
Werner Krause

Elementaranalyse von Gedächtnis- und Denkprozessen *

Ein neuer Weg zur Messung geistiger Leistungen

Zusammenfassung: Die unbefriedigende Situation der Diagnostik geistiger Leistungen verlangt neue Ansätze. Eine geschlossene Theorie über Denken existiert derzeit nicht. Aus einer Menge von Basiskomponenten zur anforderungsunabhängigen Messung von Denk- und Gedächtnisleistungen wird die Komplexitätsreduktion ausgewählt und erörtert: Denken wird als mentale Ordnungsbildung aufgefasst. Ordnungsbildung ist über den Entropieabbau nach Boltzmann und Prigogine definierbar, jedoch denkpsychologisch so nicht messbar. Messbar wird Ordnungsbildung über den Entropieabbau nach Shannon. Mikrozustände als zeitlich stabile EEG-Kohärenz-Topographien mit ihren sequentiellen, topographischen und zeitlichen Eigenschaften bilden die Grundlage der Messung. Mathematisch Hochbegabte zeigen nicht nur rechtehemisphärisch eine höhere Aktivität, sie weisen auch einen höheren Entropieabbau auf als Normalbegabte.

1. Können Testergebnisse geistige Leistungen vorhersagen?

1.1 Fehldiagnosen bei der Messung geistiger Leistungen

Es erscheint vernünftig zu erwarten, dass eine Person mit einem hohen Intelligenzquotienten auch schwierige Probleme in Alltagssituationen sehr gut löst.

Schaub (1988) prüfte den korrelativen Zusammenhang zwischen komplexer Problemlöseleistung und Intelligenztestergebnissen und fand Korrelationen zwischen $-0,60$ und $+0,40$. In den meisten Fällen betrug die Korrelation Null.

* Vortrag in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 17.2.2000.

Rösler, Biele und Lange (1988) haben die Frage nach den Ursachen und Bedingungen für das Zurückbleiben einzelner Schüler gestellt. Unter Kindern, die dem Arzt oder Psychologen vorgestellt wurden, fanden sich häufig solche, bei denen Schul- und Intelligenzleistung nicht übereinstimmten. Am häufigsten waren das Schüler, die trotz normaler Intelligenz versagten, bisweilen aber auch andere, die trotz unternormaler Intelligenz zwar noch mitkamen, doch gesundheitlich bzw. im Verhalten dekompenzierten.

Die Diskrepanz zwischen Schul- und Intelligenzleistung wurde zum Ausgangspunkt von Interventionsmaßnahmen genommen. Mit einem solchen Maß wurden 1988 in Rostock 178 Kinder untersucht. Davon zeigt etwa ein Drittel der Kinder eine Übereinstimmung zwischen Schul- und Intelligenzleistung, ein zweites Drittel eine positive, ein drittes Drittel eine negative Diskrepanz. Für zwei Drittel der untersuchten Schüler fanden die Autoren also Abweichungen zwischen Schul- und Intelligenzleistungen. Für sie müssten streng genommen Therapiemaßnahmen eingeleitet werden. Es ergibt sich die Frage, ob diese Maße wirklich adäquat sind.

Das Fazit solcher Befunde lautet: Intelligenz muss spezifischer definiert werden. Insbesondere wird die Anforderungsinvarianz verlangt, die offenbar bei den oben angegebenen Beispielen nicht gegeben ist. Neben der Anforderungsinvarianz muss eine solche Messgröße eine hohe Sensibilität hinsichtlich individueller geistiger Leistungen aufweisen, um deren Förderung zu ermöglichen. Je unmittelbarer eine Messgröße am Prozess angreift, umso größer müsste ihre Validität sein.

