

COGNITIVE NEUROSCIENCE OF INTELLIGENCE DIFFERENCES

Überblick

Struktur der Intelligenz

Zwei-Faktoren Theorie (Spearman)

→ auch g-Faktor Theorie genannt

- Spearman fand heraus, dass fast alle Testmodule unterschiedlicher Intelligenztests miteinander korrelieren
- Er schloss daraus, dass es einen allgemeinen Intelligenzfaktor (g-Faktor) gibt, der allen unterschiedlichen Leistungsbereichen zugrunde liegt
- In seinem Modell ging er davon aus, dass der Zusammenhang einzelner Intelligenzfaktoren durch das Produkt ihrer Zusammenhäng mit dem g-Faktor erklärt werden kann: $r(V1, V5) = r(V1, g) \times r(V5, g)$
- Da die einzelnen Faktoren in der Realität allerdings untereinander höher als im Modell angenommen korrelierten [$r(V1, V5) > r(V1, g) \times r(V5, g)$], wurden neben dem g-Faktor zusätzlich Gruppenfaktoren hinzugefügt
- Diese Gruppenfaktoren (verbal, numeric, spatial) erklärt, warum bestimmte Faktoren höher als vom g-Faktor angenommen korrelieren (z.B. korrelieren verschiedene verbale Aufgaben höher miteinander, als eine verbale und eine numerische Aufgabe)

Three-Stratum Modell (Caroll)

→ Mittels Faktorenanalyse wurde das Zwei-Faktoren Modells zu einem hierarchischen Modell mit 3 Schichten weiterentwickelt

1. Schicht (unten):	Spezifische Fähigkeiten, die sich auf bestimmte Aufgaben beziehen
2. Schicht (mitte):	Acht unterschiedliche Intelligenzfaktoren (z.B. fluide Intelligenz, kristalline Intelligenz, visuelle Wahrnehmung, Lernen & Gedächtnis)
3. Schicht (oben):	Allgemeine Intelligenz (g-Faktor)

- Die Größe der Korrelationen der einzelnen Intelligenzfaktoren mit dem g-Faktor sind unterschiedlich, was im Modell durch Distanz dargestellt wird (Je größer die Distanz zwischen g-Faktor und Intelligenzfaktor desto geringer die Korrelation)
- Die Intelligenzfaktoren, die dem g-Faktor am nächsten stehen, sind die fluide und die kristalline Intelligenz)

Korrelate der Intelligenz

Laut einer US-Langzeitstudie von Herrnstein & Murray (1994) korreliert der IQ mit der Häufigkeit verschiedener sozialer Outcomes:

1. Bachelorabschluss (positiv)
2. Armut (negativ)
3. Nicht beendeter Schulabschluss (negativ)
4. Scheidung nach 5 Jahren (positiv)
5. Single Mutter mit dem ersten Baby (negativ)
6. Sozialhilfe mehr als 5 Jahre nach dem ersten Baby (negativ)
7. Mütter von Kindern mit einem IQ < 80 (negativ)

8. Ehemann mindesten einmal im Gefängnis (negativ)

Stabilität und Veränderungen der Intelligenz

Beispielstudien zur Stabilität

Fragestellung: Wie gut kann der aktuelle IQ den IQ zu einem späteren Zeitpunkt vorhersagen?

1. IQ mit 11-Jahren und IQ mit 77 Jahren korreliert zu $r = .63$
(nach Korrektur für Varianzeinschränkung: $r = .73$)
2. IQ mit 11 Jahren und IQ mit 90 Jahren korrelieren zu $r = .54$
(nach Korrektur für Varianzeinschränkung: $r = .67$)
3. Stabilität pro Jahr liegt bei $r = .90$

Intelligenzveränderungen durch Beschulung (Stelzl et al. 1995)

Befund: Je länger Kinder an ihrem 10. Geburtstag bereits in der 4. Klasse waren, desto höher ist ihr IQ

Interpretation:

