

Leibniz online

2/2006



www.leibniz-sozietat.de/journal
ISSN 1863-3285

Außergewöhnliche menschliche Informationsverarbeitung - Extremgruppenvergleiche -

Vortrag in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät Berlin am 9.2.2006

1. Einführung

Außergewöhnliche menschliche Informationsverarbeitung wird hier im Extremgruppenvergleich untersucht. Der Begriff „außergewöhnlich“ bezieht sich auf Leistungen außerhalb eines „üblichen“ Bereiches.

In den vergangenen drei Jahrzehnten sind in unserer Arbeitsgruppe an der Akademie der Wissenschaften Berlin und an der Friedrich-Schiller-Universität Jena Elementaranalysen menschlicher Informationsverarbeitung bei

- schizophrenen Denkstörungen (Mirtschink, 1983; Krause und Mirtschink, 1985, 1986), bei
- Anorexia nervosa (Magersucht) (Grunwald, 1998, 2004; Grunwald und Beyer, 2001) und bei
- mathematischer Hochbegabung (Seidel, 2001; Krause, Seidel und Heinrich, 2003, 2006; Krause und Seidel, 2004)

durchgeführt worden.

Das Ziel waren bzw. sind neue Maße für geistige Prozesse und Leistungen. Solche neuen Maße sollen eine sensiblere Diagnostik und ein besser begründetes Training erlauben. Dies setzt eine anforderungsinvariante Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung voraus. Wir greifen dabei auf Basiskomponenten (Klix, 1992) zurück, die in einer Vielzahl von Anforderungen auftreten, wie z.B. Analogiebildung, Multimodalität, Komplexitätsreduktion, u.a..

Ausgangspunkte sind Beobachtungen in der Praxis:

- Schizophrene Patienten haben Schwierigkeiten mit der Sprichwortinterpretation (Kloos, 1965; Mirtschink, 1983). Ein Beispiel soll das verdeutlichen. Ein schizophrener Patient wird gebeten, das Sprichwort „Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm.“ zu interpretieren. Seine Antwort ist häufig: „ Der Apfel liegt daneben.“ und nicht „Wie der Vater so der Sohn.“.

- Magersüchtige Patienten haben eine gestörte subjektive Wahrnehmung. Sie empfinden sich z.B. als zu dick, obwohl sie zu dünn sind. Grunwald (1998, Grunwald u.a., 1999, 2001, 2004, 2005) hat magersüchtige Patienten gebeten, in Tafeln eingefräste Muster blind abzutasten und anschließend zu reproduzieren. Die Abbildung 1 zeigt die Tiefenreliefstimuli und das Ergebnis. Die reproduzierten Muster der magersüchtigen Patienten sind gegenüber der Vorlage deutlich verzerrt, während die reproduzierten Muster der Gesunden der Vorlage sehr ähnlich sind. Die Beurteilung der Reproduktionsgüte hat Grunwald durch ein Ratingverfahren bestimmt. Die Reproduktionsgüten der magersüchtigen Patienten sind signifikant schlechter im Vergleich zur Reproduktionsgüte Gesunder.

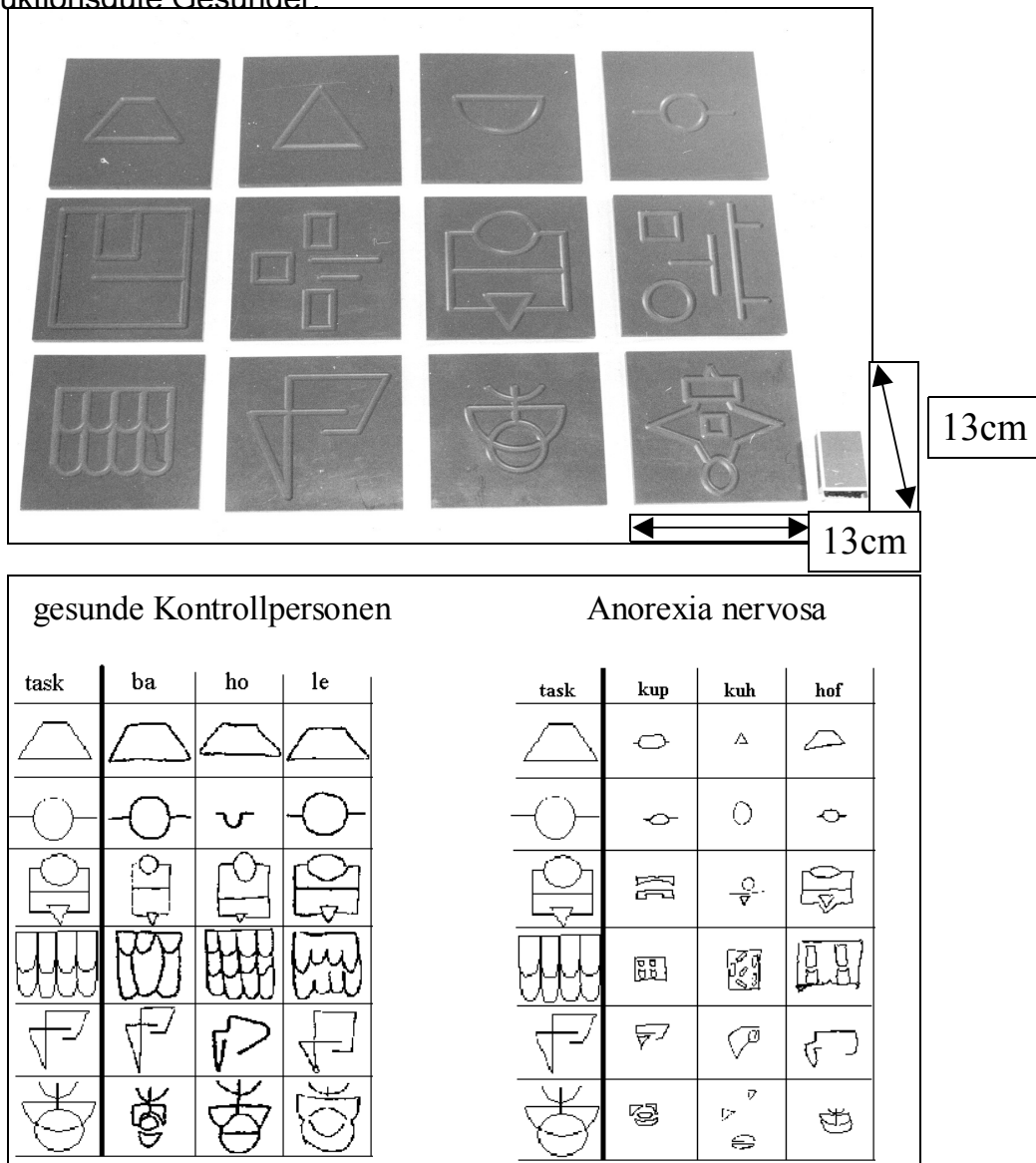


Abbildung 1

Oben: Tiefenreliefstimuli.

Unten: Gegebene (task) und reproduzierte Muster dreier magersüchtiger Patienten (rechts: kup, kuh, hof) und dreier gesunder Personen (links: ba, ho, le) nach Grunwald (1999).

- Mathematisch Hochbegabte lösen schwierige mathematische Probleme schneller als Normalbegabte. Ein Beispiel: Ein mathematisch hochbegabter Schüler einer Abiturklasse erhält die Aufgabe „Wie viele Diagonalen hat ein 23-Eck?“. Nach sechs Sekunden antwortet er „230“. Ein normalbegabter Schüler benötigt – wenn überhaupt eine Lösung erfolgt – im Mittel 120 Sekunden. Das ist das Zwanzigfache. Gibt es eine Erklärung für diese Leistungssteigerung? Lässt sich daraus ein Maß ableiten, das möglicherweise auch einer Früherkennung dienen kann?

Wie in anderen experimentellen Wissenschaften üblich, so wird auch hier bei der Analyse menschlicher Informationsverarbeitung eine analoge methodische Denkweise eingesetzt, die sich in Kurzform so ausdrücken lässt:

- Phänomen
- Hypothese
- Elementaranalyse
- Maß.

Um die Sensibilität und die Zuverlässigkeit eines Maßes zu erhöhen, gibt es zumindest zwei Vorgehensweisen:

Zum einen sollte das neue Maß mehr Information über den kognitiven Prozeß berücksichtigen, etwa dadurch, dass eine Größe (z.B. Fehler) durch eine Funktion (z.B. Fehler als Funktion einer unabhängigen Variablen) ersetzt wird. Statt einer Größe werden dann Kurven oder Kurvenscharen betrachtet.

Zum anderen können neue Maße geprüft werden, die sich in anderen Wissenschaften bewährt haben und wegen ihrer Allgemeingültigkeit auch zur Messung menschlicher Informationsverarbeitungseigenschaften angewendet werden können, wie etwa die Entropie.

Aus Zeitgründen beschränke ich mich auf die Extremgruppenvergleiche zu schizophrenen Denkstörungen und zur mathematischen Hochbegabung und gliedere den Vortrag in zwei Abschnitte:

- Minderleistung: am Beispiel schizophrener Denkstörungen und
- Hochleistung: am Beispiel mathematischer Hochbegabung.

Zum Schluss möchte ich auf die Förderung von Normalleistung eingehen und zeigen, wie eine Förderung durch solche Elementaranalysen besser begründet werden kann.

2. Schizophrene Denkstörungen

Prozess – oder Strukturstörungen?

Ausgangspunkt war die Frage, ob sich Störungen in der Informationsverarbeitung auf Störungen der Gedächtnisstruktur zurückführen lassen, oder ob Prozeßstörungen vorliegen. Bei der Konzipierung des Untersuchungsansatzes haben wir uns von den Erfahrungen der Kliniker leiten lassen. Aus der psychiatrischen Praxis und Literatur ist seit langem bekannt, dass Schizophrene bei der Interpretation von Sprichwörtern Schwierigkeiten haben. Sie sind häufig nicht in der Lage, die metaphorische Bedeutung eines Sprichwortes wiederzugeben und bleiben bei der Anforderung zur Interpretation im Konkreten haften (Goldstein, 1978). Diese Eigenschaft der Erfassung metaphorischer Bedeutungen musste in ein vom Standpunkt der Allgemeinen Psychologie gut aufgeklärtes experimentelles Paradigma transformiert werden. Wir wählten dazu die Anforderung des analogen Schließens (Klix und van der Meer, 1978, Klix, 1992), speziell die Anforderung der Analogieauswahl. Unsere Untersuchungspersonen mussten z.B. folgende Analogieauswahl lösen. Gegeben ist ein Analogieauswahlproblem

$$A : A'_M :: B : \{ B'_M, B'_K \}.$$

Aus einer vorgegebenen Menge von Begriffen (genauer Handlungsphrasen)

$$\{ B'_M, B'_K \}$$

muß ein Begriff so ausgewählt werden, dass die zwischen den Begriffen

$$A : A'_M$$

bestehende Relation auch zwischen

$$B :$$

Und den auszuwählenden Begriffen B'_M oder B'_K erfüllt ist. Die Bezeichnungen M und K stehen für metaphorische bzw. konkrete Relationen. Die Abbildung 2 zeigt die Analogieauswahl in einer allgemeinen Schreibweise.

Analogieauswahl:

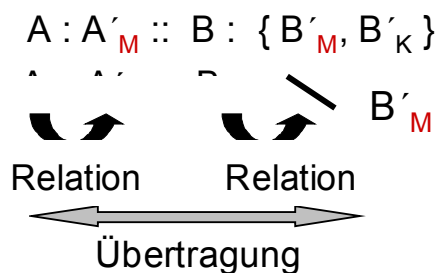


Abbildung 2

Schematische Dar

Die Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die Versuchs – und Kontrollsituation.

Versuchssituation

Bock schießen : Fehler machen :: Nuß knacken : ?

{ Rätsel lösen, Frucht öffnen }

Kontrollsituation

Bock schießen : Wild jagen :: Nuß knacken : ?

{ Rätsel lösen, Frucht öffnen }

Abbildung 3

Beispiel für Versuchs – und Kontrollsituation bei einer Analogieauswahl. Erläuterungen im Text.

In der Versuchssituation muß die metaphorische Relation $A : A'_M$ (z.B. Bock schießen : Fehler machen) erkannt, übertragen und zur Auswahl verwendet werden, in der Kontrollsituation dagegen die konkrete Relation $A : A'_K$ (z.B. Bock schießen : Wild jagen). Mit Bezug auf die in der psychiatrischen Praxis beobachtete Schwierigkeit bei der Sprichwortinterpretation sollten die Patienten in der Versuchssituation mehr Fehler machen als die Gesunden. In der Kontrollsituation dagegen sollte kein Unterschied zwischen den Probandengruppen auftreten, wenn der Schlussprozess nicht gestört ist. Die Abbildung 4 zeigt das Ergebnis.

