	.58	.03	.64
Fehler-rate	Hick	1	-2.13	104.0	.04	-2.39	.02	-.08	.27	-.09	.19
		2	-0.09	135.4	.92	-0.20	.84	-.20	.004	-.24	.0007
	Flanker	1	-2.78	89.6	.01	-2.70	.01	-.10	.16	-.03	.65
		2	0.82	178.9	.41	0.55	.57	.04	.54	.07	.34
		3	-2.78	93.3	.01	-2.61	.01	-.19	.01	-.12	.09
	Swaps	0	-0.78	113.9	.43	-0.60	.55	-.04	.54	-.02	.73
		1	-1.01	152.6	.32	-1.44	.15	-.07	.30	-.09	.22
		2	-1.05	120.3	.30	-1.17	.24	-.12	.10	-.11	.11
		3	-2.27	129.1	.02	-2.70	.01	-.10	.16	-.14	.05
		4	-0.67	137.7	.50	-0.98	.33	-.08	.24	-.07	.30

Anmerkungen. Es wurde jeweils für die Reaktionszeit und die Fehlerrate aller Bedingungen sowie für den g_{CFT}-Faktor untersucht, ob die 67 Männer sich von den 133 Frauen statistisch unterscheiden. Zusätzlich wurden die Korrelationen zwischen diesen Variablen und dem Alter analysiert. Das Alpha-Niveau wurde jeweils für multiples Testen (Anzahl: 23 Vergleiche) mittels einer Bonferroni-Korrektur angepasst ($p = .002$). Aus diesem Grund sind bei p -Werten unter .01 mehr als zwei Nachkommastellen angegeben. Dargestellt sind jeweils parametrische und nicht-parametrische Analysen. $N = 200$. Die Bedingungen sind pro Aufgabe jeweils aufsteigend nummeriert. RZ = Reaktionszeit, g_{CFT}-Faktor extrahiert aus den vier CFT Skalensummenwerten.

Anhang F

Tabelle F1

Reaktionszeit-Intelligenz- und Fehlerrate-Intelligenz-Korrelationen inklusive *p*-Werte für die gesamte Stichprobe, die Stichprobe mit niedrigeren (Int-) und höheren (Int+) Intelligenz

			Total		Vergleich Int- und Int+					
					Int-		Int+		Vergleich	
			<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>z</i>	<i>p</i>
RZ	Hick	0	.26	***	.28	*	.11	.32	1.06	.15
		1	.30	***	.22	*	.11	.33	0.73	.23
		2	.34	***	.28	*	.20	.08	0.55	.29
	Flanker	0	.37	***	.32	**	.08	.47	1.54	.06
		1	.38	***	.36	**	.17	.12	1.27	.10
		2	.41	***	.39	**	.23	*	1.08	.14
	Swaps	3	.37	***	.30	**	.24	*	0.40	.34
		0	.36	***	.20	.08	.06	.63	0.92	.18
		1	.40	***	.35	**	.35	**	-0.01	.49
		2	.35	***	-.01	.97	.33	**	-2.15	*
		3	.29	***	.11	.32	.25	*	-0.89	.19
		4	.22	**	.07	.53	.22	*	-0.97	.17
Fehler	Hick	1	.00	.99	-.09	.43	.03	.77	-0.77	.22
		2	-.04	.60	-.07	.55	.15	.18	-1.36	.09
	Flanker	1	.02	.78	-.03	.81	-.02	.83	-0.02	.49
		2	.11	.13	.13	.25	.13	.27	0.02	.49
		3	-.02	.79	-.05	.63	.02	.85	-0.47	.32
	Swaps	0	.06	.44	-.21	.06	.25	*	-2.86	**
		1	.19	**	.28	*	.02	.87	1.67	.05
		2	.18	*	.21	.07	.16	.17	0.31	.38
		3	.25	**	.04	.73	.25	*	-1.32	.09
		4	.26	**	.19	.09	.33	**	-0.96	.17

Anmerkungen. Die Korrelationskoeffizienten von Int- und Int+ wurden mittel zweiseitigem Test (*Fisher's r-to-Z transformation* und anschliessender z-Standardisierung (siehe (Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2011)) auf Signifikanz geprüft. RZ = Reaktionszeit, Total = gesamte Stichprobe ($N = 200.$), Int- = Gruppe mit niedrigerer Intelligenz ($N = 80$), Int+ = Gruppe mit höherer Intelligenz ($N = 80$).