- Trotz gleichen Alters zeigen sich Intelligenzunterschiede in Abhängigkeit von der Beschulungsdauer
- Beschulung erhöht den IQ (nach Studie um 0,76 IQ-Punkte pro Monat)

Flynn-Effekt (Kohorten-Effekt)

- Effekt, dass die Ergebnisse von IQ-Test pro Dekade um 2-5 IQ-Punkte steigen

Grundlage: Meta-Analyse von Pietsching et al. (2015) mit Daten von mehr als 4 Mio. Probanden aus 271 Studien und 31 Ländern zeigte

Mögliche Erklärungen:

<i>Plausible Erklärungen</i> (beziehen sich auf die Verbesserung von Umweltbedingungen):	<i>Eher unplausible Erklärungen</i>
1. Verbesserung der Ernährung	1. Steigerung der Leistungsfähigkeit durch die Durchmischung ehemals separierter Subpopulationen (Heterosis-Effekt)
2. Verbesserung der (schulischen) Bildung	2. Geübterer Umgang mit Intelligenztests (Test-Weisheit)
3. Sinken des Gehalts von Blei (Blood Lead Level) und anderen neurotoxischen Schadstoffen im Blut	3. Steigerung spezifischer Fähigkeiten (z.B. Verarbeitungsgeschwindigkeit, Fähigkeit ungleiche Objekte zu erkennen) durch neue Erfahrungen und Technologien

Die Basis der Intelligenz

Woher kommen individuelle Intelligenzunterschiede?

Informationsverarbeitung

Das Informationstheoretische Modell der Intelligenz beschreibt die Geschwindigkeit mit der Menschen Informationen verarbeiten können als Maß für die Intelligenz

Empirischer Befund:

Niedrige bis mittlere Korrelationen ($r = .30 - .50$) zwischen der Intelligenz (IQ) und verschiedenen Maßen der Informationsverarbeitung:

1. Reaktionszeit (negative Korrelation)
2. Inspektionszeit (negative Korrelation)
3. Sensorische Diskriminierung

4. Arbeitsgedächtnis (exekutive Funktionen)
5. Habituationsrate bzw. Präferenz von Neuartigem

Problem: Es ist unklar, warum es diese Zusammenhänge gibt, da die Ursachen von individuellen Unterschieden in diesen Aufgaben weitgehend unbekannt sind

Reaktionszeiten als Maß für die Intelligenz

- Die Reaktionszeit (RT) bei einer Wahlentscheidung (z.B. bei einer Jensen-Box) steigt mit zunehmender Anzahl von Wahlmöglichkeiten an (Hick's Law)
- Dieser Zusammenhang wird vom IQ beeinflusst: Bei Menschen mit hohem IQ steigt die RT bei wachsender Anzahl von Alternativen signifikant langsamer an als bei Menschen mit niedrigem IQ
 - Studie von Deary (2001) zeigt diesen Zusammenhang in einer repräsentativen Stichprobe 56-jähriger Schotten (N = 900) → $r(\text{IQ, single-choice RT}) = -.31 < r(\text{IQ, 4-choice-RT}) = .49$
 - IQ korreliert höher mit der RT als mit der Hick's-Kurve
 - RT korreliert höher mit der allgemeinen Intelligenz (g-Faktor) als mit der Leistung in Speedtests

Inspektionszeit als Maß für die Intelligenz

Inspection time task:

Klassischer Ablauf (Nettlebeck, 1976):

1. Kurze Präsentation zweier unterschiedlich langer Linien (Target)
2. Das Target wird rückwirkend maskiert, indem zwei gleich lange Linien (Maske) präsentiert werden
3. Der Proband soll angeben, ob die rechte oder die linke Linie des Targets länger war

Auditorische Version:

- Ein hoher und ein tiefer Ton werden kurz nacheinander präsentiert
- Nach einer Maskierung sollen die Probanden angeben, welchen Ton sie zuerst gehört haben

Bestimmung der Inspektionszeit:

- Das Zeitintervall zwischen Target und Maske (= SOA) wird variiert (10ms – 100ms)
- Die Inspektionszeit beschreibt die SOA, bei dem 95% der Antworten des Probandes korrekt sind