1.2 Früherkennung von Hochbegabung

Psychologen haben sich schon immer für Menschen interessiert, die von der Norm abweichen. Ein besonderes Interesse gilt den Hochbegabten. So berichtete Winner (1998) von einem neunjährigen Jungen, der im Konzertsaal – das Orchester spielte Mozart – die Orchesterpartitur auf dem Schoß hatte und mitlas und mitsumte. Der Junge hatte bereits einen musiktheoretischen Preis gewonnen, um den Erwachsene sich sonst bewerben. Über ähnliche Leistungen wird von Kindern berichtet, die für das Malen besonders begabt sind. Bredenkamp (1988, 1992) untersuchte den Rechenkünstler Gert Mittring, der in der Lage war, in 42 s die 137. Wurzel aus einer 1000-stelligen Zahl zu ziehen. Pesenti u.a. (2001) beschrieben die mathematischen Fähigkeiten eines

„Wunderkindes“: Der 20-jährige Rüdiger Gamm hat, nachdem seine besonderen mathematischen Fähigkeiten festgestellt wurden, sechs Jahre lang täglich 1 bis 4 Stunden geübt. Danach war er in der Lage, komplizierte mathematische Aufgaben im Kopf exakt zu lösen, wie z. B. $99^5 = 9\ 509\ 900\ 499$ oder die Division von Primzahlen wie $31/61$ auf 19 Dezimalstellen genau. Für die Aufgabe 73^2 benötigte er 709 ms, für die Berechnung 68×76 brauchte er 4000 ms. Nicht-Experten benötigen für die erste Aufgabe 1000 ms, für die zweite Aufgabe 20 000 ms.

Es besteht kein Zweifel: Der Früherkennung und Förderung von Begabung muss sich auch die psychologische Grundlagenforschung stellen.

Es gibt in der Literatur unterschiedliche Ansätze, den Problemkomplex Intelligenz kritisch zu betrachten, so z. B. die experimentalpsychologische Analyse und kritische Überprüfung von Testverfahren, wie sie Sternberg (1999) durchführt, die Einführung verschiedener Intelligenzen verbunden mit dem Abschied vom IQ, wie dies z. B. Gardner (1999) fordert, die Einführung eines Generalfaktors der Intelligenz (Gottfredson, 1999), das Suchen nach Komponenten mittels Faktorenanalyse (Grabowski, 1999) oder die Analyse mit neurowissenschaftlichen Methoden (Jäncke u.a. 1997, Amunts, u.a., 1997, Schlaug, u.a., 1995a, 1995b, Pesenti u.a., 2001).

Wir verfolgen hier einen elementaren Ansatz, dessen Grundvorstellung den Naturwissenschaften entlehnt ist und der mit experimentalpsychologischen und neurowissenschaftlichen Methoden geprüft werden soll.

2. Elementarprozesse beim Denken

Eine Theorie über menschliche Denkleistungen ist derzeit nicht in Sicht. Es ist jedoch möglich, Basiskomponenten anzugeben, die menschliches Denken maßgeblich bestimmen. Basiskomponenten sind durch ihre Invarianz gegenüber Anforderungstransformation definiert. Friedhart Klix (1992) hat in seinem Buch „Die Natur des Verstandes“ solche Basiskomponenten angegeben, wobei das Postulat der Vollständigkeit vorerst nicht erfüllt werden kann.

2.1 Basiskomponenten des Denkens

Wesentliche Basiskomponenten des Denken nach Klix (1992) sind:

- Analogiebildung,

- multimodale Repräsentation, speziell Doppelrepräsentation,
- multiple Klassenbildung,
- Komplexitätsreduktion.

Analogiebildung ist im Rahmen des kreativen Denkens anzutreffen. Wie Friedhart Klix in seinem Buch schreibt, soll Maxwell seine 4 Gleichungen (ursprünglich 8 Gleichungen), die die gesamte Elektrodynamik beschreiben, dadurch gefunden haben, dass er Analogien zwischen dem Ein- und Austritt von Flüssigkeiten in verbundenen Röhren und Quelle und Senke in elektrischen Feldern hergestellt hat. Multimodale Repräsentation spielt vermutlich bei Hochbegabung eine Rolle. Der musisch Begabte hört und „sieht“ die Musik (Hendrickson, 1986, Klix, 1992). Bei musikalisch Hochbegabten (vgl. Jäncke u.a., 1997, Schlaug, u.a., 1995b) ist beim Musik hören das planum temporale, ein Teil des Sprachzentrums mit aktiv. Dies würde dafür sprechen, dass eine andere Modalität, eine begriffliche Repräsentation mitaktiviert wird. Das aktivierte kortikale Areal ist umso größer, je früher mit dem Training begonnen wurde.