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Anhang G

Tabelle G1

Vergleich der parametrischen Pearson- und nicht-parametrischen Spearman-Korrelationen

			Korrelation mit Intelligenz		
			Pearson	Spearman	Differenz
RZ	Hick	0	.26	.23	.03
		1	.30	.28	.02
		2	.34	.33	.01
	Flanker	0	.37	.34	.03
		1	.38	.32	.06
		2	.41	.35	.06
		3	.37	.33	.04
	Swaps	0	.36	.37	.01
		1	.40	.40	.00
		2	.35	.40	.05
		3	.29	.31	.02
		4	.22	.23	.01
Fehlerrate	Hick	1	.00	-.02	.02
		2	-.04	-.02	.02
	Flanker	1	.02	-.02	.04
		2	.11	.07	.04
		3	-.02	-.02	.00
	Swaps	0	.06	.06	.00
		1	.19	.09	.10
		2	.18	.12	.06
		3	.25	.26	.01
		4	.26	.24	.02

Anmerkungen. Betrachtet wurden die Zusammenhänge zwischen der Intelligenz und den Reaktionszeiten und Fehlerraten der verschieden komplexen Bedingungen. Ebenfalls dargestellt ist der Betrag der Differenz zwischen den beiden Koeffizienten. $N = 200$. RZ = Reaktionszeit. Die Bedingungen wurden jeweils aufsteigend nummeriert.