Versuchssituation:

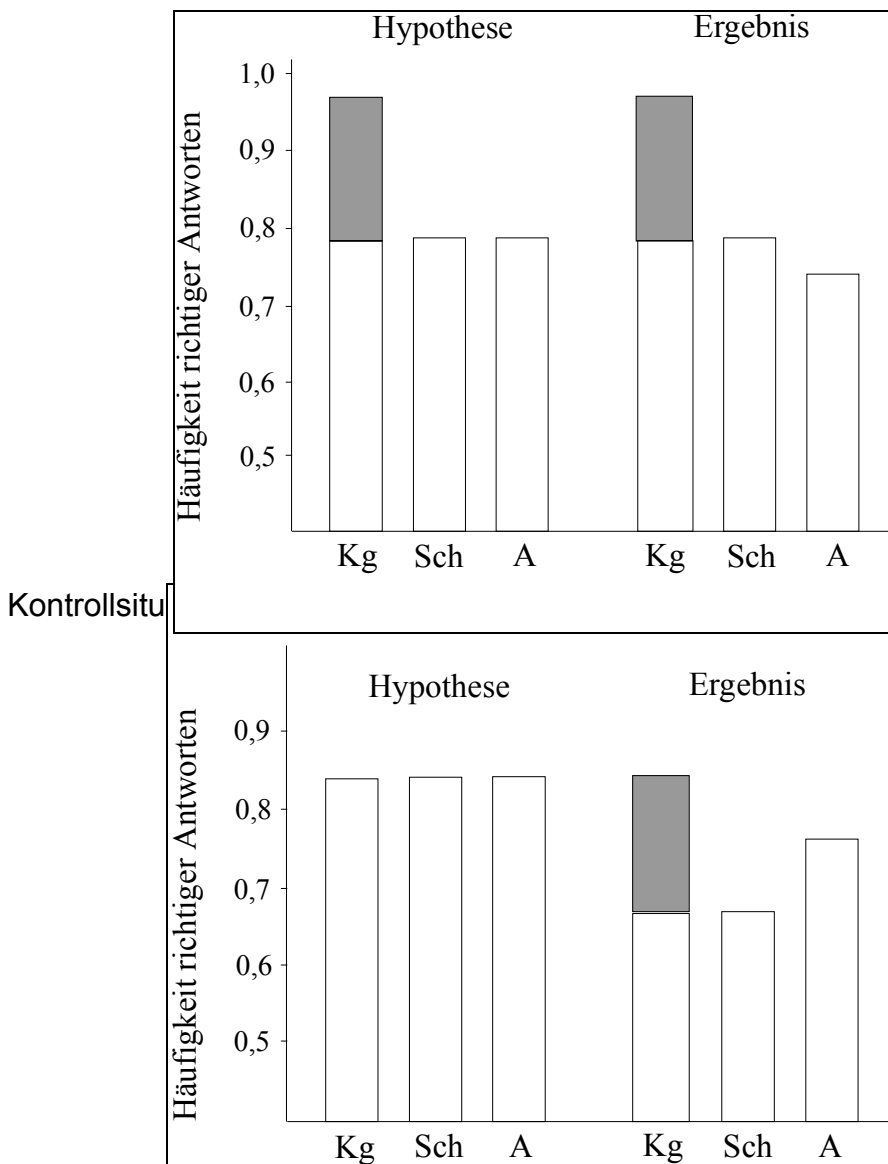


Abbildung 4

Relative Häufigkeit richtiger Antworten beim analogen Schließen für Gesunde (Kg), Schizophrene (Sch) und Alkoholiker (A) in der Versuchs- (oben) und Kontrollsituation (unten). Links sind jeweils die Hypothesen dargestellt. Die drei Stichproben sind bezüglich des IQ, der Schulbildung und des Alters parallelisiert. Die Daten dazu finden sich in Krause und Mirtschink (1986).

In der Versuchssituation ist die Hypothese erfüllt, in der Kontrollsituation dagegen nicht.

Prozeßstörung ?

Kann eine Störung des Inferenzprozesses eindeutig ausgeschlossen werden? Die Anforderung der Analogieakzeptierung, die nun gewählt worden ist, hat den Vorteil, daß die Variable semantische Distanz ausgeschlossen werden kann, so daß die Intaktheit der Elementaroperationen des analogen Schließens (Relationserkennung, Übertragung, Relationsanwendung) separat geprüft werden kann. Das geschieht durch sprachfreies Versuchsmaterial. Wir verwendeten das Material nach van der Meer (1987). Die Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für dieses Material.



Abbildung 5

Versuchsmaterial für Analogieakzeptierung (nach van der Meer, 1987). Der Buchstabe T steht für Transformation und kennzeichnet eine Drehung um 90 Grad.

Die relative Häufigkeit richtiger Antworten bei der Analogieakzeptierung für Gesunde, Schizophrene und Alkoholiker ist in Abbildung 6 dargestellt.

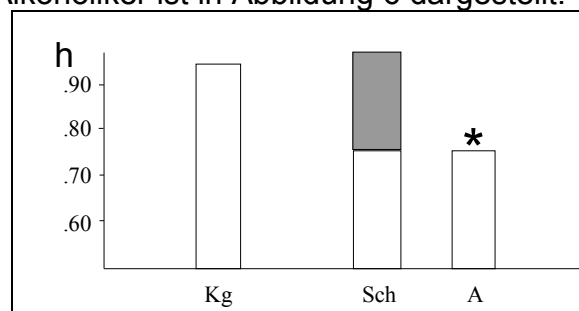


Abbildung 6

Relative Häufigkeit h richtiger Antworten bei einer Analogieakzeptierung mit geometrisch-figuralem Material. (Kg = Gesunde, Sch = Schizophrene, A = Alkoholiker, * = signifikant) (vgl. auch Abbildung 5).

Wie Abbildung 6 zeigt, wurde kein Hinweis gefunden, dass sich Gesunde und Schizophrene in ihren Leistungen unterscheiden. Das gilt sowohl für die Ja- als auch für die Nein - Antworten. Daraus muss geschlossen werden, dass unsere schizophrenen Patienten prinzipiell in der Lage sind, analoge Schlussprozesse auszuführen. Daraus lässt sich auch ableiten, dass die im analogen Schließen beanspruchten kognitiven Elementaroperationen bei unseren schizophrenen Patienten nicht gestört sind.

Wenn wir andererseits den bei Verwendung von begrifflichem Material beobachteten Leistungsunterschied zwischen Gesunden und Schizophrenen aufklären wollen, müssen wir den Gedächtniseinfluss auf den analogen Schlussprozess genauer untersuchen. Zunächst jedoch fragen wir danach, ob eine allgemeine Gedächtnisstörung vorliegt.

Gedächtnisstrukturveränderung ?

Liegt eine allgemeine Gedächtnisstrukturveränderung vor? In diesem Experiment prüfen wir, ob Schwierigkeiten denkgestörter Patienten beim Verstehen und Gebrauch von Metaphern durch Veränderung der Gedächtnisstruktur bedingt sein könnten. Dazu wurde die semantische Distanz oder Typikalität zwischen dem mehrdeutigen Begriff und seiner metaphorischen bzw. seiner konkreten Bedeutung im Distanzrating bestimmt. Die Distanz lässt sich hier nur subjektiv bestimmen. Die Abbildung 7 zeigt die relative Häufigkeit, mit

der das Urteil „große Distanz“ (5 – 9) für die dargebotenen Begriffspaare (mit metaphorischer oder konkreter Bedeutung) abgegeben wurde, getrennt für die drei Stichproben Gesunde, Schizophrene und Alkoholiker.

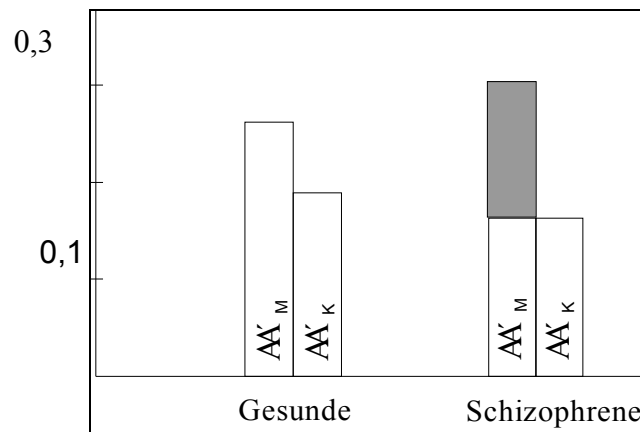


Abbildung 7

Relative Häufigkeit, mit der die semantische Distanz $d(AA'_M)$ und $d(AA'_K)$ als groß bezeichnet wird, für die zwei Stichproben Gesunde und Schizophrene.

In der Stichprobe der Gesunden unterscheidet sich die Urteilshäufigkeit nicht signifikant. Die Anzahl von Antworten mit großer Distanz ist bei metaphorischen Begriffspaaren etwa der bei konkreten Begriffspaaren vergleichbar. Ein anderes Ergebnis zeigt die Extremgruppe. Das Urteil „große Distanz“ wird bei metaphorischen Begriffspaaren häufiger gewählt als bei konkreten Begriffspaaren. Die Unterschiede sind signifikant. Damit wird die Hypothese bestätigt: Es läßt sich – zumindest bereichsspezifisch – ein Unterschied in der Gedächtnisstruktur zwischen Gesunden und Schizophrenen nachweisen.

Welchen Erklärungswert hat dieser Befund? Mit den Ergebnissen ist experimentell näher in den Bedingungen aufgeklärt worden, was in der Phänomenologie kognitiver Störungen oftmals beschrieben wurde: die Bevorzugung konkreter Interpretationen Schizophrener. Auf eine „generelle“ Gedächtnisstrukturveränderung der Pathologiegruppe darf daraus nicht geschlossen werden (Schwartz, 1982).

Prozessstörung durch spezielle Gedächtnisstrukturveränderungen bei Begriffsauswahl:

Eigentlich sollte die semantische Distanz zwischen Begriffen die Anforderungsbewältigung nicht beeinflussen. Unterstellen wir statt eines analogen Schlussprozesses einen (relationsunabhängigen) Auswahlprozess und bestimmen wir die Auswahlwahrscheinlichkeit $P(B'_M)$ eines Begriffes B'_M als Funktion der semantischen Distanz $d(BB'_M)$ nach dem Auswahltheorem von Luce (1959, 1965). Die Auswahlwahrscheinlichkeit P des Begriffes B'_K aus der Menge $\{B'_K, B'_M\}$ ist:

$$P(B'_K / B'_M, B'_K) = \frac{V(d(BB'_K))}{V(d(BB'_K)) + V(d(BB'_M))} \quad . (1)$$

Mit $v(x) = e^{-\alpha x}$ und $P(B'_M) = 1 - P(B'_K)$ erhalten wir :

$$P(B_{M'} / B_{M'}, B_{K'}) = 1 - \frac{e^{-d(BB_{K'})\alpha}}{e^{-d(BB_{K'})\alpha} + e^{-d(BB_{M'})\alpha}} \quad (2)$$

Mit $d(BB_{K'}) \approx 1,5$ aus dem Experiment und $\alpha = 0,191$ durch Anpassung bestimmt, ergibt sich der in Abbildung 8 angegebene Verlauf.

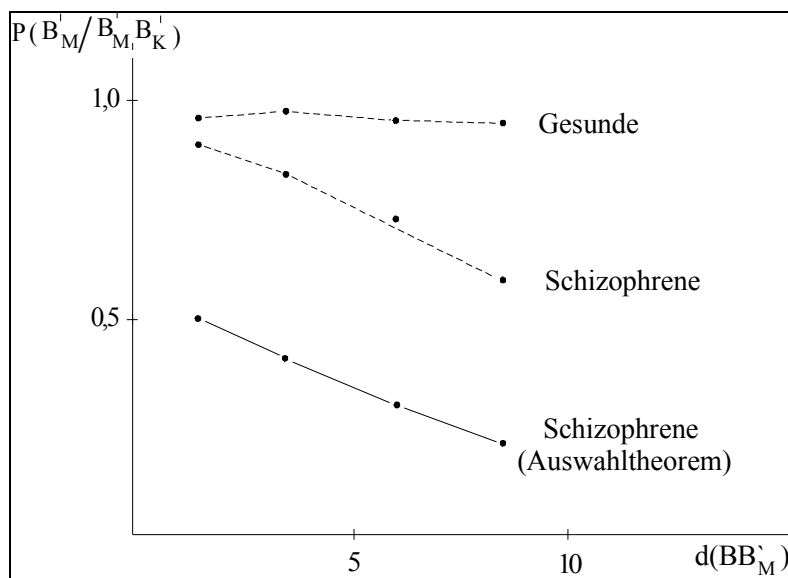


Abbildung 8

Relative Häufigkeit P für die Auswahl des Begriffes $B_{M'}$ aus der Menge $\{B_{M'}, B_{K'}\}$ als Funktion der semantischen Distanz $d(BB_{M'})$ nach dem Auswahltheorem von Luce (1959, 1965), Gleichung (2). Die experimentellen Daten (gestrichelt) entstammen dem Experiment zum analogen Schließen.

Die Abbildung 8 macht deutlich, dass das analoge Schließen Schizophrener durch die semantische Distanz $d(BB_{M'})$ zwischen den Begriffen B und $B_{M'}$ beeinflusst wird. Der ähnliche Kurvenverlauf nach dem Auswahltheorem und nach dem Experiment bei Schizophrenen spricht dafür, dass sich Schizophrene (insbesondere im Bereich großer semantischer Distanz) eher so verhalten, wie es das Auswahltheorem beschreibt und nicht den geforderten analogen Schlussprozess realisieren.

Prozessstörung durch spezielle Gedächtnisstrukturveränderungen beim analogen Schließen:

Bedeutsam ist der Nachweis des Einflusses der semantischen Distanz $d(BB_{M'})$ auf die Auswahlleistung bei Schizophrenen (vgl. Abbildung 8). Wie Abbildung 9 zeigt, führen große semantische Distanzen zwischen dem Begriff B und dem relationserfüllenden Begriff $B_{M'}$ zu einer großen Fehleranzahl im analogen Schließen bei Schizophrenen im Gegensatz zu Gesunden.

Da große semantische Distanzen $d(BB_{M'})$ von Schizophrenen häufiger angegeben werden als von Gesunden, werden bei der Schizophrenengruppe auch mehr Fehler gemacht. Ist damit die Fehlerleistung im Schlussprozess auf die Eigenschaft der metaphorischen Relation zurückzuführen und damit auf etwas ganz Spezifisches, oder wird die Fehlerleistung durch die große semantische Distanz (kleine Typikalität) $d(BB_{M'})$ verursacht, unabhängig von der Art der semantischen Relation zwischen den Begriffen B und B' ?

Häufigkeit richtiger Antworten

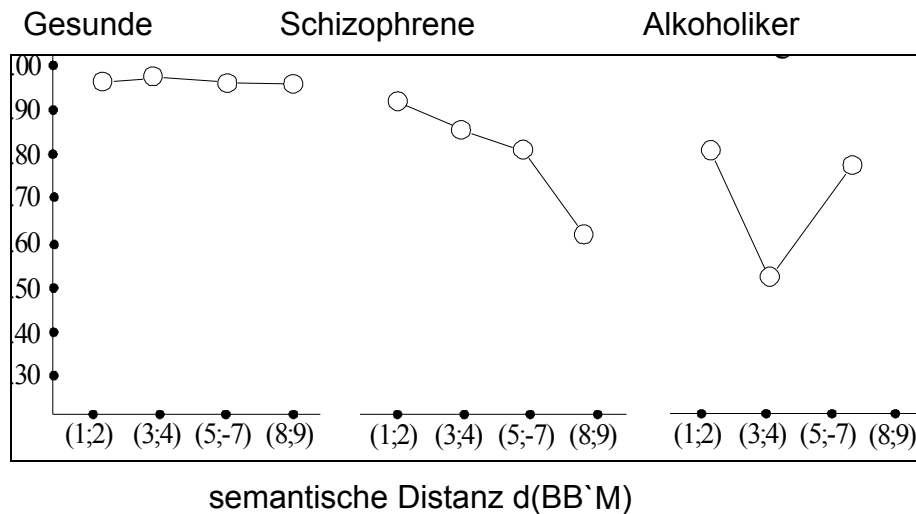


Abbildung 9

Einfluss der semantischen Distanz $d(BB_M')$ zwischen dem Begriff B und dem relationserfüllenden Begriff B_M' auf die relative Häufigkeit richtiger Antworten beim analogen Schließen für Gesunde, Schizophrene und hirnganisch Erkrankte (Alkoholiker).