Zusammenhang mit Intelligenz:

Inspektionszeit und Intelligenz korrelieren negativ miteinander
d.h. je höher der IQ desto geringer die Inspektionszeit

	Inspektionszeit	Auditorische Inspektionszeit
Allgemeine Intelligenz (g)	$r = -.36$	$r = -.31$
Fluide Intelligenz (g_f)	$r = -.29$	$r = -.26$
Kristalline Intelligenz (g_c)	$r = -.20$	$r = -.25$

Sensorische Diskriminierung als Maß für die Intelligenz

- Befunde basieren auf einer noch nicht replizierten Studie (Melnick et al., 2013)

Studienaufbau:

- Probanden werden für eine kurze Zeit unterschiedlich große sich bewegende Stimuli präsentiert
- Anschließend soll der Proband angeben, wo sich der Stimuli nach rechts oder nach links bewegt hat
- Als Schwellenwert für die Diskriminierung wird (ähnlich wie bei der Inspektionszeit) die Präsentationsdauer bestimmt, die mindestens notwendig ist um korrekte Antworten geben zu können

Ergebnisse:

1. Je größer der Stimulus, desto schwieriger die Diskriminierung (Hauptergebnis)

2. Je höher der IQ desto besser die Diskriminierung kleiner bewegender Stimuli
3. Je höher der IQ desto schlechter die Diskriminierung großer bewegender Stimuli

Interpretation:

- Intelligenz ist mit der Unterdrückung von großen bewegenden Stimuli assoziiert
- Dies scheint im ersten Moment kontraintuitiv, könnte aber insofern sinnvoll sein, dass große bewegende Stimuli sich häufig im Hintergrund befinden und deshalb weniger relevant sind

Intelligenz und das Arbeitsgedächtnis (Dang et al., 2013)**Studienaufbau**

- 345 chinesischen Studenten bearbeiteten 24 verschieden kognitive Aufgaben innerhalb von in 5-6 Stunden bearbeiteten
- Überprüft wurde, ob die Leistung in den unterschiedlichen Aufgabengabefeldern (verbales Kurzzeitgedächtnis, räumlich-visuelles Kurzzeitgedächtnis, Exekutive Funktionen) mit der fluiden oder kristallinen Intelligenz zusammenhängen

Ergebnisse:

- 1) Verbales Kurzzeitgedächtnis (STM-V) korreliert signifikant mit der kristallinen Intelligenz ($r = .55$)
- 2) Exekutive Funktionen (EF) korrelieren signifikant mit der fluiden Intelligenz ($r = .48$)

Habituationsrate als Maß für die Intelligenz**Metaanalyse (McCall & Carringer, 1993)**

Die Habituationsrate bzw. Präferenz von Neuartigem bei Kleinkindern im Alter von weniger als 6 Monaten korreliert mit dem IQ im Alter von 1 – 8 Jahren (Durchschnitt: $r = .40$)

Aktuelle Studie (Fagan et al., 2007)

Die Präferenz von Neuartigem bei Kleinkindern im Alter von 6-12 Monaten korreliert mit dem IQ im Alter von 21- Jahren ($N = 61$, $r = .34$) und dem akademischen Erfolg (= Anzahl erreichter Bildungslevel pro Jahr; $r = .32$)