Anhang H

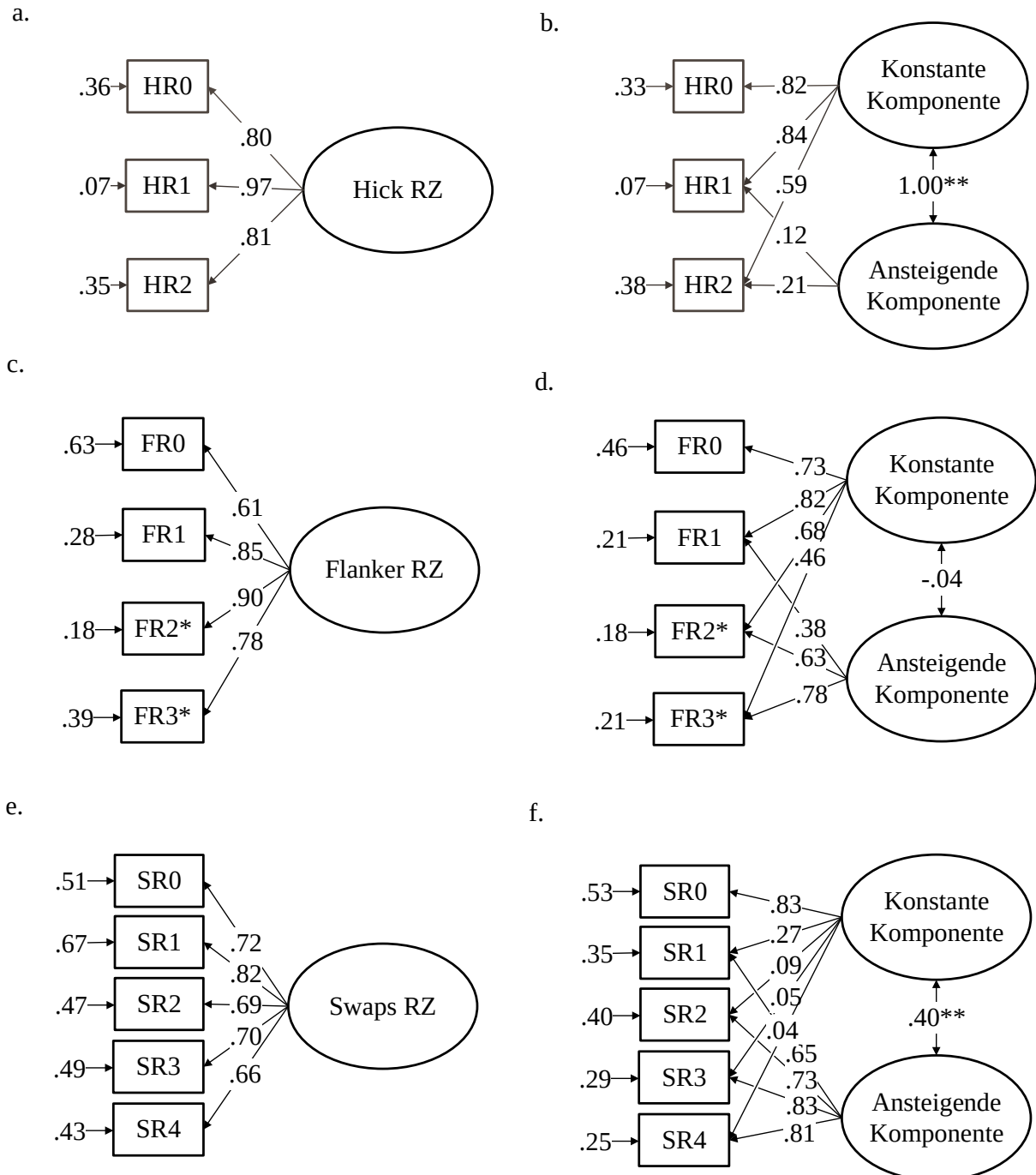


Abbildung H1. Messmodelle der Reaktionszeiten der Hick- und Flanker-Aufgabe. Darstellung des einfaktoriellen Modells sowie des Fixed-Links-Modells für die Hick- (a) und (b), Flanker- (c) und (d) und die Swaps-Aufgabe (e) und (f). RZ = Reaktionszeit, HR = Hick RZ, FR = Flanker RZ, SR = Swaps RZ, wobei die Bedingungen entsprechend der Komplexität aufsteigend nummeriert sind. Die Korrelation zwischen der konstanten und der ansteigenden Komponente der Flanker-Aufgabe war mit $p = .76$ nicht signifikant. $N = 200$. $**p < .01$.