Lässt sich der zweite Teil dieser Frage bestätigen, dann muss die Unfähigkeit Schizophrener bei der Sprichwörterklärung nur als ein Spezialfall einer allgemeinen Störung angesehen werden. Um diese Frage zu prüfen, ersetzen wir die metaphorische Relation durch beliebige begriffliche Relationen. Speziell wählen wir Handlungsträger- und Qualitätsrelationen aus.

Prozessstörung durch allgemeine Gedächtnisstrukturveränderungen beim analogen Schließen:

Betrachten wir nun analoge Schlussprozesse über Handlungs- und Qualitätsrelationen. Unsere Vermutung geht dahin, dass die Fehlleistungen Schizophrener nicht an die metaphorische Relation gebunden sind, sondern auch bei beliebigen semantischen Relationen auftreten. Wenn der in Abbildung 9 dargestellte Befund, dass die Inferenzleistung eine Funktion der semantischen Distanz ist, verallgemeinert werden kann, dann müssten Schizophrene z. B. bei der Analogieauswahl

Arzt : behandeln :: Lehrer : {streng, klettern}

Fehler machen, da der Begriff streng für den Begriff Lehrer typischer ist als der Begriff klettern, d. h. die semantische Distanz $d(\text{Lehrer, streng})$ ist kleiner als $d(\text{Lehrer, klettern})$. Da die Handlungsträgerrelation gefordert ist, müsste der Begriff klettern eingesetzt werden, obwohl dieser Begriff weniger typisch für den Begriff Lehrer ist als der Begriff streng. Ein Beispiel, bei dem die Qualitätsrelation gefordert ist, lautet:

Hund : struppig :: Pferd : {wiehern, groß}.

Die analogen Schlussprozesse wurden als Analogieakzeptierung angeboten. Das Distanzrating wurde in der gleichen Weise wie oben beschrieben durchgeführt. Die relative Häufigkeit richtiger Antworten beim analogen Schließen als Funktion der sematischen Distanz $d(BB')$ bei Handlungsträger- und Qualitätsrelationen bzw. metaphorischen

Relationen ist für die drei Stichproben Gesunde, Schizophrene und Alkoholiker in Abbildung 10 dargestellt.

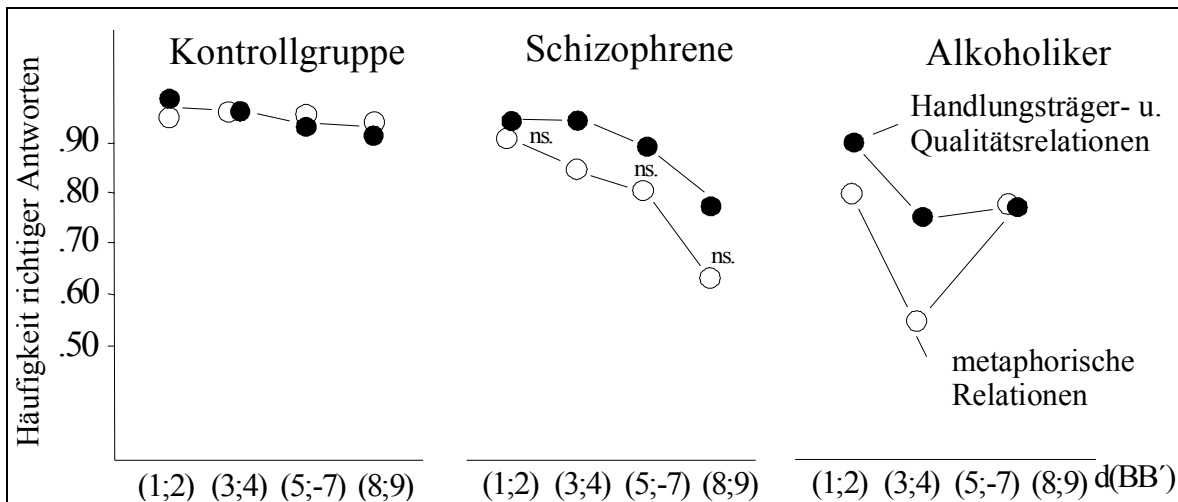


Abbildung 10

Relative Häufigkeit richtiger Antworten beim analogen Schließen als Funktion der semantischen Distanz $d(BB')$ zwischen dem Begriff B und dem relationserfüllenden Begriff B' bei Darbietung von Worten mit metaphorischen Relationen (o) und von Worten mit Handlungsträger- bzw. Qualitätsrelationen (●) für die drei Stichproben Gesunde, Schizophrene und Alkoholiker. (die Abweichungen zwischen den beiden Kurvenverläufen in der Schizophreniestichprobe sind nicht signifikant).

Die Abbildung macht deutlich, dass sich die mit verschiedenem Versuchsmaterial erhaltenen Fehlerverteilungen in Abhängigkeit von der semantischen Distanz $d(BB')$ nicht unterscheiden. Schizophrene zeigen auch bei analogen Schlussprozessen über Handlungsträger- und Qualitätsrelation die gleiche Abhängigkeit des Antwortverhaltens von der semantischen Distanz wie bei metaphorischen Relationen. Entsprechendes gilt für die Unabhängigkeit in der Kontrollgruppe. Alkoholiker zeigen bei im Vergleich zu Kontrollpersonen signifikant erhöhter Fehlerrate jedoch keinen Zusammenhang zwischen Antwortrate und Distanz.

Das Antwortverhalten Schizophrener beim analogen Schließen ist als Funktion der semantischen Distanz $d(BB')$ von der Art der semantischen Relation unabhängig. Sowohl bei metaphorischen Relationen als auch bei Handlungsträger- und Qualitätsrelationen zeigen sich die gleichen Abhängigkeiten. Damit ist das Unvermögen Schizophrener, Sprichwörter zu interpretieren, ein Spezialfall einer allgemeinen Störung, die wir in Übereinstimmung mit Literaturbefunden als Interferenzneigung bezeichnen wollen.

Die Sensibilität dieses Maßes zeigt Abbildung 11.

Zusammenfassend sei festgehalten:

Ganz offensichtlich ist die Trennung zwischen Kontroll – und Extremgruppe dann erfolgreich, wenn die Fehler als Funktion der semantischen Distanz betrachtet werden. Die Berücksichtigung einer funktionalen Abhängigkeit, die aus der Prozessanalyse folgt, verbessert die Diagnostik.

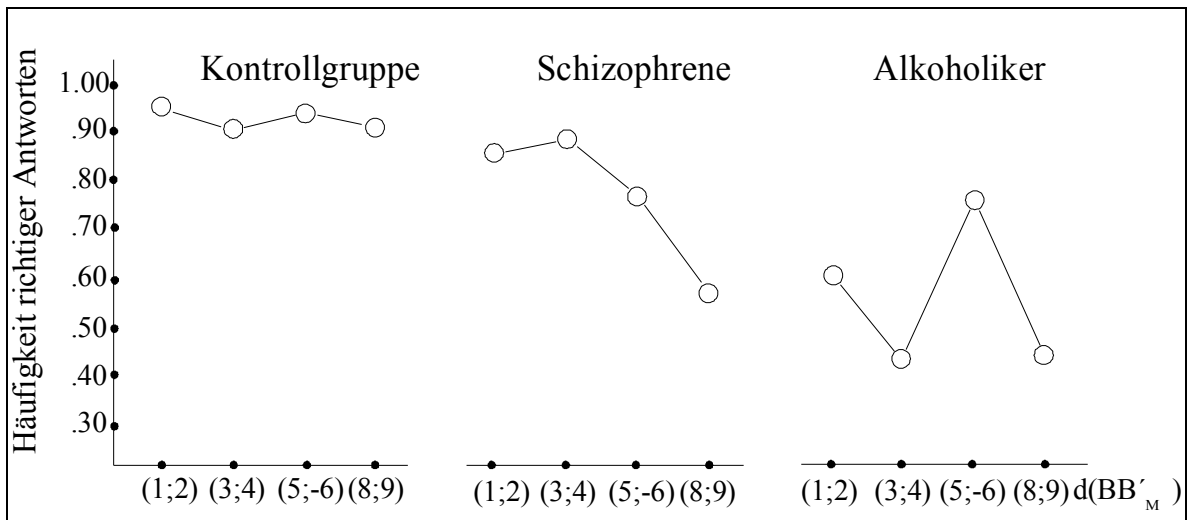


Abbildung 11

Relative Häufigkeit richtiger Antworten beim analogen Schließen in Abhängigkeit von der semantischen Distanz $d(BB'_M)$ analog Abbildung 10 für diejenigen Patientengruppen, die nach einer Urteils- methode (SPES-Fragebogen) als nicht unterscheidbar von der Kontrollgruppe Gesunder ausgewiesen sind (nach Mirtschink, 1983).

3. Mathematische Hochbegabung

Prozess- oder Strukturänderung ?

Shapiro u.a. (1989) werfen in ihren Untersuchungen die Frage auf, ob Begabung mit Hilfe traditioneller Testverfahren vorhergesagt werden kann. Von 36 untersuchten Kindern, die 0,7 Monate früher laufen konnten und 2,2 Monate früher Zwei-Wort-Sätze sprechen konnten, genügten nach 7,5 Jahren nur 2 Kinder den Kriterien der Hochbegabung. Dies bedeutet, eine Vorhersage ist nicht möglich. Andererseits muss angenommen werden, dass die Adäquatheit der Messgröße die Prädiktierbarkeit verbessert.

Für eine valide und reliable Diagnostik geistiger Leistungen ist eine exakte Elementaranalyse von Denkprozessen Voraussetzung. Nur so gelingt es, adäquate Maße zu finden, die unmittelbar den kognitiven Prozess abbilden. Dies hat Hans-Jürgen Lander (1967) in seinem Aufsatz „Strukturanalyse von Denkprozessen als Mittel der Intelligenzdiagnostik“ bereits vor 40 Jahren gezeigt. Und dennoch sind diese Überlegungen bis heute nicht in die Praxis der Intelligenzdiagnostik eingedrungen, denn der Mathematikdidaktiker Kieswetter (2002) hat erst kürzlich in seiner Studie „Unzulänglich vermessen und vermessen unzulänglich: PISA u. Co.“ fehlende Maße für geistige Leistungen beklagt und gefordert, „Testverfahren einer kritischen Kontrolle zu unterziehen“.¹

Die Allgemeine Psychologie hat seit dem im Jahre 1967 von Klix, Gutjahr und Mehl durchgeführten bedeutsamen Symposium über Intelligenzdiagnostik zahlreiche Befunde dazu vorgelegt. Wir greifen hier nur zwei heraus, an denen wir anknüpfen und die vorgeschlagenen Maße begründen wollen: Verfügbarkeit und Wechseln von Strategien sowie sequentielle Eigenschaften kognitiver Prozesse. Klix (1992) schließt aus Reaktionszeitexperimenten bei analogen Schlussprozessen auf die bessere Verfügbarkeit² von Strategien bei mathematisch Hochbegabten. „Auch hier ist es so, als ob die Extremgruppe über einer Art innerer Vorinformation verfügte, wie solche Anforderung mühelos zu bewältigen sei.“ (Klix, 1992, S. 441). Lander (1968) analysiert „Strukturbildungsprozesse über Gedächtnisverläufen beim seriellen Lernen“. Daraus lassen sich Maße für Ordnungsbildung entwickeln (Krause, 2000).

Anliegen des Textes ist es, aus Elementaranalysen kognitiver Prozesse beim mathematischen Problemlösen im Extremgruppenvergleich Komponenten zu bestimmen, auf die die besseren Leistungen Hochbegabter zurückgeführt werden können. Wir verwenden dazu experimentalpsychologische und neurowissenschaftliche Methoden (Krause und Sommerfeld, 2000) und prüfen:

(1) den Zeitpunkt der Verfügbarkeit von Strategien, gemessen über den Zeitpunkt der Frühaktivierung ausgezeichneter Hirnregionen,

¹ Mit freundlicher Genehmigung des Friedrich-Verlages geben wir hier wesentliche Teile unseres Beitrages wieder, der unter dem Titel „Über das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung beim Lösen mathematischer Probleme – eine neurowissenschaftliche Studie beim Vergleich mathematisch (Hoch) – und Normalbegabter“ in MU – Der Mathematikunterricht, Heft 6, 2003, Friedrich-Verlag, Seelze erschienen ist.

² Der Begriff der Verfügbarkeit umfasst sowohl die Eigenschaft des Wissens um Strategien als auch die Fähigkeit (gewissermaßen spielend leicht) damit umgehen zu können. Dabei ist sowohl der Abruf bereits gebildeter Strategien als auch deren („blitzschnelle“) Erzeugung und Fortentwicklung gemeint. Im Gegensatz zur Verfügbarkeit findet sich beim Wissen kein Unterschied im Extremgruppenvergleich. Seidel (2001, 2003) konnte zeigen, dass Normalbegabte und Hochbegabte die hier verwendeten Modalitätsstrategien gleichermaßen kennen.

(2) die Häufigkeit des Wechsels zwischen Strategien, gemessen über die Häufigkeit des Wechsels der Aktivierung ausgezeichneter Hirnregionen und

(3) die Ordnung des Denkablaufes, gemessen über die Entropiereduktion und den Ordnungsgrad von Mikrozustandsequenzen.

Soll mathematisches Denken gefördert werden, dann müssen alle Faktoren von der sozialen über die motivationale und emotionale bis hin zur kognitiven Ebene betrachtet werden und bekannt sein. Wir beschränken uns hier auf kognitive Elementarprozesse. Die Analyse solcher Elementarprozesse kann durch Verhaltensbeobachtung, durch lautes Denken, durch Messung von Fehlern und Lösungszeiten (experimentalpsychologisch) und durch Messung neuraler Prozesse (neurowissenschaftlich) im Gehirn geschehen. Hinsichtlich der Anforderungen³ arbeiten wir mit Problemen, die von den Probanden unter Berücksichtigung ihrer bisherigen mathematischen Ausbildung und Vorerfahrung sowohl „algebraisch“ als auch „(anschauungs)geometrisch“ lösbar sind. Die Unterscheidung ist nicht absolut. Wir meinen vielmehr zum einen ein Lösungsvorgehen, bei dem die Arbeit mit Zahlen, Variablen, Gleichungen, Ungleichungen etc., also mit Symbolen dominiert; und zum anderen ein Vorgehen, dass sich insbesondere durch die Verwendung geometrischer Formen, also durch die Arbeit mit Bildern auszeichnet (vgl. auch die Beispiele zu den Abbildungen 12 und 13).