Genetik (Verhalten und Molekular)**Erblichkeit der Intelligenz**

- *Galton (1865)* stellte fest, dass erfolgreiche Männer oft erfolgreiche Brüder und Söhne hatten, und folgerte daraus, dass Intelligenz erblich sein muss (methodisch falsche, aber inhaltlich richtige Schlussfolgerung)
- *Bartels et al. (2002)*: Bei 5-Jährigen lässt sich ca. 25 % der Varianz von IQ-Differenzen durch genetische Dispositionen erklären, bei 12-Jährigen ca. 60 % und bei Erwachsenen ca. 70%.
→ die Erblichkeit der Intelligenz steigt mit dem Alter deutlich an
- *Briley & Tucker-Drob (2013)*: Warum steigt die Erblichkeit der Intelligenz mit dem Alter?
→ Metaanalyse von Langzeit-Zwillings und -Adoptionsstudien ($N > 10\,000$)
Mit Erreichen des Schuleinstiegsalters (ca. 6 Jahren) sind der Großteil der IQ-Vorhersage zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr auf die Innovation (= neue genetische Einflüsse), sondern auf die Amplifikation (= Verstärkung bereits früh vorhandener genetischer Einflüsse) zurückzuführen.
- *Tucker-Drob & Bates (2016)*: Metaanalyse zum Einfluss des sozioökonomischen Status auf die Intelligenz
In den USA steigt die Erblichkeit der Intelligenz mit hohem sozioökonomische Status (SoS) an

Dieser Interaktionseffekt ist allerdings nur in den USA, aber nicht in anderen westlichen Ländern (z.B. Deutschland, Schweden, Australien) zu finden

Dies lässt sich dadurch erklären, dass in den USA Intelligenzunterschiede in höherem Ausmaß vom Geld beeinflusst werden, da z.B. für gute Bildung und eine Krankenversicherung viel Geld benötigt wird

Molekulargenetische Studien

1. Kandidatengen-Ansatz

- Als Kandidatengen für die Intelligenz wurde das COMT-Gen (= Gen, dass für das Enzym Catechol-O-Methyltransferase codiert) vermutet
- COMT ist ein Enzym, welches bei dem Abbau verschiedener Catecholamine (v.a. von Dopamin im PFC) beteiligt ist
- Ein Val158Met Polymorphismus auf dem COMT-Gen führt zu einer geringeren Aktivität des Enzyms
- Metaanalysen (Barnett et al., 2008; Wacker et al., 2011) konnten keine Effekte des Polymorphismus auf den IQ finden ($r^2 = .001$)

2. Genome-wide association studies (GWAS)

Methode: Basierend auf mehr als 500 000 SNPs (= single nucleotide polymorphisms) wurden die genetischen Gemeinsamkeiten einer unabhängigen Stichprobe älterer Individuen (N=3511) ermittelt

Ergebnisse:

- Viele SNPs haben einen relevanten, aber kleinen Effekt auf die Intelligenz
- Genetische Gemeinsamkeiten erklären bei der kristallinen Intelligenz 40% der Varianz und bei der fluiden Intelligenz 51% der Varianz
- Je länger das Chromosom, desto mehr Varianz kann erklärt werden

Interpretation: Mehr als die Hälfte der genetischen Varianz der Intelligenz kann durch „common“ SNPs erklärt werden, wobei jedes SNP einen kleinen Effekt

3. Missing Heritability

- Obwohl bekannt ist, dass Intelligenz erblich ist, verstehen wir immer noch nicht wie
- 2015 wurde allerdings die erste eindeutige genetische Assoziation mit der allgemeinen Intelligenz im normalen Bereich gefunden (Trampush et al., 2015)
- Möglichkeiten um die „missing heritability“ zu finden:

Größere Stichproben

Akkurateres Genotyping (z.B. GWAS)

Bessere Definition des Phänotyps: z.B wird der Zusammenhang zwischen dem COMT-Gen und der fluide Intelligenz (g_f) nur signifikant wenn die kristalline Intelligenz (g_c) herausgerechnet [$r(\text{COMT}, g_f) = .045$ (n. s.); $r(\text{COMT}, g_f \text{ ohne } g_c) = .082$ ($p < .01$)]

4. Studien mit sehr großen Stichproben (und weiten Phänotypen)

- *Rietveld et al., 2014:* Zusammenfassung der Befunde von drei Studie zu Effekten bestimmter SNPs auf die Bildungsjahre
Es konnten drei SNPs identifiziert werden, die mit der allgemeinen Intelligenz zusammenhängen könnten, da die Variationen dieser SNPs einen Teil der Unterschiede in der Bildungsdauer (Monate in Schule, Universität usw.) erklären können