Multiple Klassifikation haben wir bei unseren mathematisch Hochbegabten beobachtet. Beim Lösen der Aufgabe: „Bestimmen Sie die Anzahl der Diagonalen in einem 23-Eck!“ äußerte der Befragte, er habe versucht, das Problem verschiedenen Kategorien zuzuweisen: als Problem der darstellenden Geometrie, als Problem der Kombinatorik, usw.

Komplexitätsreduktion bedeutet Vereinfachung durch Klassenbildung über Merkmalen und Operationen bzw. durch Einsparung von Merkmalen und Operationen. Während die ersten drei Basiskomponenten eher beim kreativen Denken eine Rolle spielen, findet man Komplexitätsreduktion vorzugsweise beim rationalen Denken. Hier beziehe ich mich nur auf die 4. Basiskomponente: Komplexitätsreduktion, die wohl am besten untersucht, jedoch bisher nicht prozessbezogen neurowissenschaftlich nachgewiesen ist.

2.2 Die Basiskomponente Komplexitätsreduktion

Alltagssprachlich kann durch Denken Ordnung geschaffen werden (Aebli, 1980). Wir meinen damit den Abbau von Unordnung und die Festlegung von Alternativen durch Bevorzugung. Der Begriff der Ordnungsbildung ist in den Naturwissenschaften bereits vergeben. Prüfen wir, ob dieser Begriff auch zur Beschreibung menschlicher Denkleistungen nutzbar gemacht werden kann.

Der Begriff der Ordnung wird zumindest in zweierlei Weise gebraucht. Der Mathematiker versteht unter dem Begriff der Ordnung vor allem den Aspekt der (eindeutigen) Anordnung. Der Physiker betrachtet Ordnung im Gegensatz zur Unordnung (Eigen, 1975). Vom Standpunkt einer naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise in der Psychologie machen wir uns den Standpunkt des Physikers zu eigen und verweisen darauf, dass in der Physik die Bildung von Unordnung seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts nach Clausius und Boltzmann als

$$\frac{dS}{dt} \geq 0 \quad (1)$$

dargestellt wird. Dabei ist S die Entropie und t die Zeit. Die Entropie S als Maß für die Unordnung kann nach der klassischen Form des 2. Hauptsatzes nur größer werden. Wenn Ordnung als Gegensatz zu Unordnung aufgefasst wird, dann müsste für die Bildung von Ordnung gelten:

$$\frac{dS}{dt} < 0 \quad (2)$$

Dieser Ausdruck ist im Sinne der klassischen Fassung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik bekanntlich nicht zulässig. Damit wäre der Begriff der Ordnungsbildung nicht definiert. Mit der Erweiterung des 2. Hauptsatzes nach Prigogine (1979) auf offene Systeme gilt:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt} \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} 0 \quad (3)$$

dabei ist $\frac{dS_i}{dt}$ die im Inneren eines Systems betrachtete Entropieänderung und $\frac{dS_e}{dt}$ die mit der Umgebung ausgetauschte Entropieänderung. Die drei Fälle

in (3) enthalten auch den Fall der Ordnungsbildung.

Aus (2) und (3) folgt:

$$\frac{dS_i}{dt} < -\frac{dS_e}{dt} \quad (4)$$

Ordnung im Inneren eines Systems entsteht dann, wenn der Entropieexport größer ist als die Entropieerzeugung im Inneren eines Systems. Uns interes-

siert in diesem Zusammenhang weniger die Interpretation als vielmehr die Tatsache, dass der Begriff der Ordnungsbildung zulässig ist. Ordnung entsteht, wenn Entropie abgebaut wird (Prigogine, 1979, Ebeling und Feistel, 1982).

Kann man Ordnungsbildung vor dem Hintergrund einer solchen Definition messen?

In der kinetischen Gastheorie wird bekanntlich die Entropie S durch die berühmte Boltzmannsche Gleichung beschrieben:

$$S = k \cdot \ln W \quad (5)$$

Dabei ist k die Boltzmannkonstante und W die Anzahl von Komplexionen. Nach diesem Ausdruck ist die Entropie dem Logarithmus der Komplexionenanzahl W direkt proportional. Mit Gleichung (5) wird die Entropie klein, wenn die Anzahl der Komplexionen klein wird. Hinter der Komplexionenanzahl W steckt die Anzahl von Möglichkeiten, Elementen Klassen zuzuordnen. Um diese Idee zu erläutern, beziehen wir uns auf ein Beispiel, das Prigogine (1979) gegeben hat.