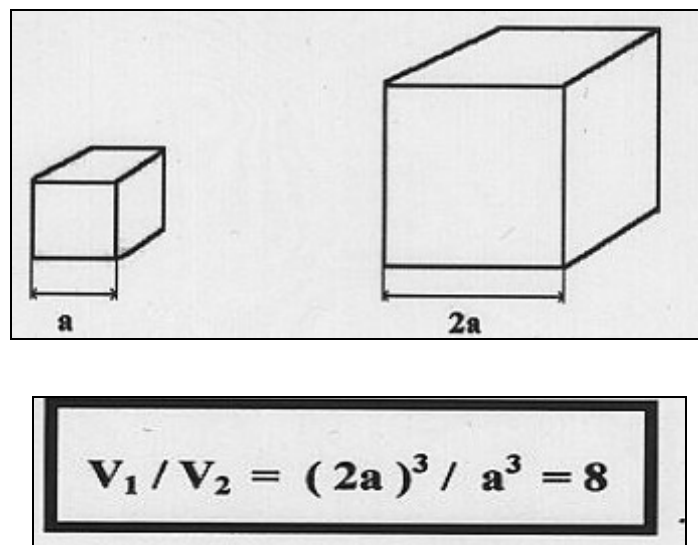


Abbildung 12

Wie oft passt der Würfel mit der Kantenlänge a in den Würfel mit der Kantenlänge $2a$ hinein? Diese Anforderung entstammt einem Schulbuch für den Mathematikunterricht und dient hier zur Veranschaulichung der beiden Modalitätsstrategien.

oben: Arbeit mit bildhaft-anschaulicher Vorstellung. Man versuche, den kleinen Würfel in den großen Würfel hinein zu stellen.

unten: Arbeit mit Formeln. (V : Volumen).

³ Das Wort *Anforderung* verwenden wir hier und im weiteren als Oberbegriff für die Termini *Problem* und *Aufgabe*. Je nach Kontext meint Anforderung einen der Unterbegriffe oder beide zugleich.

Eine in der Literatur übliche Vorgehensweise dazu besteht im Nachweis unterschiedlicher kortikaler Netze für unterschiedliche mathematische Anforderungen. So etwa unterscheiden Cohen, Dehaene, Lee u. a. (Cohen und Dehaene, 1997; Dehaene und Cohen, 1998; Lee, 2000) im Rahmen der numerischen Informationsverarbeitung zwischen „Faktenabruf“ (z. B. $2 + 2 = ?$) und „Größenmanipulation“ (z. B. $25 \times 36 = ?$) und zeigen, dass zu deren Anforderungsbewältigung auch unterschiedliche kortikale Netze aktiviert sind. Zargo u. a. (2001, vgl. auch Dehaene u. a. 1999; Pesenti u. a., 2001; Gruber u. a., 2001) finden zwei kortikale Netzwerke bei der mentalen Kalkulation: ein linkes präfrontales Netzwerk für die Verarbeitung von Ziffern und bilateral ein temporoparietales Netzwerk für die Verarbeitung bildhaft-anschaulicher Information.

Im Extremgruppenvergleich finden sich auch Veränderungen solcher Netze nach intensivem Training. So berichten Pesenti u.a., (2001) über eine Ausweitung des kortikalen Areals rechts parietal bei einem mathematisch Hochbegabten, der über viele Jahre trainiert hat. Schlaug u.a.(1995) sowie Schlaug u.a., (1995a) finden bei Musikern, die bereits vor dem 7. Lebensjahr mit dem Training begonnen haben, im Vergleich zu Nichtmusikern eine Vergrößerung des frontalen Teils des Corpus Callosum. Insofern bewirken Trainingsprozesse, die zu außergewöhnlichen Leistungen führen, auch Veränderungen neuronaler Strukturen. Eine Übersicht über biologische und psychologische Korrelate außergewöhnlicher Leistungen findet sich bei Oerter (2003).

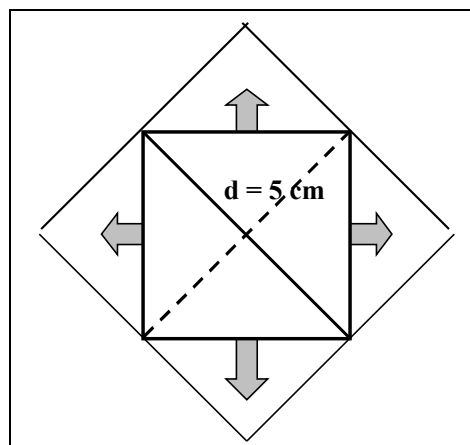
Unsere Vorgehensweise lehnt sich mit dem Anspruch des Nachweises kortikaler Netze an diese übliche Vorgehensweise an, jedoch ist der Ansatzpunkt nicht eine spezielle mathematische Problemklasse sondern die Denkpsychologie. Zudem rücken wir eine Prozessanalyse in den Vordergrund unserer Betrachtungen. Die großen Wissenschaftsdisziplinen wie Mathematik, Physik, Chemie oder Biologie gehen theoriegeleitet vor und deduzieren Hypothesen aus Kenntnissen über Elementarprozesse. Wenngleich eine Theorie über menschliches Denken in unserer Disziplin bisher nicht existiert, so lassen sich doch Prozesseigenschaften im menschlichen Denken angeben, die in den unterschiedlichsten Anforderungen zu beobachten sind und von daher einen gewissen Allgemeingültigkeitsanspruch haben. Solche Invarianten im Denken werden Basiskomponenten genannt. Bisher werden von Klix (1992) – wie eingangs erwähnt - vier Basiskomponenten betrachtet, die er auch evolutionär begründet hat, wenngleich ein Vollständigkeitskriterium nicht existiert: Komplexitätsreduktion, Multimodalität, Analogiebildung und multiple Klassenbildung. Die Multimodalität charakterisiert die Fähigkeit im Denken, ein Problem sowohl bildhaft-anschaulich als auch begrifflich (bzw. rechnerisch oder durch Symbolmanipulation) zu lösen. Es ist bekannt, dass eine solche Doppelrepräsentation bzw. das Wechselspiel zwischen den Modalitäten die Leistung fördert. Dies gilt sowohl für das Behalten von Information – ein dargebotenes Wort in Verbindung mit einem Bild wird besser behalten als ein Wort allein (Engelkamp, 1990) – als auch beim Denken (Spies, 1995, 1996; Krause, 2000), sowohl bei technischen Problemen als auch bei Alltagsproblemen. Beispielsweise zeigt Klix (1993) mit Bezug auf den von Leibniz eingeführten Integralgedanken als Summe einer Anzahl von „differentiellen Stückchen“, wie wechselseitige Abbildungen von anschaulichen in begriffliche Repräsentationsformen und umgekehrt zu kreativen Denkleistungen, zur Entdeckung völlig neuer Zusammenhänge führen können. Der kognitive Aufwand sollte eine entscheidende Größe für das Wechselspiel zwischen den Modalitäten darstellen: ein Wechsel sollte insbesondere dann stattfinden, wenn der kognitive Aufwand in der verbleibenden Modalität hoch bzw. das Problem gar nicht lösbar ist. Der Autor macht dies mit einem trivialen Beispiel deutlich: „Zu 1 Million 10 000 Stück hinzutun, das ist

anschaulich nicht zu machen. In der logisch-begrifflichen Ebene unseres Zahlensystems jedoch eine Kleinigkeit“. Diese Eigenschaft des Wechselspiels zwischen den Modalitäten wird als eine Eigenschaft Hochbegabter angesehen (Hendrickson, 1986; Klix, 1992). Wenn dies zutrifft, dann ergeben sich für den experimentellen Nachweis der Multimodalität zumindest 2 Methoden: 1) die Variation einer unabhängigen Variablen (z. B. Operationenanzahl) so, dass der Modalitätswechsel durch Aufwandserhöhung erzwungen wird und 2) ein Extremgruppenvergleich hoch - versus normalbegabt. Wir haben uns hier für den zweiten Weg entschieden und fragen, ob sich bessere Leistungen Hochbegabter auf die frühere Verfügbarkeit beider Modalitätsstrategien, auf das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung und schließlich auf eine bessere Ordnungsbildung zurückführen lassen.

Ist die kürzere Lösungszeit Hochbegabter experimentalpsychologisch erklärbar?

Gegeben ist folgendes Problem (Abbildung 13): Für ein Quadrat mit der Diagonalenlänge $d = 5 \text{ cm}$ soll der Flächeninhalt verdoppelt werden. Wie lang ist die Seite des neuen Quadrates? Die Abbildung 13 zeigt zwei Modalitätsstrategien, die zur Lösung des Problems eingesetzt werden können. Eine bildhaft-anschauliche Strategie (Abbildung 13 oben) besteht im „Herausklappen“ der vier kongruenten rechtwinkligen Dreiecke, die durch Einzeichnen beider Diagonalen entstanden sind. Ein solches Vorgehen führt auf eine geometrische Figur, welche die Lösung unmittelbar nahe legt. Eine rechnerische Strategie (Abbildung 13 unten) besteht im Anwenden des Satzes von Pythagoras (Heinrich, 1997).

Bildliche Lösungsstrategie:



Rechnerische Lösungsstrategie:
 (Die Skizze dient hier nur dem besseren Verständnis)

	$F = a^2$ $d^2 = a^2 + a^2$ $d^2 = 2a^2 \text{ and } a^2 = \frac{d^2}{2}$ $\Rightarrow F = \frac{d^2}{2}$ $F' = 2F$ $F' = 2 \frac{d^2}{2}$ $F' = d^2$ $\Rightarrow a' = \sqrt{d^2}$ $a' = d$ $a' = 5 \text{ cm}$
--	---

Abbildung 13

Beide Modalitätsstrategien (2 M) zur Lösung des oben angegebenen Problems.

Oben: bildhaft-anschauliche Strategie.

Unten: Lösung durch Arbeiten mit Gleichungen und Rechnen.

Unsere Versuchspersonen⁴ müssen solche Probleme lösen. Dabei zeigt sich, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, dass hochbegabte Versuchspersonen etwa die halbe Zeit im Vergleich zu normalbegabten Versuchspersonen benötigen. Worauf ist diese Zeitverkürzung bei Hochbegabten zurückzuführen?

Tabelle 1

Intelligenzquotient (IQ), mentale Rotation (Scorewerte), Gedächtniskapazität (Cavanagh-Konstante in ms), Gedächtnisspanne (g), Arbeitsgedächtniskapazität (Rechenspanntest) und Lösungszeit (sec) für Hoch- und Normalbegabte (M = Mittelwert, SD = Standardabweichung).

Größe		hochbegabt	normalbegabt	Z-Werte	p-Werte
IQ nonverbal	M	124	107	-2,79	0,004
	SD	10	10		
IQ verbal	M	112	105	-0,997	0,34
	SD	13	4		
Mentale Rotation	M	17	14	-1,317	0,193
	SD	3	5		
Cavanagh-Konstante	M	295	247	-0,821	0,438
	SD	116	77		
Gedächtnisspanne (Ziffern)	M	7,36	6,03	-3,45	0,000
	SD	0,957	0,489		
Lösungszeit	M	57	101	-3,95	0,001
	SD	46	52		

Fragen wir zunächst, ob die mit anderen psychologischen Messverfahren bestimmten Eigenschaften Hochbegabter die kürzere Lösungszeit – zumindest plausibel – erklären könnten. Hochbegabte seien intelligenter als Normalbegabte, dann sollte der IQ trennen.

⁴ Stichprobe: mathematisch (Hoch)begabte: 12 Abiturienten des Carl-Zeiss-Gymnasiums Jena (Spezialschule)

Durchschnittsalter: 18,5; 3 weiblich, 9 männlich; IQ (LPS – U3): 124.

mathematisch Normalbegabte: 13 Abiturienten der Grete-Unrein Schule Jena (Gesamtschule); Durchschnittsalter: 17,6; 6 weiblich, 7 männlich; IQ (LPS – U3): 106. Die Auswahl erfolgte durch Lehrerurteil.

Ein Wort zur Stichprobe: Bekanntlich wird von Begabung gesprochen, wenn hochintelligente Leistungen auf einem Gebiet vorliegen. In der Begabungsliteratur finden sich zwei Stichprobencharakteristiken. Die einen weisen den Gedanken zurück, dass Begabung ein Ergebnis von Trainingsprozessen ist (Winner, 2000). Die anderen betonen gerade den Trainingsaspekt beim Erzielen außergewöhnlicher Leistungen (Ericsson u. a., 1993). Wir fühlen uns mit unserem Ansatz der zweiten Denkrichtung verpflichtet, ohne damit die Bedeutung genetischer Faktoren in Frage stellen zu wollen. Ungeachtet der Tatsache, dass unsere Meßmethoden keine Entscheidung über Vererbung erlauben, fühlen wir uns einer Denkrichtung verbunden, bessere Leistungen durch intensiveres Training zu erzielen. Gewiss sind dazu auch Voraussetzungen notwendig. Die Trennung zwischen den Stichproben liegt dann in der Leistungsänderung pro Zeiteinheit. Die Ursachen für die außergewöhnlichen Leistungen bleiben offen.

Wie die Tabelle 1 zeigt, sind die Ergebnisse widersprüchlich und damit für die Prädiktion ungeeignet. (Mit dem nonverbal IQ werden Leistungen beim analogen Schließen, mit dem verbal IQ werden Kategorisierungsleistungen gemessen.) Angenommen, Hochbegabte besitzen eine größere Visualisierungsfähigkeit als Normalbegabte, könnten sich also etwas bildhaft-anschaulich besser vorstellen, dann sollten die Teste-Werte bei der mentalen Rotation trennen. Gemäß Tabelle 1 ist dies jedoch nicht der Fall. Angenommen, Hochbegabte hätten eine bessere (Kurzzeit-)Gedächtniskapazität, dann sollten sie sich in der Gedächtnisspur (ausdrückbar durch die Cavanagh-Konstante in ms) unterscheiden. Wie Tabelle 1 zeigt, findet sich kein Unterschied. Dagegen steht zunächst ein Unterschied in der Gedächtnisspanne bei Ziffern. Danach behalten Hochbegabte kurzzeitig mehr Ziffern als Normalbegabte. Die Gedächtnisspanne ist jedoch materialabhängig und von daher nicht verallgemeinerbar. Die traditionellen Maße der Experimentalpsychologie liefern damit keine Erklärung für die kürzere Lösungszeit Hochbegabter. Klix (1992) erklärt die kürzere Lösungszeit Hochbegabter durch die bessere Verfügbarkeit von Strategien. Können wir das mit neurowissenschaftlichen Methoden belegen?