Anhang I

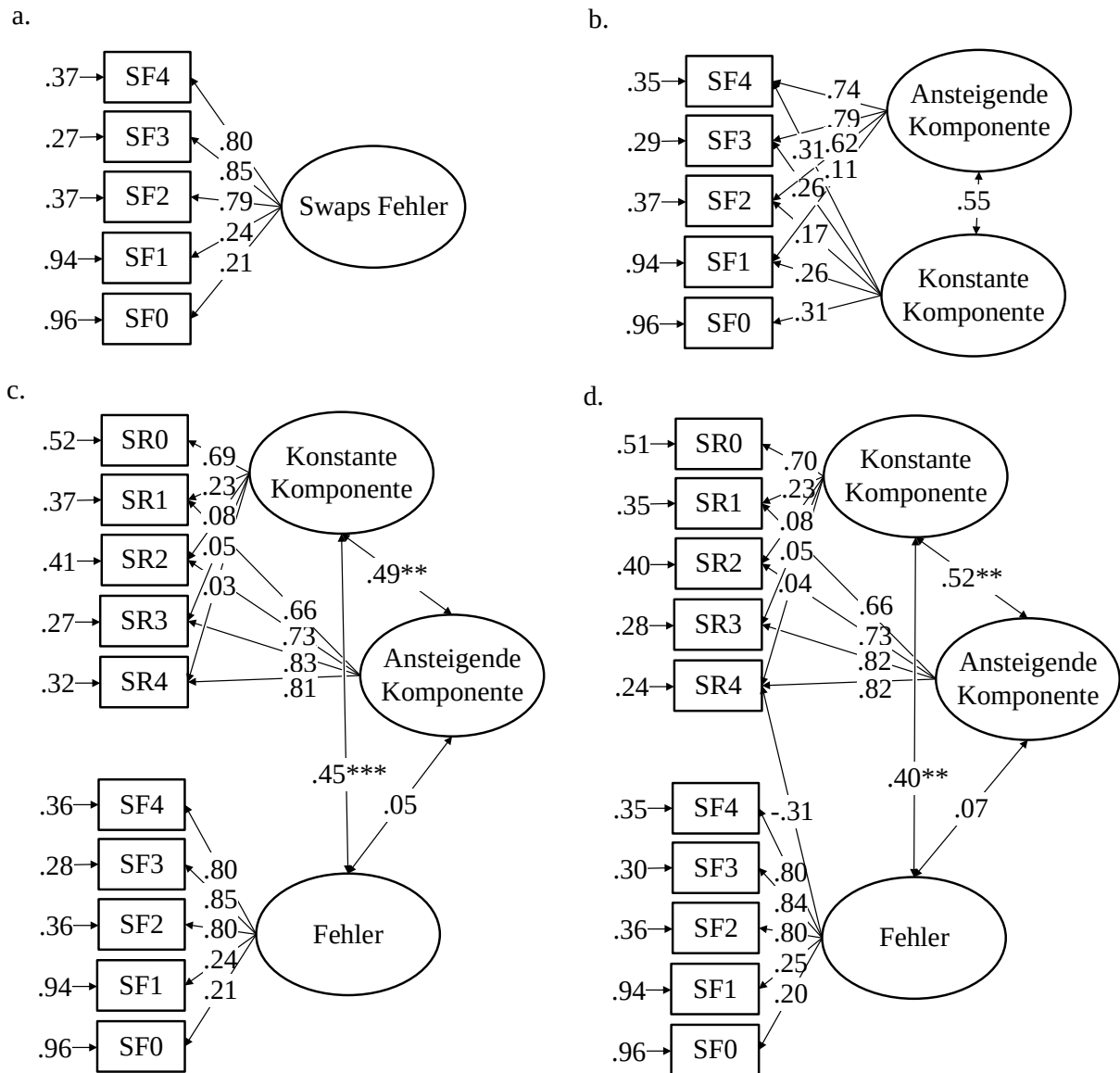


Abbildung 11. Darstellung des einfaktoriellen Modells und des Fixed-Links-Modells für die Fehlerrate der Swaps-Aufgabe (a) und (b) sowie die kombinierten Reaktionszeit-Fehlerrate-Modelle. In Modell (c) wurde das Fixed-Links-Modell der Reaktionszeit mit dem einfaktoriellen Modell der Fehlerrate kombiniert. Modell (d) enthält eine zusätzliche Residualladung von SR4 auf dem Fehler-Faktor. S = Swaps-Aufgabe, R = Reaktionszeit, F = Fehlerrate, wobei die Bedingungen entsprechend der Komplexität aufsteigend nummeriert sind. (b) Die Korrelation zwischen der konstanten und der ansteigenden Fehler-Komponente war mit $p = .08$ nicht signifikant. Die Korrelation zwischen der Fehler-Komponente und der ansteigenden Komponente war in (c) mit $p = .52$ und in (d) mit $p = .41$ nicht signifikant. $N = 200$.