Wir betrachten einen Behälter, der durch eine Wand in zwei gleich große Abteile unterteilt ist. Die Abbildung 1 soll das veranschaulichen.

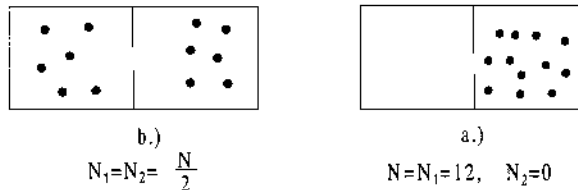


Abbildung 1

Skizze zur Veranschaulichung der Ordnungsbildung (nach Prigogine, 1979).

Die Abteile entsprechen Klassen. Die Punkte bezeichnen Elemente. Im Fall a) sind alle Elemente der Klasse 1 zugeordnet. Im Fall b) befindet sich die Hälfte der Elemente in Klasse 1, die andere Hälfte in Klasse 2. Zu fragen ist nach der Anzahl W von Möglichkeiten, die N Elemente auf die beiden Klassen mit je N_1 und N_2 Elementen aufzuteilen. Man kann sich leicht überlegen, dass es im Fall a.) nur eine Möglichkeit gibt, im Fall b.) dagegen mehrere. Die Anzahl von Möglichkeiten oder von Komplexionen lässt sich nach der Formel berechnen:

$$W = \frac{N!}{N_1! N_2!} \quad (6)$$

Für den Fall a.) soll gelten $N_1 = N = 12$ und $N_2 = 0$. Dann ist

$$W = \frac{12!}{12! \cdot 0!} = 1$$

und die Entropie S

$$S = k \cdot \ln W = k \cdot \ln 1 = 0$$

Im Fall a) gibt es also nur eine Möglichkeit, die 12 Elemente auf zwei Klassen zu verteilen. Mit anderen Worten: für den Fall, dass alle Elemente den beiden Klassen fest zugewiesen sind, gibt es eben nur eine Möglichkeit der Aufteilung der Elemente auf Klassen. Die Unordnung ist minimal, die Ordnung sehr groß.

Für den Fall, dass jedes Element jeder Klasse zugewiesen werden kann, d. h., dass der Fall b) vorliegt, ist die Anzahl der Komplexionen sehr viel größer als eins. Dabei wird die Anzahl der Möglichkeiten mit der Restriktion betrachtet, dass in jeder Klasse sechs Elemente sind.

$$W = \frac{12!}{6! \cdot 6!} \gg 1$$

Für die Entropie S gilt:

$$S = k \cdot \ln W \gg k$$

Je größer die Anzahl der Möglichkeiten ist, Elementen Klassen zuzuweisen, um so größer ist die Unordnung, die abgebaut werden muss. Ordnung wird durch feste Zuweisung von Elementen zu Klassen erreicht. Je kleiner die Anzahl von Möglichkeiten, um so größer die Ordnung. Die Anzahl von Möglichkeiten, Elementen Klassen zuzuordnen wird klein, wenn

- a) die Anzahl m gebildeter Klassen (im Vergleich zur Anzahl n der Elemente) klein ist *und*
- b) jedes Element zu genau einer Klasse gehört.

Für eine solche Reduktion von Mannigfaltigkeiten gilt dann:

$$\left\{ \left\{ G(v_j) \right\} \right\} < \left\{ v_j \right\} \quad (7)$$

Dabei ist $\{v_j, j=1, \dots, n\}$ eine Menge von Elementen v_j (z. B. Begriffe), die in m Klassen V_1, \dots, V_m (z. B. Oberbegriffe) kategorisiert sind.