Haben Hochbegabte Strategien besser verfügbar?

Wenn Hochbegabte im Gegensatz zu Normalbegabten schon mit dem Verstehen des Problems (oder spätestens am Ende des Verstehensprozesses) Lösungsstrategien verfügbar (vgl. Fußnote 2) haben, dann sollten jene Hirnareale, die für diese Strategien verantwortlich sind, zu diesem Zeitpunkt bei Hochbegabten aktiviert sein, nicht dagegen bei Normalbegabten. Zum Nachweis der Aktivierung in den Hirnarealen wurde das Elektroenzephalogramm (EEG) während des Problemlösens gemessen. Die EEG-Auswertung erfolgt mit der von Schack entwickelten adaptiven EEG-Kohärenzanalyse (Schack, 1997, 1999; Schack, u. a. 1995, 1999). Die Kohärenz ist ein Maß für die Synchronizität zweier EEG-Signale. Hohe Kohärenz bedeutet hohe Aktivierung. In dieser Untersuchung erfolgt eine Beschränkung auf benachbarte Elektrodenpaare und auf ein Frequenzband von 12 bis 20 Hz. Bezüglich der Datenauswertungsmethode sei auf die

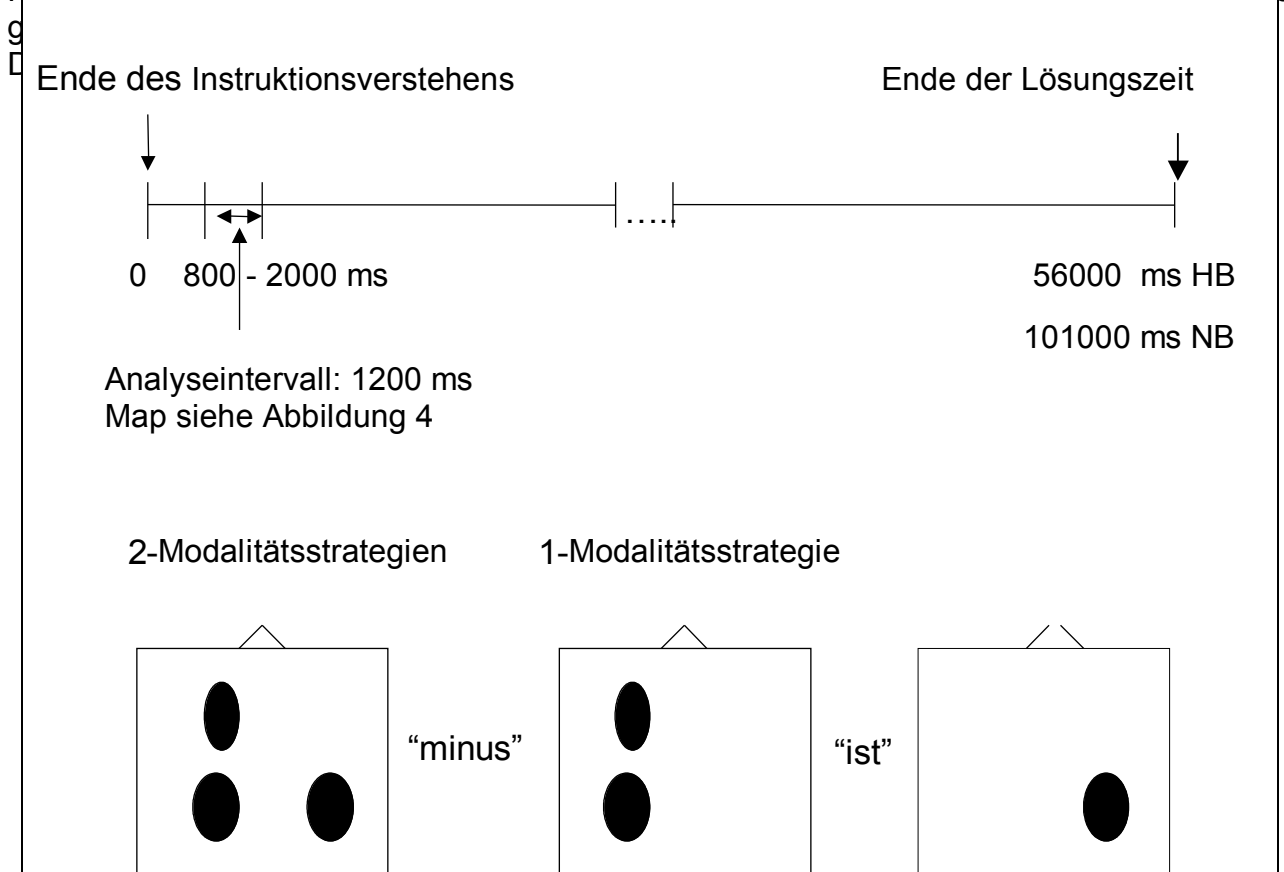


Abbildung 14

Schematische Darstellung für den Nachweis der Verfügbarkeit von Modalitätsstrategien.

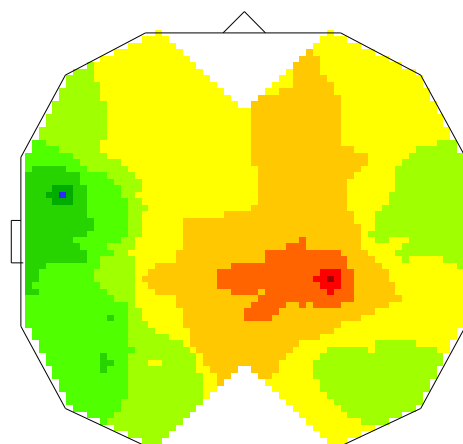
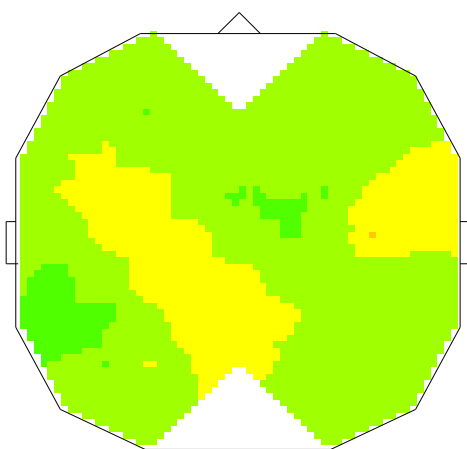
oben: Zeitbezug der EEG-Kohärenzanalyse und Lösungszeit. (HB = hochbegabt, NB = normalbegabt).

unten: Schematische topographische Darstellung der aktivierten kortikalen Areale (Maps) bei Nutzung einer (1 M: Rechnen) bzw. bei Nutzung von zwei (2 M: Rechnen und bildhaftes Vorstellen) Modalitätsstrategien. Bei Differenzbildung erhält man das rechte Map als Nachweis für die Nutzung von zwei Modalitätsstrategien.

Die zeitliche Analyse beschränkt sich auf die erste Sekunde nach dem Instruktionsverstehen. Der 800 ms Startpunkt (und nicht Null ms) ist methodischen Bedingungen der adaptiven EEG-Kohärenz geschuldet. Das Analyseintervall von 1200 ms ist willkürlich gewählt worden. Die Versuchspersonen mussten sowohl Probleme mit zwei Modalitätsstrategien (2 M) (vgl. Abb. 13) als auch Aufgaben mit einer Modalitätsstrategie (1 M) lösen. Für die zuletzt genannte Anforderung wurden Additionsaufgaben mit 3 und 4 Summanden gewählt. Diese Aufgaben dienten als Referenz. Das Ergebnis der Differenzen zeigt Abbildung 15.

normalbegabt

hochbegabt



C4/P4 $p < 0.001$

Abbildung 15

gemittelte Differenzkohärenzmaps beim Lösen von Aufgaben (zwei Modalitätsstrategien „minus“ eine Modalitätsstrategie) für Hoch- und Normalbegabte innerhalb der ersten Sekunde nach dem Instruktionsverstehen. Die Kohärenzdifferenz von 0,27 über dem Elektrodenpaar C4P4 (der rote Fleck centro-parietal rechts) ist signifikant ($p < 0,001$, Bonferronikorrektur). Skala der Kohärenzwerte: von + 0.30 (rot) bis - 0.30 (blau) (vgl. Abbildung 14).

Zur Mapdarstellung wurden aus der Stichprobe der Hochbegabten nur diejenigen Zeitpunkte ausgewählt, zu denen die Kohärenz im centroparietalen Bereich rechts über C4P4 beim Lösen von 2-Modalitätsstrategie-Aufgaben signifikant höher war als beim Lösen von 1-Modalitätsstrategie-Aufgaben. Für diese so ausgewählten Zeitpunkte wurden die Differenzkohärenzmaps in der Stichprobe der Normalbegabten bestimmt. Die Mittelung der Maps erfolgt über gleiche Stichprobenanzahlen. Der Befund in Abbildung 4 besagt, dass innerhalb der ersten Sekunde nach dem Instruktionsversuchen bei Hochbegabten bereits jene Hirnregionen aktiviert sind, die für beide Modalitäten verantwortlich gemacht werden, wohingegen in der Stichprobe der Normalbegabten zu diesem Zeitpunkt noch keine Aktivierung in diesen Hirnregionen nachweisbar ist. Wir interpretieren dieses Ergebnis so, dass zu diesem Zeitpunkt – innerhalb der ersten Sekunde nach dem Instruktionsverstehen – eine bildhaft–anschauliche Modalitätsstrategie in der Stichprobe der Normalbegabten noch nicht verfügbar ist.

Betrachtet man neben der Topographie auch noch die Aktivationszeit über dem Elektrodenpaar C4P4 in Abhängigkeit von der Lösungszeit (Abbildung 16), so lässt sich ein umgekehrt proportionaler (und nicht direkt proportionaler) Zusammenhang für dieses Analyseintervall der ersten Sekunde nachweisen. Je länger dieses ausgewählte kortikale Areal – in diesem frühen Zeitabschnitt – aktiv ist, umso kürzer ist die Lösungszeit.

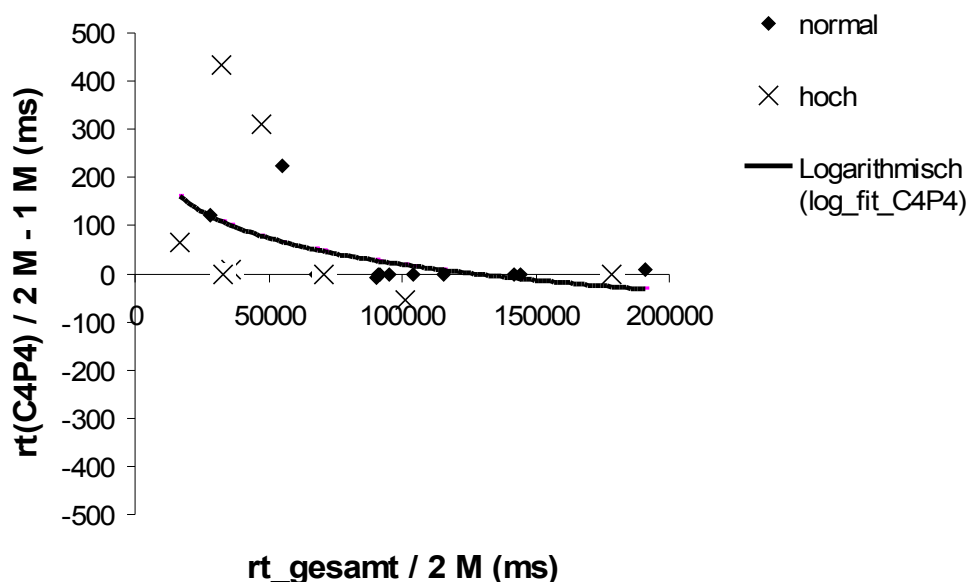


Abbildung 16

Zeit, in der über dem Elektrodenpaar C4P4 eine signifikant höhere Kohärenz bei einem 2-Modalitätsstrategie-Problem im Vergleich zu einer 1-Modalitätsstrategie-Aufgabe gemessen wurde in Abhängigkeit von der Lösungszeit für jede einzelne Versuchsperson. Durch Kreuze bzw. Quadrate sind die hoch- bzw. normalbegabten Versuchspersonen gekennzeichnet. Der negative Anstieg der angepassten Funktion ist signifikant von Null verschieden ($B = -79,6$; $p = 0,038$).

Die Funktion in Abbildung 16 repräsentiert eine Beziehung, wie sie in der Betrachtungsweise zwischen innerer und äußerer Psychophysik kognitiver Prozesse von Bedeutung ist (Sommerfeld, 2001). Es lässt sich – in der Tat auch bei Denkprozessen – in analoger Weise eine Funktion zwischen intern und extern ablaufenden Prozessen angeben.

Hypothesengemäß findet sich über anderen Hirnregionen kein funktionaler Zusammenhang. Als Beispiel ist die Beziehung im linken Frontalbereich über dem Elektrodenpaar F3F7 in Abbildung 17 dargestellt.

Die Abbildung 18 zeigt die Beziehung für alle 30 Elektrodenpaare. Wir deuten diesen Befund so, dass eine frühzeitige längere Aktivierung der für eine bildhaft-anschauliche Modalitätsstrategie verantwortlichen kortikalen Areale die Lösungszeit verkürzt. Dies unterstreicht den Einfluss der frühzeitigen Verfügbarkeit von Strategien auf die Lösungszeit und stellt eine Erklärungsmöglichkeit dar, warum Hochbegabte kürzere Lösungszeiten aufweisen.