** $p < .01$. *** $p < .001$.

Anhang J

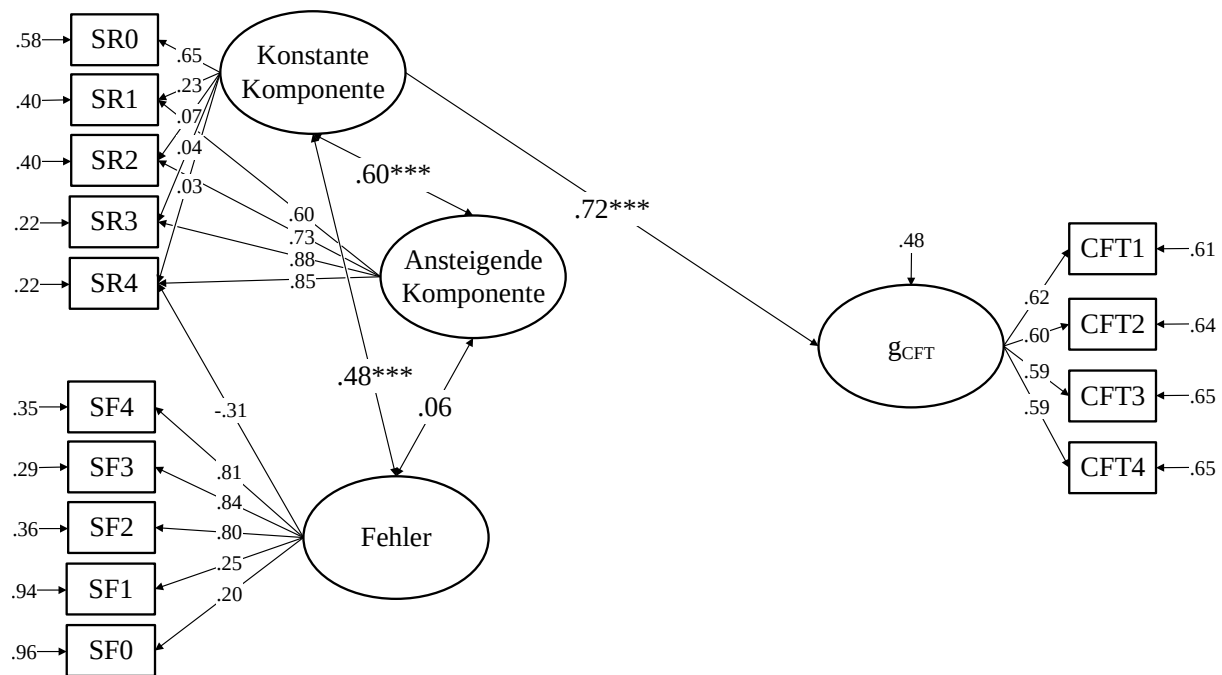


Abbildung J1. CFT 20-R nur durch die konstante Reaktionszeit-Komponente der Swaps-Aufgabe vorhergesagt. SR0 bis SR4 = Reaktionszeiten der fünf Swaps-Bedingungen, SF0 bis SF4 = Fehlerraten der fünf Swaps-Bedingungen, CFT1 bis CFT4 = vier Skalen des CFT 20-R. Die Ladung von SF2 auf der aus den Fehlerraten extrahierten Komponente war mit $p = .08$ nicht signifikant. Alle anderen frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .05$ signifikant. Die Korrelation zwischen der Fehler-Komponente und der ansteigenden Komponente war mit $p = .41$ nicht signifikant. $N = 200$.

** $p < .01$. *** $p < .001$.

Anhang K

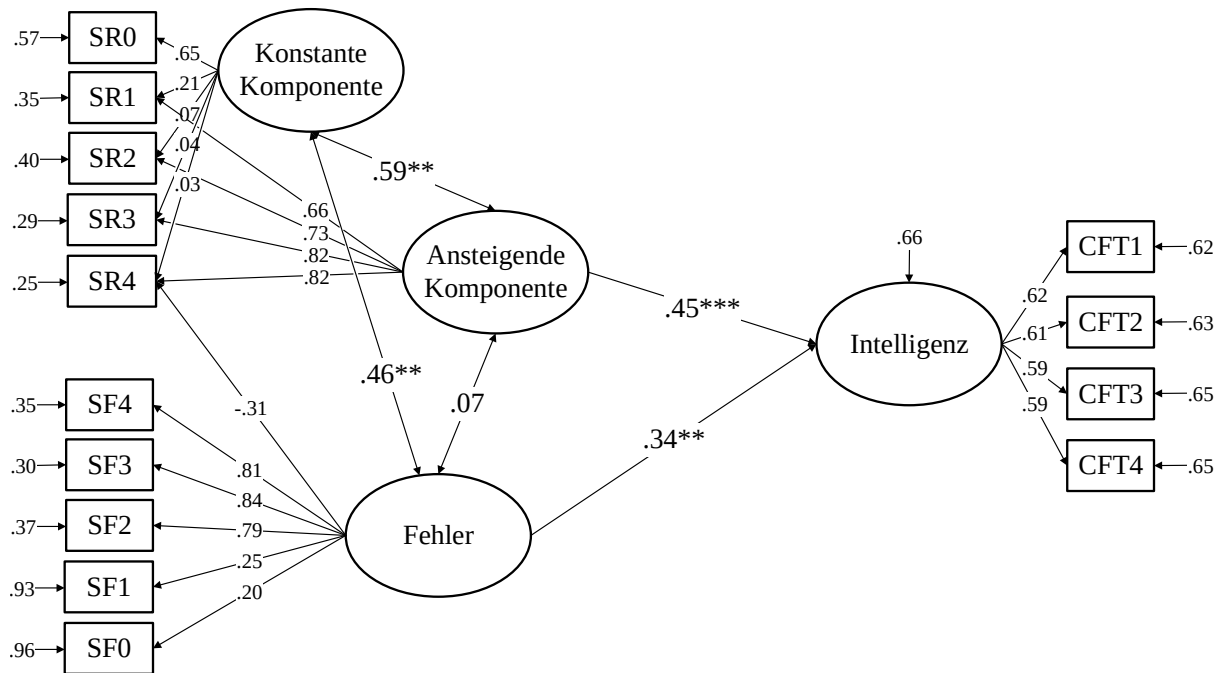


Abbildung K1. CFT 20-R nur durch die ansteigende Reaktionszeit- und die Fehler-Komponente der Swaps-Aufgabe vorhergesagt. SR0 bis SR4 = Reaktionszeiten der fünf Swaps-Bedingungen, SF0 bis SF4 = Fehlerraten der fünf Swaps-Bedingungen, CFT1 bis CFT4 = vier Skalen des CFT 20-R. Die Ladung von SF1 auf der aus den Fehlerraten extrahierten Komponente war mit $p = .08$ nicht signifikant. Alle anderen frei geschätzten Ladungen waren mit $p < .05$ signifikant. Die Korrelation zwischen der Fehler-Komponente und der ansteigenden Komponente war mit $p = .41$ nicht signifikant. $N = 200$.