Die $G\langle V_1 \rangle, \dots, G\langle V_m \rangle$ sind durch V_1, \dots, V_m in der Struktur G induzierte Substrukturen (z. B. Begriffsnetze). Die Mächtigkeit der Menge der Substrukturen ist im allgemeinen kleiner als die Mächtigkeit der Menge der Elemente. Nach diesen Überlegungen geht Ordnungsbildung mit Klassenbildung und der Zuordnung von Elementen zu Klassen einher. Dies gilt sowohl für Strukturen als auch Prozeduren. Damit wäre Ordnungsbildung messbar, wenn die Anzahl von zugeordneten Elementen zu unterscheidbaren Klassen im Sinne einer Kategorisierung über Strukturen und Prozeduren bestimmbar wäre. Neben dieser traditionellen Vorstellung der Komplexitätsreduktion durch Ordnungsbildung, d. h., als Zuweisung von Elementen zu Klassen ist für die Denkpsychologie eine weitere Interpretation der Ordnungsbildung interessant, die im Rahmen der Informationstheorie auf Shannon zurückgeht und die Verkettungen von Ereignissen betrachtet. Wenn sich ein Denkprozess als Folge von Ereignissen (wir werden später von intern repräsentierten Mikrozuständen sprechen) darstellen lässt, dann ist die Ordnungsbildung bzw. Entropiereduktion über einer solchen Ereignisfolge groß, wenn die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen den Ereignissen von einer Gleichverteilung deutlich abweichen. Die Entropie H nach Shannon ist bekanntlich

$$H = - \sum_{j=1}^N P(j) \cdot \text{ld}(P(j)) \quad (8)$$

mit $P(j)$ als Auftrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses j , N der Anzahl von Ereignissen und ld der Logarithmus dualis. Die Verkettung von Ereignissen bildet sich in der bedingten Übergangswahrscheinlichkeit ab. Dabei ist $P(j/i)$ die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses j unter der Bedingung, dass das Ereignis i als Vorgänger aufgetreten ist. Für die bedingte Entropie $H(i)$ gilt dann

$$H(i) = - \sum_{j=1}^N P(j/i) \cdot \text{ld}(P(j/i)) \quad (9)$$

Der Grad der Verkettung lässt sich durch die Entropiereduktion H_{red} ausdrücken:

$$H_{\text{red}} = H - \sum_{i=1}^N P(i) \cdot H(i) \quad (10)$$

Somit kann Reduktion von Komplexität als Klassenbildung über Elementen oder als Verkettung von Ereignissen bzw. Elementen aufgefasst werden. Wenn Denkleistungen darüber gemessen werden sollen, dann müssen diese Eigenschaften im Denkprozess nachgewiesen werden.

2.3 Komplexitätsreduktion durch Klassenbildung und Verkettung

Um zu zeigen, dass Klassenbildung und Verkettung den menschlichen Informationsverarbeitungsprozess in irgend einer Form beeinflussen, müssen wir noch einen Schritt weitergehen: Im allgemeinen gibt es mehrere Möglichkeiten, Klassen zu bilden. Die beste (einfachste) Klassifikation muss ausgewählt werden. Denkleistungen bilden sich demnach nicht nur in Klassenbildung (bzw. Verkettung) ab, sondern wir verlangen auch noch eine Bewertung über Klassenbildungen (bzw. Verkettungen).

Dieser Gedanke ist keineswegs neu sondern nahezu zwingend, wenn Intelligenzmessung vor dem Hintergrund kognitiver Prozesse betrachtet werden soll. Befassen wir uns mit Fragen der Intelligenzmessung, wie sie von Klix (1992) behandelt worden sind:

„Von zwei Personen X und Y ist diejenige als intelligenter einzuschätzen, die mit geringerem kognitiven Aufwand vergleichbar schwierige Lösungen findet und die – Verdichtungs- und Verkürzungsprozesse ausnutzend – dabei auch früher zur Lösung gelangt. Eben diese effizienter denkende Person X kann nämlich (das gleiche Prinzip weitergedacht) mit dem Aufwand von Person Y Probleme größerer Schwierigkeit bewältigen. Und dies macht den Unterschied von Intelligenzgraden aus. Im Hintergrund stehen dabei Unterschiede in der Mächtigkeit kognitiver Informationsverarbeitungsprozesse sowie der Flexibilität, neues Wissen zu generieren.“

Zwei Aspekte sind mir in diesem Zusammenhang wichtig.

Zum einen wird – entgegen eines sonst üblichen Intelligenzmaßes als Anzahl der gelösten Aufgaben pro Zeiteinheit – hier der relative Charakter der Definition betont.