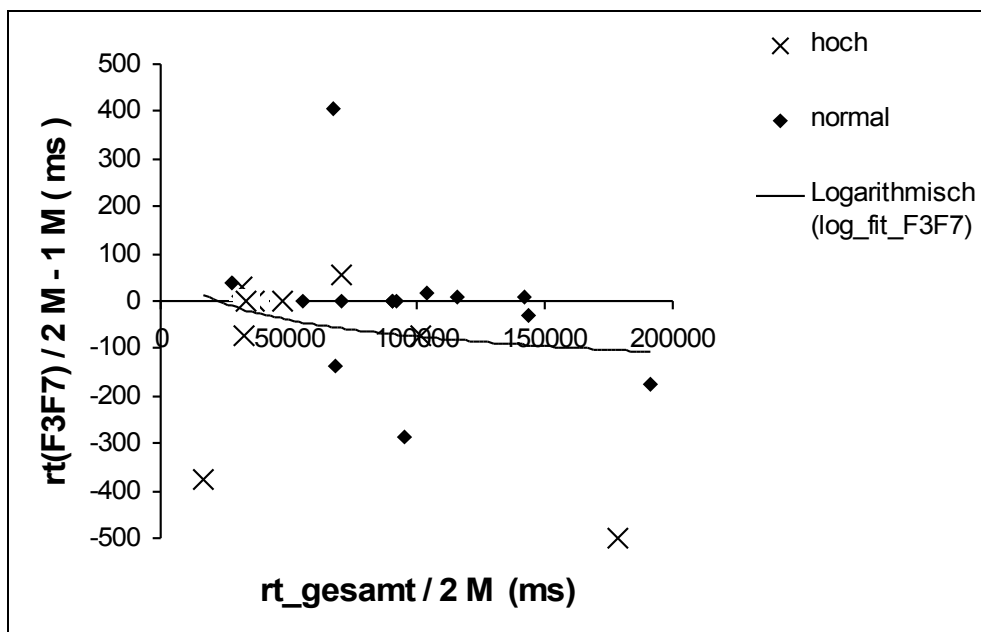


Abbildung 17

Zeit, in der über dem Elektrodenpaar F3F7 eine signifikant höhere Kohärenz bei einem 2-Modalitätsstrategie-Problem im Vergleich zu einer 1-Modalitätsstrategie-Aufgabe gemessen wurde in Abhängigkeit von der Lösungszeit für jede einzelne Versuchsperson. Durch Kreuze bzw. Quadrate sind die hoch- bzw. normalbegabten Versuchspersonen gekennzeichnet. Der negative Anstieg der angepassten Funktion ist nicht signifikant von Null verschieden ($B = -50$; $p = 0,46$).

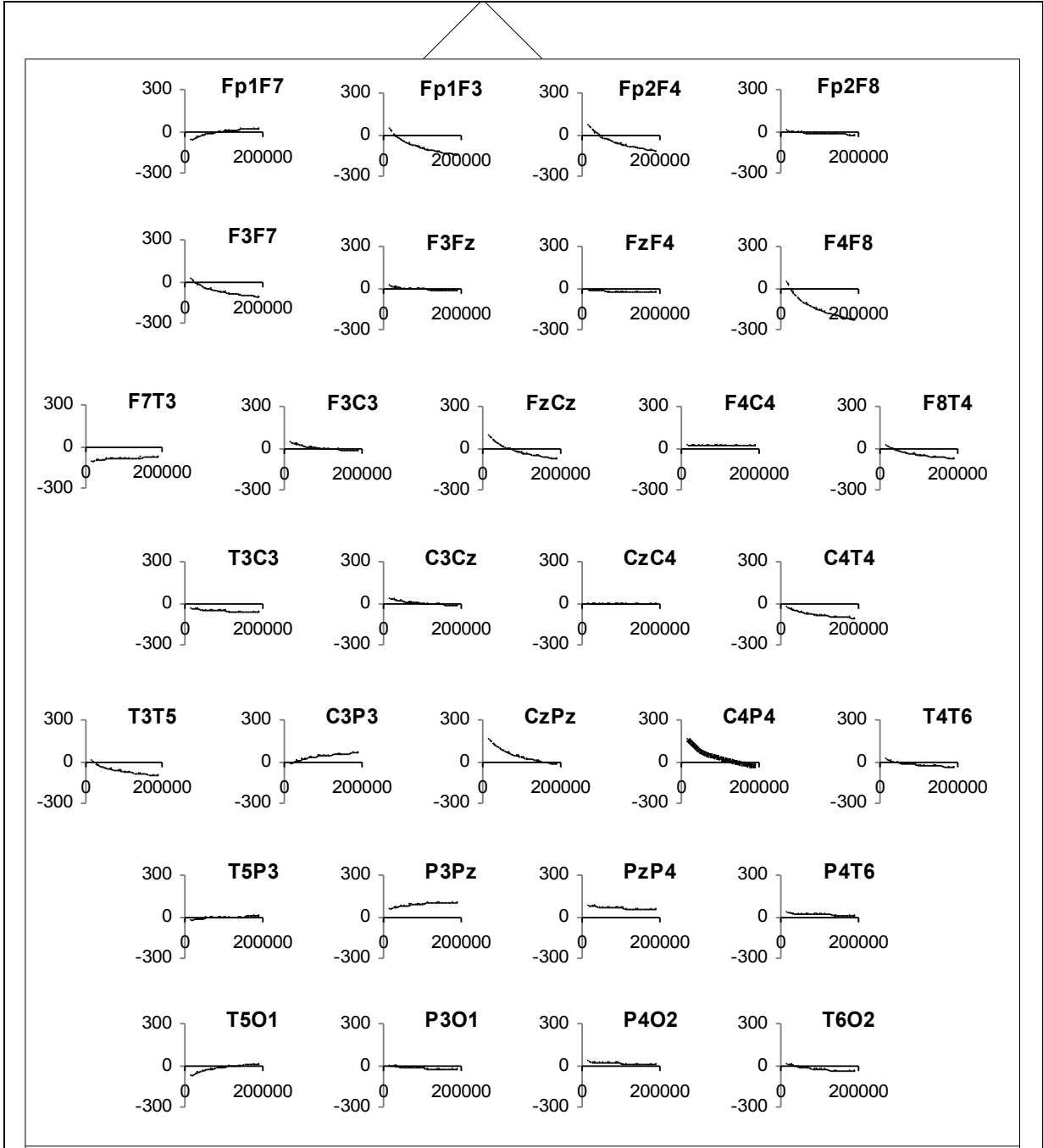


Abbildung 18

Zeit (ms), in der über jedem Elektrodenpaar eine signifikant höhere Kohärenz bei einem 2-Modalitätsstrategie-Problem im Vergleich zu einer 1-Modalitätsstrategie-Aufgabe gemessen wurde in Abhängigkeit von der Lösungszeit (ms) für jede einzelne Versuchsperson. Nur über dem Elektrodenpaar C4P4 ist der negative Anstieg signifikant (siehe auch Abb. 16 und 17).

Zeigen Hochbegabte einen intensiveren Wechsel zwischen Strategien?

Phänomenologisch ist hinreichend erörtert, dass das Wechselspiel zwischen den Modalitäten zur Charakterisierung geistiger Leistungen eine bedeutsame Größe ist. Dies gilt nicht nur für die Mathematikdidaktik (Heinrich, 2003b) oder den historisch-mathematikdidaktischen Aspekt (Zimmermann, 2003), sondern auch für die Mathematik (Descartes, 1641, 1954), für die Begabungsforschung (Hendrickson, 1986), für die Gedächtnispsychologie (Paivio, 1969; Engelkamp, 1990), für die Denkpsychologie (Klix, 1992, 1993; Krause, 2000), für die Technikwissenschaften (Spies, 1995, 1996) und noch für weitere Disziplinen.

Zu fragen ist, ob dieses „Wechselspiel“ zwischen den Modalitäten auch mit neurowissenschaftlichen Methoden nachweisbar ist. Zur Beantwortung dieser Frage wird die gleiche Methode wie im vorhergehenden Abschnitt verwendet, jedoch dehnen wir jetzt das Analyseintervall auf die ersten 10 Sekunden nach dem Instruktionenverstehen aus. Die Abbildung 19 zeigt das auf diese Weise erhaltene Ergebnis für eine hochbegabte und eine normalbegabte Versuchsperson.

hochbegabt (rt = 32303 ms)

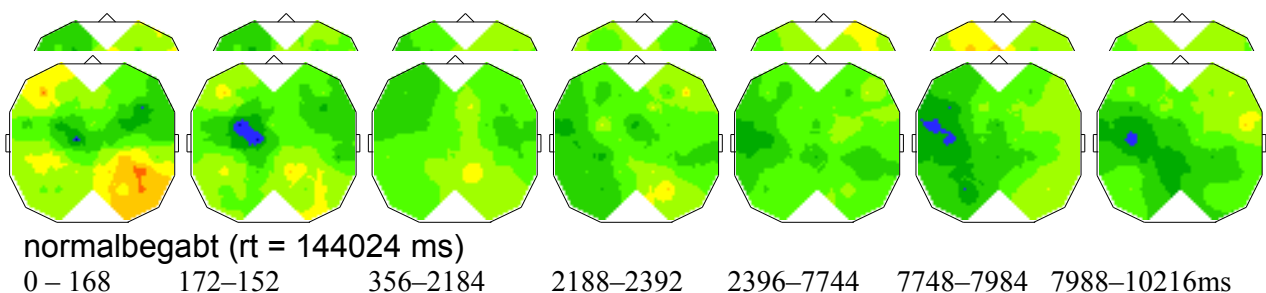


Abbildung 19

Differenzkohärenzmaps (2 Modalitätsstrategien – 1 Modalitätsstrategie), gemittelt über jeweils 20 Aufgaben, für eine hochbegabte und eine normalbegabte Versuchsperson. Skala der Kohärenzwerte: von + 0.30 (rot) bis – 0.30 (blau). Pfeile kennzeichnen signifikante Differenz über C4/P4 ($p < 0.001$, Bonferronikorrektur). Die Zahlen unter den Maps geben die Zeiten in ms an, die für beide Versuchspersonen gelten. Diese Zeitverhältnisse für den Modalitätswechsel wurden bei der hochbegabten Versuchsperson gefunden und auf die normalbegabte Versuchsperson übertragen. Bei der normalbegabten Versuchsperson wurde im gesamten Analyseintervall von 10 Sekunden keine signifikante Differenzkohärenz gefunden.

Innerhalb des Analyseintervalls von 10 Sekunden wird bei der hochbegabten Versuchsperson dreimal über dem Elektrodenpaar C4P4 eine signifikant höhere Kohärenz bei einer 2-Modalitätsstrategie-Aufgabe gegenüber einer 1-Modalitätsstrategie-Aufgabe gemessen. Diese Kohärenzerhöhung dauert im Mittel über 200 ms an. Es gibt gute Gründe anzunehmen, dass eine so relativ lange Zeit mit dem Zeitverbrauch kognitiver Operationen in Verbindung zu bringen ist⁵. Übertragen wir die gleichen Zeitverhältnisse auf die normalbegabte Versuchsperson, so lässt sich kein Wechsel innerhalb der ersten 10 Sekunden beobachten. Es ist natürlich nicht auszuschließen, dass dieser Wechsel bei dieser normalbegabten Versuchsperson zu einem späteren Zeitpunkt eintritt. Und schließlich sollte ein Trainingsprozess oder ein gezielter Unterricht die zeitliche Vorverlagerung der Aktivierung und den Wechsel befördern. Man muss mit Bezug auf die Abbildung 19 jedoch deutlich machen, dass hier zwei Einzelfälle dargestellt sind. Für die gesamten Stichproben wurde kein signifikanter Unterschied für die Häufigkeit des Wechsels der Aktivierung über C4P4 gefunden. Wir vermuten, dass die verwendeten Aufgaben (vgl. Abbildung 13) für unsere Hochbegabten generell zu einfach waren.

Zeigen Hochbegabte einen geordneteren Denkablauf?

Denkabläufe bilden sich in Handlungsabläufen ab, geordnete Denkabläufe in geordneten Handlungsabläufen, in geordneten Handlungs- oder Zustandssequenzen. Man denke etwa an Zustandssequenzen als Sequenzen bestimmter Scheibenkonstellationen beim Turm von Hanoi. Zustandssequenzen können als Markoffketten aufgefasst werden. Der Ordnungsgrad einer Zustandssequenz lässt sich auf der Basis von Auftretis- und Übergangswahrscheinlichkeiten von und zwischen Zuständen als Entropie bestimmen. Damit wird der Ordnungsgrad einer Sequenz extern erfasst. Bekanntlich hat die seit mehr als zweitausend Jahren währende Trennung zwischen „extern“ und „intern“ einen entscheidenden Erkenntnisfortschritt gebracht. Lässt sich, so wäre zu fragen, die oben angestellte Überlegung auf eine „intern“ ablaufende Sequenz übertragen, um damit den Ordnungsgrad eines Denkablaufes zu messen? Intuitiv ist klar, dass ein geordneter Denkablauf weniger „Umwege produziert“ und damit weniger Zeit verbraucht, also zu kürzeren Lösungszeiten führt. Es muss aber ein Äquivalent für die externen Zustände intern definiert werden.

Lehmann (1987) hat in die EEG-Analyse eine Methode eingeführt, um zeitlich stabile Aktivationszustände aus dem EEG-Signal zu bestimmen, die ein Äquivalent für kognitive Operationen sein sollten. Er bezeichnete sie – spekulativ - als „Atome des Denkens“. Schack (1997, 1999) hat diesen Gedanken auf die adaptive EEG-Kohärenzanalyse übertragen. Mit dem von ihr entwickelten Verfahren lassen sich zeitlich stabile EEG-Kohärenzmaps bestimmen, die in Anlehnung an Lehmann als Mikrozustände bezeichnet werden. Wenngleich es nicht gelingt, die Mikrozustände zu interpretieren (Krause und Seidel, 2004), d. h. den Mikrozuständen kognitive Operationen eineindeutig zuzuordnen, so lässt sich doch der Ordnungsgrad der Mikrozustandssequenzen mit der von Schack entwickelten Methode bestimmen. Die Mikrozustandssequenzen können – worauf wir bereits hingewiesen haben - als Markoffketten aufgefasst werden. Auftretis- und Übergangswahrscheinlichkeiten können so bestimmt werden. Mit einer Beschränkung auf

⁵ Just und Carpenter (1976): Fixationsdauer bei Vergleichs – und Rechenoperationen: 293 ms; Klix und van der Meer (1978), Klix (1983): analoge Schlussprozesse: 220 ms; Petzold und Edeler (1999): Urteilsprozesse: 56 ms.

6 Mikrozustände sind die Markoffketten für eine hoch- und eine normalbegabte Versuchsperson in Abbildung 20 angegeben (vgl. auch Seidel, 2001).