Trampush et al. (2015) konnten in einer Metaanalyse ($k=42$, $N= 68159$) einen Zusammenhang von einem dieser SNPs mit der allgemeinen Intelligenz feststellen

Zu beachten: Die Effekte einzelner Polymorphismen sind sehr klein und können daher nur in sehr großen Stichproben gefunden werden

- *Selzam et al (2017)*: Britische Studie mit großer Stichprobe ($N \geq 2228$)
Basierend auf 20.000 SNPs (abgeleitet von einer GWAS zur Bildungsdauer mit $N > 300\,000$) wurde ein polygenetischer Score gebildet

Dieser Polygenetische Score stelle einen Prädiktor für den Bildungserfolg dar, konnte also einen Teil der Varianz verschiedener Bildungserfolgsmaße erklären: Bildungserfolgs mit 16 Jahren (9,1%), 7,3% des sozioökonomischen Status (7,3%), allgemeine Intelligenz (3,6%)

Laut Autoren können polygenetischen Scores nützlich sein um Bildungsprobleme und den Bedarf personalisierten Lernens bereits zu einem frühen Zeitpunkt zu erkennen und entgegen wirken zu können

Neuronale Korrelate

Struktur des Gehirns

1. Intelligenz und Gehirnanatomie

- *Studie von Galton (1888)*: Untersuchung des Kopfwachstums von ca. 100 College-Studenten
Die Köpfe der Studenten wuchsen auch noch im Erwachsenenalter
Intelligentere Studenten hatten größere Köpfe
- *Aktuelle Studien* zeigen kleine bis mittlere Zusammenhänge verschiedener anatomischer Maße mit Intelligenz:
 - a) kleine Effektgrößen für den Zusammenhang von Intelligenz mit
 - Kopfgröße ($r = .20$)
 - Volumen einzelner kortikaler Areale
 - Gesamtvolumen der weißen Substanz
 - Kortikale Dicke
 - b) Mittlere Effektgrößen für den Zusammenhang von Intelligenz mit
 - Hirnvolumen
 - Intrakranielles Volumen (Hirngewebe, Hirngefäße, Liquorräume)
 - Gesamtvolumen der grauen Substanz

2. Intelligenz und subkortikale Areale (Volumen des Nucleus caudatus)

- In drei fMRT-Studien konnte eine konsistente Assoziation der Intelligenz mit dem Volumen des Nucleus caudatus gefunden werden (Zusammenhang bestand auch nach Kontrolle für Alter und Geschlecht)
- Der Befund erscheint plausibel, da der Nucleus caudatus eine wichtige Rolle bei dopaminerg gesteuerten Lernprozessen spielt.

3. Intelligenz und Hirnentwicklungsverläufe (Schnack et al. 2015)

- Es wurden im Längsschnitt 504 Personen zwischen 9 und 60 Jahren über 2 bis 7 Jahre mittels MRT untersucht.
- Ergebnis: Intelligenzunterschiede korrelieren eher mit strukturellen Veränderungen des Hirns als mit dem aktuellen strukturellen Status
 - ➔ hohe Intelligenz war dabei mit starken Veränderungen über die Zeitspanne korreliert (d.h. verstärktes „contracting“ und „thickening“ der Hirnstruktur)

4. Intelligenz und Nervenfasern / white matter integrity

Studien zu Korrelation von Intelligenz und der white matter integrity im Corpus Callosum (=aus weißer Substanz bestehende Verbindung zwischen den beiden Hemisphären)

- *Navas-Sanchez et al. (2014)*: MRT-Studie mit 36 14-Jährigen (davon 1/3 mathematisch begabt)
 - als Maß für die „white matter integrity“ wurde im MRT wurde die sog. fraktionale Anisotropie berechnet
 - für alle untersuchten Areale des Corpus Callosum wurden mittelgroße Korrelationen zwischen der „white matter integrity“ und der Intelligenz gefunden ($r = .40 - r = .50$)
 - spricht dafür, dass die interhemisphärische Kommunikation positiv mit Intelligenz zusammenhängt (aber sehr kleine Stichprobe, daher ist die Generalisierbarkeit fragwürdig)
- *Penke et al. (2012)*: MRT-Studie mit N=420 72-Jährigen
 - 3 unterschiedliche Biomarker/Maße für white matter integrity erklärten insgesamt 10% der Varianz in der Intelligenz der VPn
 - Der Effekt war komplett mediiert über die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit
 - spricht dafür, dass die white matter integrity im Gehirn die neuroanatomische Infrastruktur liefert für Informationsverarbeitung innerhalb der neuronalen Netzwerke, was wiederum allgemeine Intelligenz fördert