** $p < .01$. *** $p < .001$.

Anhang L

Tabelle L1
Korrelationsmatrix aller mit dem g-Faktor korrelierter Aufgaben

	CFT1	CFT2	CFT3	CFT4	HR0	HR1	HR2	FR0	FR1	FR2*	FR3*	SR0	SR1	SR2	SR3	SR4	FF2*	FF3*	SF1	SF2	SF3	SF4
CFT1	***																					
CFT2	.42	***																				
CFT3	.31	.37	***																			
CFT4	.36	.38	.33	***																		
HR0	.15	.22	.19	.20	***								.69	.87	.77	.87	.81	.59	.20	.61	.29	*
HR1	.22	.20	.27	.18	.79	***						*	.08	.18	.57	.46	.35	.19	.06	.14	.14	*
HR2	.28	.22	.28	.21	.66	.77	***					***	*	*	.59	.64	.21	.38	*	.07	.09	***
FR0	.33	.27	.20	.26	.59	.62	.63	***				***	***	*	.19	.19	.09	.59	.16	.05	*	***
FR1	.33	.25	.31	.22	.58	.65	.68	.68	***			***	***	.16	.19	.21	.68	.15	***	.22	.26	**
FR2*	.27	.29	.32	.31	.54	.57	.64	.51	.71	***		***	***	***	*	.08	.73	***	**	.10	.11	*
FR3*	.24	.31	.28	.24	.40	.47	.58	.44	.65	.81	***	***	***	*	.13	.12	.83	.07	*	*	.08	***
SR0	.29	.21	.29	.24	.15	.18	.24	.27	.30	.31	.26	***	***	***	***	***	.72	.79	.82	**	**	***
SR1	.24	.25	.34	.33	.03	.12	.16	.22	.23	.31	.24	.44	***	***	***	***	.82	.68	.21	***	*	***
SR2	.24	.21	.32	.25	-.01	.10	.15	.17	.10	.19	.15	.37	.65	***	***	***	.41	.75	.07	.08	*	.06
SR3	.12	.18	.32	.22	-.02	.04	.04	.09	.09	.17	.11	.38	.60	.64	***	***	.84	*	*	.57	.96	.79
SR4	.07	.18	.28	.10	-.01	.05	.03	.09	.09	.12	.11	.26	.54	.59	.77	***	.44	**	**	**	*	**
FF2*	.17	.07	-.02	.08	.02	-.07	-.09	-.12	-.03	.02	-.02	.03	.02	-.06	-.01	-.06		.33	.43	**	.21	*
FF3*	.00	-.01	.02	-.06	.04	.09	-.06	-.04	-.10	-.26	-.13	.02	-.03	.02	-.17	-.20	.07		.14	***	**	*
SF1	.22	.12	.07	.14	.09	.13	.15	.10	.24	.19	.15	-.02	.09	-.13	-.15	-.18	.06	.10	***	***	***	.06
SF2	.28	.02	.10	.13	.04	.11	.13	.14	.09	.12	.14	.19	.23	.13	-.04	-.19	.23	.26	.23		***	***
SF3	.26	.09	.19	.19	.07	.10	.12	.17	.08	.11	.13	.19	.18	.15	.00	-.17	.09	.24	.22	.67		***
SF4	.29	.07	.17	.22	.17	.17	.22	.25	.19	.18	.22	.22	.19	.13	-.02	-.20	.16	.22	.13	.63	.68	

Anmerkungen. $N = 200$. Oberhalb der Diagonalen sind die p -Werte und unterhalb die Pearson-Korrelationen dargestellt.

* $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Erklärung zur Dissertation

Hiermit bestätige ich, dass ich die Dissertation (Titel):

im Fach

unter der Leitung von Prof. Dr.

ohne unerlaubte Hilfe ausgeführt und an keiner anderen Universität zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht habe.

Datum

Unterschrift