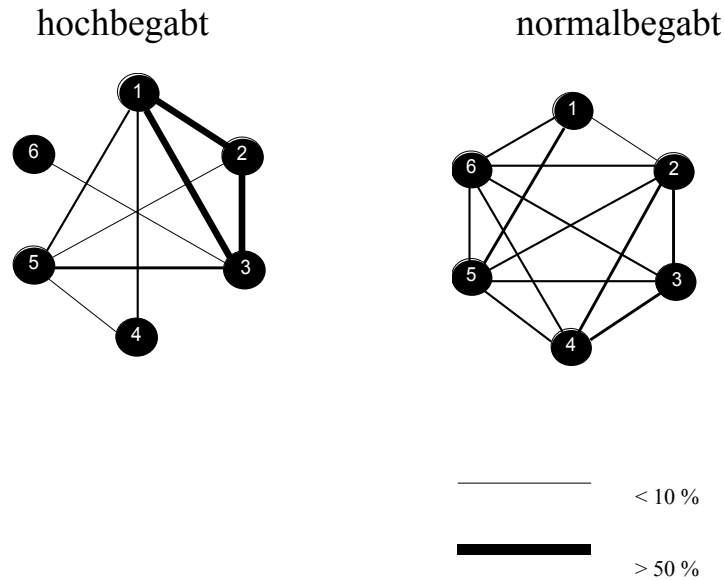


Abbildung 20

Mikrozustandssequenzen für eine hochbegabte und eine normalbegabte Versuchsperson beim Lösen eines 2-Modalitätsstrategie-Problems (vgl. Abbildung 13). Die Strichstärke steht für die Übergangshäufigkeiten. Es erfolgt eine Beschränkung auf 6 Mikrozustände. Die Entropiereduktion H_{red} wurde als Differenz zwischen der Shannon-Entropie und der bedingten Entropie (Schack, 1999) für die beiden Versuchspersonen berechnet (hochbegabt: $H_{red} = 1.20$, normalbegabt: $H_{red} = 0.91$).

Auffällig ist die sich deutlich abhebende Untersequenz der hochbegabten gegenüber der normalbegabten Versuchsperson. Die über die Stichproben berechnete Entropiereduktion und der Ordnungsgrad der Markoffkette sind in Abbildung 21 dargestellt.

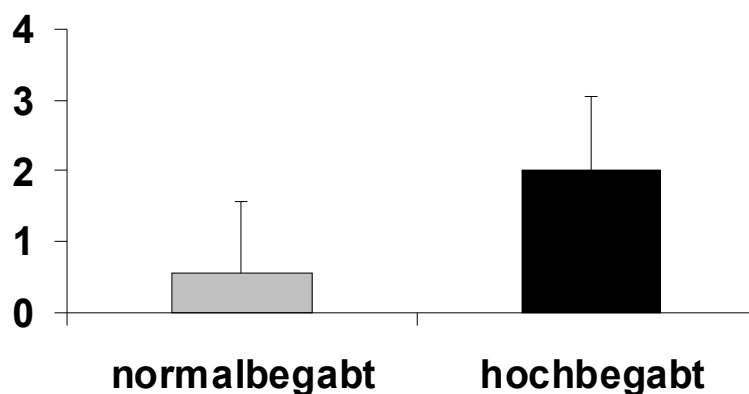
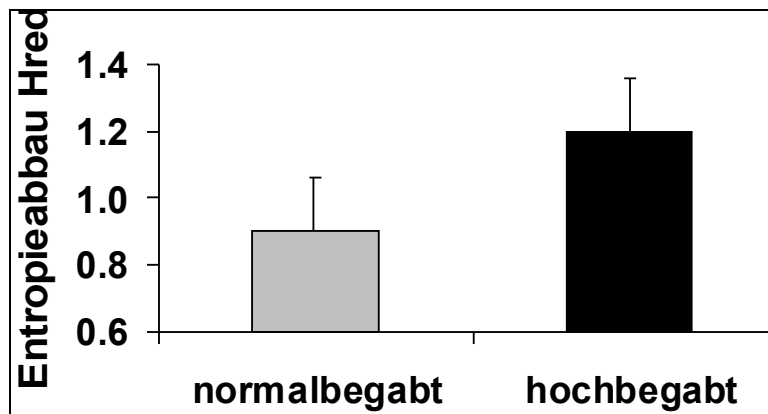


Abbildung 21

oben: Entropiereduktion H_{red} für die Stichprobe der hoch- und der normalbegabten Versuchspersonen. Bei sechs Mikrozuständen beträgt der maximale Wert 2,56. Der Unterschied zwischen den Stichproben ist signifikant ($p < 0,01$).

unten: Ordnungsgrad der Markoffkette der Mikrozustände für die Stichprobe der hoch- und normalbegabten Versuchspersonen. Der Unterschied ist signifikant ($p < 0,01$). Der Ordnungsgrad wurde mit einer Konfigurations-Frequenz-Analyse (Lautsch und Weber, 1995) bestimmt.

Nach diesem Befund weisen Hochbegabte eine höhere Entropiereduktion auf im Vergleich zu den Normalbegabten: das Gleiche gilt für den Ordnungsgrad (Seidel, 2001, 2003, Krause, Seidel und Heinrich, 2003a,). Offensichtlich geht die höhere Verkettung der Mikrozustände mit einer Verkürzung der Lösungszeit einher.

Auf der Suche nach sensiblen Maßen für geistige Prozesse und Leistungen könnten der Zeitpunkt der Verfügbarkeit von Strategien, gemessen über den Zeitpunkt der Frühaktivierung ausgezeichneter Hirnregionen, das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung, gemessen über die Häufigkeit des Wechsels der Aktivierung ausgezeichneter Hirnareale und die Ordnung des Denkablaufes, gemessen über die Entropiereduktion und den Ordnungsgrad als solche Maße betrachtet werden.

Zusammenfassend sei festgehalten

Die kürzere Lösungszeit von Hochbegabten gegenüber Normalbegabten beim Lösen von 2-Modalitätsstrategie-Aufgaben lässt sich durch die zunächst plausible Vermutung einer besseren Visualisierung nicht erklären. Auch finden wir bei diesen Anforderungen keinen Unterschied im Wissen um die Modalitätsstrategien. Die Gedächtniskapazitäten der Stichproben unterscheiden sich ebenfalls nicht. Und schließlich widersprechen sich die Befunde zum IQ.

Dagegen findet sich bei Hochbegabten eine hohe Aktivierung in für Modalitätsstrategien ausgezeichneten Hirnarealen zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Lösungsprozesses, unmittelbar nach dem Verstehen der Aufgabe. Bei Normalbegabten findet sich diese Aktivierung zu einem sehr frühen Zeitpunkt nicht. Die Aktivationszeit dieser ausgezeichneten Hirnareale ist der Lösungszeit umgekehrt proportional. Wie interpretieren diese Befunde als *frühere Verfügbarkeit* von Modalitätsstrategien bei Hochbegabten und begründen damit deren kürzere Lösungszeit.

Darüber hinaus finden sich Unterschiede in der Sequenz von Mikrozuständen. Hochbegabte zeigen eine höhere Verkettung von Mikrozuständen im Vergleich zu Normalbegabten. Quantitativ lässt sich daraus eine *höhere Entropiereduktion* bei Hochbegabten im Vergleich zu Normalbegabten errechnen.

Das neue Maß ist hier die Entropiereduktion, mit der subjektive Urteile objektiviert werden können. Mit Bezug zur Frage, ob der Unterschied zwischen den Extremgruppen in der neuronalen Struktur oder im Prozess über einer neuronalen Struktur zu suchen sei, muss nach diesem Befund dem Prozess die Präferenz gegeben werden, zumindest dann, wenn mehrjährige Trainingsprozesse nicht betrachtet werden. In beiden Fällen, sowohl bei Minderleistung als auch bei Hochleistung finden wir *Prozessmaße als neue Messgrößen*.

4. Förderung von Normalleistung

Spies (1991, 1993, 1995, 1996) hat in der industriellen Praxis und später an der RWTH Aachen eine Innovationsstrategie entwickelt, bei der eine Personengruppe vor einer Menge von Bildern das gestellte Problem diskutiert. Die Vorgabe von Bildern ist das Neue an dieser Methode in der Gruppendiskussion. Der *Anspruch* dieser Innovationsstrategie besteht darin, *Normalbegabte (nicht Hochbegabte) zu kreativen Lösungen anzuregen, die Hochbegabte auch ohne diese Innovationsstrategie ausführen würden*. Die Abbildungen kennzeichnen die Gruppendiskussionen vor den Bildern (Innovationsstrategie nach Spies) und ohne Bilder (Kontrollsituation).

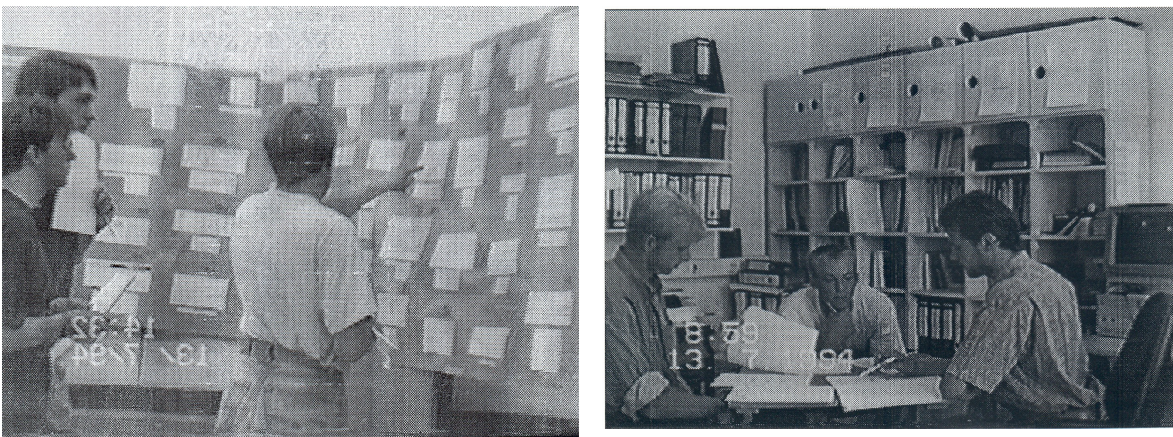


Abbildung 22

links: Innovationsstrategie nach Spies. Gruppendiskussion vor den Bildern.

rechts: Kontrollsituation Gruppendiskussion ohne Bilder.

In Abbildung 23 ist ein erstes Ergebnis der Aachener Voruntersuchungen (Krause, Sommerfeld, Gundlach und Ptucha, 1995) dargestellt. Die Aufgabe bestand darin, einen Betonmischer zu entwerfen, der in 2 Sekunden Beton mischt.

Dieses Problem wurde durch eine Gruppe mit Hilfe der Innovationsstrategie nach Spies gelöst (Gruppe mit Bildern). Eine zweite Gruppe löste das Problem ohne Vorgabe der Bilder (Gruppe ohne Bilder). Für beide Gruppen wurde die Anzahl geäußelter neuer Prinzipien bzw. Teilprinzipien innerhalb einer Diskussionsrunde von 17 min bestimmt. Offensichtlich erzeugt die Gruppe mit Bildern mehr Prinzipien. Der Modalitätswechsel beim Denken wird hier durch die Betrachtung der Bilder und die verbalen Erläuterungen in der Gruppendiskussion erzwungen. Personengruppen, die bei der Anforderungsbewältigung von vornherein einen Modalitätswechsel durchführen, zeigen bei der Innovationsstrategie keinen Effekt. Die ausführliche Analyse ist in Krause (2000) beschrieben.

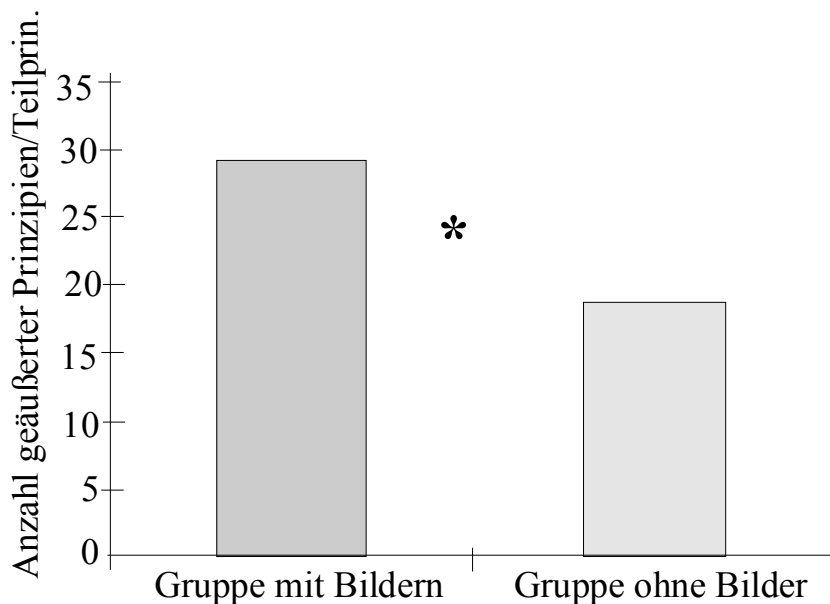


Abbildung 23

Anzahl geäußerter neuer Prinzipien und Teilprinzipien pro Person in einer Gruppenproblemlösediskussion für zwei Situationen: Gruppe mit Bildern (Nutzung der Innovationsstrategie) und Gruppe ohne Bilder (Diskussionsdauer: 17 min).⁶ (*= sign.).

Zusammenfassung

Gemeinsam ist den unterschiedlichen Extremgruppenvergleichen die Methode: Phänomen, Hypothese, Elementaranalyse, Maß. Sie erlaubt, neue sensiblere Maße für geistige Prozesse und Leistungen zu finden, weil sie auf einer Prozessanalyse menschlicher Informationsverarbeitung aufbaut. Zwei Vorgehensweisen sind dabei möglich:

- a) traditionelle Maße werden „verfeinert“, indem Prozessinformation Eingang in das Maß findet, z.B. beim Übergang von einer Größe zu einer Funktion und
- b) neue Maße aus anderen Disziplinen werden auf ihre Anwendbarkeit geprüft, z.B. die Entropie.

Für schizophrene Denkstörungen konnte hier gezeigt werden, dass – im Gegensatz zu Gesunden - Fehler eine Funktion der semantischen Distanz sind. Die primäre Störung ist eine Interferenz, die dann zu beobachten ist, wenn eine große Typikalität zwischen Begriffen mit einer Relationsbetrachtung in Konkurrenz tritt.

Für die mathematische Hochbegabung konnte hier gezeigt werden, dass die Entropiereduktion bei Hochbegabten größer ist als bei Normalbegabten. Die Hypothese des bevorzugten Modalitätswechsels Hochbegabter konnte neurowissenschaftlich untermauert werden.

Für die Normalbegabung konnte hier gezeigt werden, dass eine Förderung erfolgt, wenn der Modalitätswechsel durch Gestaltung der Lernumgebung angeregt wird.