Bereits Leibniz hat sich dieser Methode des Definierens bedient, als er 1675 die Unendlichkeit definierte: Zwei Größen a und b sind gleich, wenn ihr Unterschied unendlich klein ist. Diese Methode aus den formalen exakten Wissenschaften erweist sich auch in den empirischen Wissenschaften als nützlich. Für die Intelligenzmessung könnte dann im übertragenen Sinn de-

finiert werden: Zwei Personen X und Y haben die gleiche Intelligenz, wenn der Unterschied ihrer kognitiven Aufwände beim Lösen ein und desselben Problems unendlich klein ist.

Zum zweiten wird mit dieser von Klix gegebenen Definition deutlich, dass die Bewertung von Klassenbildung über den kognitiven Aufwand erfolgt.

Wenn sich diese auf den kognitiven Elementarprozess beim Denken abzielende Definition als adäquater erweisen soll, dann müssen zwei Dinge hinsichtlich der Anforderungsinvarianz und Personenspezifität nachgewiesen werden:

- Klassenbildung und
- Bewertung der Klassenbildung

Das entsprechende muss für die Verkettungen gelten.

Zum Nachweis solcher Elementareigenschaften im Denken bedarf es sensibler Methoden. Die Psychophysik hat dazu schon sehr früh das Konzept bereitgestellt: Mit Gustav Theodor Fechner (1860) unterscheiden wir eine äußere und eine innere Psychophysik (kognitiver Prozess). Eine mehr als zweitausend Jahre alte Unterscheidung zwischen einem „innen“ und einem „außen“, zwischen Erleben und Verhalten, zwischen Begriff und Wort, zwischen Handlung und kognitiver Strukturtransformation war für das Nachdenken über Denken schon immer von großer Bedeutung. Die traditionelle Psychophysik ermöglicht uns Aussagen über das „außen“ und erlaubt Schlussfolgerungen über das „innen“. Die Neurowissenschaften ermöglichen uns auch eine Messung über das „innen“.

3. Komplexitätsreduktion durch feste Zuordnung von Elementen zu Klassen

Komplexitätsreduktion bei Gedächtnis- und Denkleistungen soll mit psychophysikalischen und neurowissenschaftlichen Methoden betrachtet werden (Krause und Sommerfeld, 2000). Wir gehen dabei wie folgt vor: Für den Nachweis der Komplexitätsreduktion durch bewertete Klassenbildung beim Behalten und Denken kommen psychophysikalische und neurowissenschaftliche Methoden zum Einsatz. Für den Nachweis der Komplexitätsreduktion durch Verkettung, wie sie im Abschnitt 4 behandelt werden, stehen nur neurowissenschaftliche Methoden zur Verfügung.

Beginnen wir mit der Komplexitätsreduktion durch Klassenbildung bei Gedächtnisleistungen.

3.1 Komplexitätsreduktion bei Gedächtnisleistungen

Ergebnisse über die Bildung kognitiver Ordnungen im Gedächtnis beim elementaren Problemlösen haben Pliske und Smith (1979) vorgelegt. Sie konnten zeigen, dass beim Lösen von Ordnungsproblemen im Gedächtnis Klassen gebildet werden, die den Lösungsprozess erleichtern. Die Autoren verwendeten ein zwölfgliedriges Ordnungsproblem mit sechs männlichen und sechs weiblichen Vornamen gleicher Buchstabenanzahl, geordnet nach der Intelligenz. Variiert wird die Ordnung. In Gruppe a) war die Reihenfolge der Terme zufällig (nicht mehr als drei Namen des gleichen Geschlechts wurden zusammen gruppiert). In Gruppe b) erfolgte die Ordnung nach dem Geschlecht so, dass alle sechs Frauen klüger waren als alle sechs Männer oder umgekehrt. Das Zeichen „>>“ steht für klüger als.