Gehirnfunktion

1. High-g vs. low-g tasks (Duncan et al., 2000)

Aufbau: Vergleich der Gehirnaktivität (mittels fMRT) bei Aufgaben die hoch mit dem g-Faktor korrelieren (= high g-tasks) und solchen die eher gering mit dem g-Faktor korrelieren (= low-g tasks)

Ergebnis: Bei high-g task zeigt sich unabhängig vom Aufgabentyp, also ob es sich um eine verbale oder räumliche Aufgabenstellung handelt, eine Aktivierung im lateralen PFC

Schlussfolgerung: Der laterale Präfrontalkortex scheint also an der generellen Intelligenz beteiligt zu sein.

2. High- vs- low gf individuals (Gray et al, 2003)

→ Unterschiede der Gehirnfunktion zwischen Menschen mit hoher und geringer fluider Intelligenz

Ablauf:

- Personen bearbeitet im fMRT eine working memory Aufgabe, wobei die Aktivität im lateralen PFC (B40, 45, 46) und die Performance in der Aufgabe erfasst wurden
- zusätzlich wurde die fluide Intelligenz (g_f) erhoben

Befunde:

1. Fluide Intelligenz und Gehirnaktivität im lateralen PFC korrelieren positiv ($r = .51 - .53$)
 - Je fluid-intelligenter eine Person ist umso aktiver ist ihr lateraler PFC beim Lösen einer kognitiven Aufgabe
2. Zudem korreliert die Working Memory Performance positiv mit der Gehirnaktivität ($r = .43 - .45$) und der fluiden Intelligenz ($r = .36$)
 - Gehirnaktivität wirkt als Mediator zwischen fluider Intelligenz und der working memory performance und erklärt damit die Verbindung zwischen den beiden

3. Neurale Effizienz

Haier et al (1988) fanden eine hohe negative Korrelation zwischen Intelligenz und der Gehirnaktivität (r (glucose metabolism, IQ) = .75)

Interpretation – neuronale Effizienzhypothese: Intelligenter Menschen müssen ihre Gehirnressourcen nicht so stark beanspruchen, wie weniger intelligente Menschen → setzen diese effizienter ein

Problem: Befund spricht gegen die Ergebnisse von Grey et al. (2013)

Lösung: Integration beider Befunde (Neubauer & Fink, 2009)

1. Für das Lösen einfacher Aufgaben brauchen Menschen mit hohem IQ ihr Gehirn weniger als Menschen mit niedrigem IQ (negativer Zusammenhang zwischen IQ und Gehirnaktivität)
2. Bei schweren Aufgaben benutzen Menschen mit hohem IQ ihr Gehirn mehr, da sie noch versuchen, die Aufgabe zu lösen, wenn Menschen mit niedrigem IQ bereits aufgegeben haben (positiver Zusammenhang zwischen IQ und Gehirnaktivität)

4. Intelligenz und funktionelle Konnektivität im Ruhezustand (Hearne et al., 2016)

- Im Ruhezustand wurde mittels fMRT die Hirnaktivität zweier Netzwerke (d.h. Areale, die synchron feuern) betrachtet:
 1. Default-mode network (DMN) = Ruhestandsnetzwerk: Netzwerk, welches im Allgemeinen während des Ruhezustands aktiviert ist und bei kognitiven Aufgaben zunehmend deaktiviert wird
 2. Fronto-parietales Netzwerk (FPN): Netzwerk, welches bei der Bearbeitung kognitiver Aufgaben aktiv ist
- Ergebnisse: die funktionelle Konnektivität zwischen dem default-mode-network und fronto-parietalen Netzwerken während des Ruhezustands korrelieren positiv mit Intelligenz
→ je höher die funktionelle Konnektivität zwischen den Netzwerken im Ruhezustand, desto höher der IQ