⁶ Wir danken Herrn Dipl.-Ing. Schöttler und Herrn Dipl.-Ing. Ernst vom Institut für Bergbaukunde der RWTH Aachen für die geleistete Unterstützung bei der Datenauswertung.

An der Datenaufbereitung und statistischen Auswertung haben die Studenten der Universität Jena: M. Fey; S. Forkel; B. Haupt; S. Krieschel und die Studenten der Universität Leipzig: U. Glüse; S. Gräble; Ch. Hampel mitgewirkt. Auch ihnen gilt unser Dank.

Danksagung: Extremgruppenvergleiche sind nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit möglich. Dr. Frank Heinrich gilt unser Dank für eine langjährige erfolgreiche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der mathematischen Hochbegabung. Chefarzt Dr. Richter, OA Dr. Loos, OÄ Dr. Ursula Krause, Dr. Beate Jülich und Frau Dipl.-Psych. Beate Kratochvil gilt unser Dank für die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der schizophrenen Denkstörungen.

Für die Überlassung der Forschungssoftware „adkoh“, „adseg“ und „cohci“ gilt unser herzlicher Dank Bärbel Schack. Für die Nutzung der Forschungssoftware „ilmap“ danken wir Gert Griebach sehr herzlich.

Literatur

- Cohen, L. & Dehaene, S. (1997). Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33, 219 – 250.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1998). *Levels of representation in numberprocessing*. In: Stemmer, B. Whitaker, H.D. (eds.). *Handbook of Neurolinguistics*. San Diego: Academic Press.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284, 970-974.
- Descartes, R. (1954). *Meditation über die Grundlagen der Philosophie*. Übersetzung von A. Buchenau, Hamburg. (Titel der Originalausgabe: *Meditationes de prima philosophia*, 1641,42).
- Engelkamp, J. (1990). *Das menschliche Gedächtnis*. Göttingen, Toronto, Zürich: Hogrefe.
- Ericsson, K., A., Krampe, R. & Tesch-Romer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychology Review*, 100, 363-406.
- Goldstein, H.J. (1978) Deficits in schizophrenics and brain damaged persons compared. *Schiz. Bull.*, 4, 2, 160-185.
- Gruber, O., von Cramon, D.Y. (2001). Domain-specific distribution of working memory processes along human prefrontal and parietal cortices: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, 297, 29-32.
- Grunwald, M. (1998). *Haptische Reizverarbeitung und EEG-Veränderung*. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Grunwald, M., Ettrich, C., Assmann, B., Dähne, A., Krause, W., Beyer, L., Rost, R. und Gerts, H.-J. (1999). Haptische Wahrnehmung und EEG-Veränderungen bei Anorexia nervosa. *Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie*, 27 (4), 241-250.
- Grunwald, M., Ettrich, C., Assmann, B., et al.: Deficits in haptic perception and right parietal theta-power changes in patients with anorexia nervosa before and after weight gain. *International Journal of Eating Disorders* 29(2001) 417-428.
- Grunwald, M., Ettrich, C., Krause, W., et al.: Haptic perception in anorexia nervosa before and after weight gain. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 23(2001) 520-529.
- Grunwald, M. & Beyer, L. (Hrsg.) (2001). *Der bewegte Sinn*. Birkhäuser-Verlag, Basel.
- Grunwald, M., Ettrich, C., Busse, F., et al.: Angle Paradigm: A New Method to Measure Right Parietal Dysfunction in Anorexia Nervosa. *Archives of Clinical Neuropsychology* 17(2002) 485-496.
- Grunwald, M. (2004). *Psychophysiologische und klinisch-neuropsychologische Aspekte der haptischen Wahrnehmung*. Habilitationsschrift, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Grunwald, M., Weiss, T., Assmann, B., Ettrich, C.: Stable Asymmetric Interhemispheric Theta Power in Patients with Anorexia Nervosa during Haptic Perception even after Weight Gain: A Longitudinal Study. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 26/5(2004) 608-620.
- Grunwald, M., Weiss, T.: Inducing sensory stimulation in treatment of anorexia nervosa: a case report. *Quarterly Journal of Medicine*, (2005)98, 379-380.
- Heinrich, F. (1997). Diskussionsmaterial zur Untersuchung der Doppelrepräsentationshypothese und einige Bemerkungen aus mathematikdidaktischer Sicht. (*Manuskript, unveröffentlicht*).
- Heinrich, F. (2003a). Theoretische Analysen und empirische Erkundungen über das Wechseln von Lösungsansätzen beim Lösen mathematischer Probleme. Habilitationsschrift, Fakultät für Sozial – und Verhaltenswissenschaften, Friedrich – Schiller – Universität Jena.
- Heinrich, F. (2003b). Zum Wechselspiel zwischen Geometrie und Arithmetik/Algebra als ein heuristisches Leitprinzip im (bzw. von) Mathematikunterricht. Vortrag zur Habilverteidigung, Fakultät für Sozial – und Verhaltenswissenschaften, Friedrich – Schiller – Universität Jena. (*Manuskript, unveröffentlicht*).
- Hendrickson, L. (1986). A longitudinal study of precocity in music. In A.J. Cropley, K. Urban, H. Wagner, & W. Wiczerkowski (Eds.), *Giftedness*. (pp. 192-204). New York: Trillium Press.
- Just, M.A. & Carpenter, P.A. (1976). Eye Fixations and Cognitive Processes. *Cognitive Psychology*, 8, 441 – 480.

- Kießwetter, K. (2002). Unzulänglich vermessen und vermessen unzulänglich: PISA u. Co. In *DMV-Mitteilungen* 4/2002, S. 49-58. Siehe auch die Langversion: <http://www.minet.uni-jena.de/~schmitzm/midida/start.php?Datei=timss.txt>
- Kloos, G. (1965). *Anleitung zur Intelligenzprüfung in der psychiatrischen Diagnostik*. Stuttgart: Fischer.
- Klix, F. (1983). Begabungsforschung - ein neuer Weg in der kognitiven Intelligenzdiagnostik. *Zeitschrift für Psychologie*, 191, 360-387.
- Klix, F. (1992). *Die Natur des Verstandes*. Göttingen: Hogrefe.
- Klix, F. (1993). *Erwachendes Denken*. Heidelberg: Spektrum.
- Klix, F., & van der Meer, E. (1978). Analogical reasoning - an approach to cognitive microprocesses as well as to intelligence performance. *Zeitschrift für Psychologie*, 186, 39-47.
- Krause, W. (2000). *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen: Hogrefe.
- Krause, W., & Mirtschink, P. (1986). Schizophrene Denkstörungen - Identifikation von Parametern aus Schlußprozessen für eine rechnergestützte Diagnosefindung in der psychiatrischen Diagnostik. Teil I. *Zeitschrift für Psychologie*, 194, 411-441.
- Krause, W., & Mirtschink, P. (1987). Schizophrene Denkstörungen - Identifikation von Parametern aus Schlußprozessen für eine rechnergestützte Diagnosefindung in der psychiatrischen Diagnostik. Teil II. *Zeitschrift für Psychologie*, 195, 29-38.
- Krause, W., Sommerfeld, E., Gundlach, W., & Ptucha, J. (1995). Kreativität zwischen Technik und Psychologie: Bilder, Begriffe, Analogien, Ideen. Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr. K. Spies, Institut für Bergbaukunde II der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung.
- Krause, W. & Sommerfeld, E. (2000). Elementaranalyse von Denkprozessen mit psychophysikalischen und neurowissenschaftlichen Methoden. *Zeitschrift für Psychologie*, 208, 322-339.
- Krause, W., Seidel, G. und Heinrich, F. (2003). Über das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung beim Lösen mathematischer Probleme. *Der Mathematikunterricht* 49, 6, 50-62.
- Krause, W., Seidel, G. & Heinrich, F. (2003a). Entropy reduction in mathematical giftedness. A new measurement for mental performance. In U. Lindemann (ed.) (2003). *Human behavior in design*. Springer-Verlag. Berlin, 63 – 71.
- Krause, W. & Seidel, G. (2004). Biologische Grundlagen des Verstandes. In : Krause, B. & Krause, W. (Hrsg.): *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften*. Festschrift für Friedhart Klix zum 75. Geburtstag. Trafo-Verlag, Berlin.
- Krause, W., Seidel, G. und Heinrich, F. (2006). Auf der Suche nach neuen Maßen geistiger Prozesse und Leistungen: Verfügbarkeit, Multimodalität und Entropiereduktion. In Witruk, E. und Lander, H.-J. (Hrsg.) Festschrift zum 75. Geburtstag für Hans-Jürgen Lander. (im Druck).
- Lander, H.-J. (1967). Strukturanalyse von Denkprozessen als Mittel der Intelligenzdiagnostik. In F. Klix, W. Gutjahr und J. Mehl (Hrsg.). *Intelligenzdiagnostik*. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 245 – 271.
- Lander, H.-J. (1968). Strukturbildungsprozesse über Gedächtniseinheiten bei serialem Lernen. In F. Klix (Hrsg.). *Kybernetische Analysen geistiger Prozesse*. Deutscher Verlag der Wissenschaften. Berlin, 197 – 215.
- Lautsch, E. & von Weber, S. (1995). *Methoden und Anwendungen der Konfigurationsfrequenzanalyse (KFA)*. Weinheim: Belz.
- Lee, K-M. (2000). Cortical Areas Differentially Involved in Multiplication and Subtraction: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study and Correlation with a Case of Selective Acalculia. *Annals of Neurology*, 48, 4 657 – 661.
- Lehmann, D., Ozaki, H., & Pal, I. (1987). EEG alpha map series: brain micro-states by space-oriented adaptive segmentation. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 67, 271-288.
- Luce, R.D. (1959). *Individual choice behavior*. New York:
- Luce, R.D. (1965). Preference, utility and subjective probability. In R.D. Luce, R.R. Bush, & E. Galanter (Eds.), *Handbook of mathematical psychology*. New York: Wiley.
- Mirtschink, P. (1983). Schlußprozesse und Gedächtnisstrukturen bei Schizophrenen, Alkoholikern und Gesunden. (Ein Beitrag zur differentiellen Parameteridentifikation in der experimentellen Psychopathologie). Dissertation, Institut für Psychologie der Humboldt-Universität Berlin.
- Oerter, R. (2003). Biological and psychological correlates of exceptional performance in development. *Annals of the New York Academy of Sciences*; vol:999; p. 451-60.
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*, 76, 241-263.

- Pesenti, M., Zago, L., Crivello, F., Mellet, E., Samson, D., Duroux, B., Seron, X., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Mental calculation in a prodigy is sustained by right prefrontal and medial temporal areas. *Nature neuroscience*, 4,1,103-107.
- Petzold, P. & Edeler, B. (1999). Discrete Clusters of processing time in a verbal item-recognition task. In: *Proceedings of the Fifteenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics, Tempe*. pp. 25-30.
- Schack, B. (1997). Adaptive Verfahren zur Spektralanalyse Instationärer Mehrdimensionaler Biologischer Signale. *Habilitationsschrift, Technische Universität Ilmenau*.
- Schack, B. (1999). Dynamic Topographic Spectral Analysis of Cognitive Processes. In Ch. Uhl (Ed.), *Analysis of Neurophysiological Brain Functioning*. Berlin, Heidelberg, New York:
- Schack, B., & Krause, W. (1995). Dynamic power and coherence analysis of ultra short-term cognitive processes - a methodical study. *Brain Topogr.*, 8, 127-136.
- Schack, B., Grieszbach, G., & Krause, W. (1999). The sensitivity of instantaneous coherence for considering elementary comparison processing. Part I: the relationship between mental activities and instantaneous EEG coherence. *Int.J.Psychophysiol.*, 31, 219-240.
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Staiger, J.F. und Steinmetz, H. (1995). Increased Corpus Callosum Size in Musicians. *Neuropsychologia*, 33, 8, 1047-1055.
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y. und Steinmetz, H. (1995a). In Vivo Evidence of Structural Brain Asymmetry in Musicians. *Science*, 267, 699-701.
- Schwartz, S. (1982). Is there a schizophenic language? *The Behavioral and Brain Science*. 5, 579-626.
- Seidel, G. (2001). Ordnungsbildung und Doppelrepräsentation im Denken mathematisch Hochbegabter. Sequentielle und topographische Eigenschaften von Mikrozuständen. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Seidel, G. (2003): *Ordnung und Multimodalität im Denken mathematisch Hochbegabter: sequentielle und topologische Eigenschaften kognitiver Mikrozustände*. Lengerich: Pabst (im Druck).
- Shapiro, B., K., Palmer, F., B., Antell, S., E., Bilker, S., Ross, A. & Capute, A., J. (1989). Giftedness. Can it be Predicted in Infance ? *Clinical Pediatrics (Phila.)*. 28, 5, 205-209.
- Sommerfeld, E. (2001). *Comparison Processes in Memory: Performance Indicators and Synchronous Brain Activity*. In: Sommerfeld, E., Kompass, R. & Lachmann, T. (2001). Fechner Day 2001. Proceedings of the Seventeenth Annual Meeting of the International Society of Psychophysics. Lengerich: Papst Science Publishers. 81-86.
- Spies, K. (1991). Eine neuartige Entwicklungsmethodik zur Förderung der Kreativität in den Ingenieurwissenschaften. Forschungsbericht, Institut für Bergbaukunde II der RWTH Aachen.
- Spies, K. (1993). Die Bedeutung der Kreativität in den Ingenieurwissenschaften und ihre systematische Förderung durch methodisches Erfinden. Politechnika Slaska, Gliwice.
- Spies, K. (1995). Gezieltes Entwickeln und technisches Gestalten mit der marktorientierten Innovationsstrategie. *Glückauf*, 131, 648-652.
- Spies, K. (1996). *Ein methodischer Weg zu innovativen Technologien*. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung.
- van der Meer, E. (1987). Mental representation of events. In E. van der Meer & J. Hoffmann (Eds.), *Knowledge Aided Information Processing*. Amsterdam: North-Holland.
- Winner, E. (2000). The Origins and Ends of Giftedness. *American Psychologist*, January, 159-169.
- Zago, L., Pesenti, M., Mellet, E., Crivello, F., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Neural Correlates of Simple and Complex Mental Calculation. *NeuroImage*, 13, 314-327.
- Zimmermann, B. (2003). Mathematisches Problemlösen und Heuristik in einem Schulbuch. *MU – Der Mathematikunterricht*, 1, 42 – 57.

Anschrift d. Verf.: Werner Krause, Prof. Dr. Anna-Siemsen-Str. 40, D-07745 Jena