5. Intelligenz und effizientere Rekonfiguration funktioneller Konnektivität (Schultz & Cole, 2016)

- fMRT-Studie: Vergleich der Veränderung funktioneller Konnektivität im Ruhezustand und während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben zwischen high- und low-performern
- Ergebnisse: intelligentere Personen zeigen weniger Veränderungen (=Rekonfigurationen) ihres funktionellen Netzwerks zwischen Ruhezustand und Aufgabenbearbeitung
→ d.h. bei Intelligenten besteht eine höhere Ähnlichkeit der Aktivierungsmuster zwischen Ruhezustand und Aufgabenbearbeitung → höhere „network-update-Effizienz“

6. EEG-Korrelate mit Intelligenz: inter-trial phase consistency für neue Stimuli

- EEG-Studie: Untersuchung der Reaktion auf neue Stimuli (oddball-Paradigma) mit N=29
- Oddball-Paradigma: Es wird eine Reizfolge ähnlicher Reize gezeigt; zwischendurch wie ein ein abweichender, neuer oder seltener Zielreiz gezeigt. Hier kann das nachfolgende ERP (z.B. P300) als Indikator der Bedeutung bzw. Neuheit des Reizes gelten.

- Ergebnisse: Sind die EEG-Signale in Reaktion auf neue Stimuli über die verschiedenen Durchgänge hinweg konsistent (= hohe inter-trial phase consistency), so ist dies mit einer höheren Intelligenz korreliert ($r=.59$)
→ d.h. die Reliabilität der neuronalen Reaktion auf neue Stimuli ist mit hoher Intelligenz assoziiert

Korrelate mit Funktion UND Struktur

Metaanalyse zu strukturellen und funktionellen Korrelaten der Intelligenz (Basten et al, 2015)

1. Funktionale Korrelate (positive und negative) mit Intelligenz lassen sich vor allem in frontalen und parietalen Hirnregionen (d.h. hier korreliert die Hirnaktivität während kognitiver Aufgaben mit dem IQ)
2. Strukturelle Korrelate mit Intelligenz (= höherer Anteil grauer Substanz bei intelligenteren Personen) sind breiter im Gehirn verteilt (auch subkortikal)
3. keine direkte Überlappung zwischen strukturellen und funktionellen Korrelaten

Alternative Erklärungen für den „positive manifold“ (= Muster von positiven Korrelationen zwischen einzelnen Testscores)

Gängige Annahme: individuelle Unterschiede in der Gehirnstruktur und/oder -funktion führen zu den Unterschieden in der allgemeinen Intelligenz g und diese Unterschiede führen dann zu unterschiedlichen Ergebnissen in den einzelnen kognitiven Tests. → Annahme des g -Faktors als Ursache für Korrelationen zwischen kognitiven Tests

Alternative Modelle

1. Sampling-Model (Bartholomew, 2009):

- Es gibt nicht einen g -Faktor, sondern zahlreiche unabhängige Intelligenzkomponenten mit jeweils spezifischen neurobiologischen Grundlagen.
- Zur Bearbeitung kognitiver Aufgaben werden (unterschiedliche) „samples“ mehrerer dieser Komponenten benötigt, wodurch es zu Überschneidungen kommt. Dies erklärt, warum verschiedene kognitive Tests miteinander korrelieren.

2. Mutualism model (van der Maas et al., 2006):

- Es gibt nicht einen g -Faktor, sondern zahlreiche elementare kognitive Prozesse, die zu Beginn der Entwicklung noch unkorreliert sind.
- Erst im Verlauf der Entwicklung entsteht der „positive manifold“ als Konsequenz aus gegenseitigen förderlichen Interaktionen zwischen diesen Prozessen.