Gruppe a: Jens > Antje > Susanne > Jörg > Gritt >

Gruppe b: Antje > Susanne > Gritt >> Jens > Jörg >

In der Lernphase wurden die Wortlisten eingelesen. Wie beim Lösen von Ordnungsproblemen üblich, wurden dabei jeweils nur die benachbarten Namen dargeboten, d. h. jeweils nur paarweise relationale Aussagen werden eingelesen. In der Testphase werden Paare beliebiger Namen geboten und die Vpn sollen so schnell wie möglich (und möglichst fehlerfrei) denjenigen Knopf drücken, der sich unter dem Namen der intelligenteren Person befindet. Registriert wurde die Entscheidungszeit. Die Fehleranzahl ist im allgemeinen gering. Das Ergebnis ist in Abbildung 2 dargestellt. Zur Beurteilung der Wirkung kategorialer Ordnungen beim Lösen von Ordnungsproblemen wird der aus der Psychophysik bekannte Symbol-Distanz-Effekt genutzt. Dieser Effekt beschreibt die Verkürzung der Entscheidungszeit mit wachsender ordinaler Positionsdifferenz. Es ist ganz offensichtlich: je größer der Längenunterschied zwischen zwei Stäben, um so schneller erfolgt das Urteil (Johnson, 1939). Dieser Effekt ist nichtlinear, wie Welford (1960) gezeigt hat. Er ist auch dann noch nachweisbar, wenn anstelle der physikalischen Objekte deren Bezeichnungen, die Symbole verwendet werden (Moyer, 1973, Moyer und Bayer, 1976).

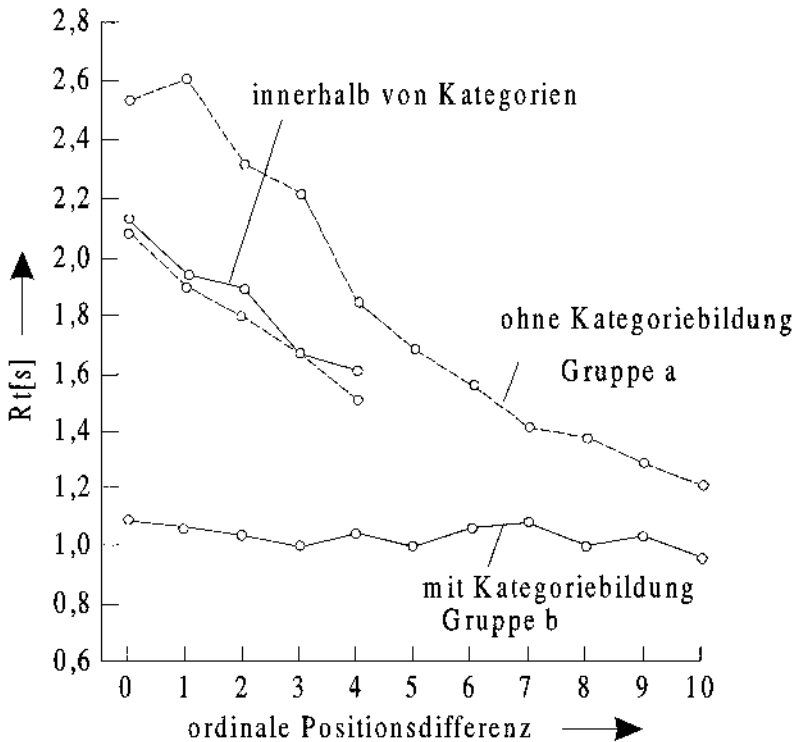


Abbildung 2

Entscheidungszeiten (s) beim Lösen von Ordnungsproblemen nach Pliske und Smith (1979). Auf der Abszisse ist die ordinale Positionsdifferenz, die zwischen den Namen besteht, aufgetragen. Für benachbarte Paare ist die ordinale Positionsdifferenz null.

Der Abfall der Entscheidungszeit mit Zunahme der ordinalen Positionsdifferenz der Gruppe a) in Abbildung 2 ist Ausdruck der Wirkung des Symbol-Distanz-Effekts, der im Entscheidungsverhalten der Gruppe b) (bei Zwischenkategoriefragen) nicht mehr nachweisbar ist. Die Vpn der Gruppe b) nutzen offenbar die kategoriale Information zur Entscheidung. Aus Plausi-

bilitätsgründen ist das auch nachvollziehbar. Die angebotene Aussagenmenge erlaubt die Ableitung kategorialer Information: alle Mädchen sind klüger als alle Jungen. Dies kann zur Entscheidungsfindung genutzt werden. Für einen Vergleich „Ist Susanne klüger als Jörg?“ genügt die Zuordnung der Namen zu den Kategorien. Susanne ist ein Mädchen, Jörg ein Junge. Da alle Mädchen klüger als alle Jungen sind, ist die Frage damit entschieden. Es ist nicht erforderlich, zur Beantwortung der Frage die Position der Namen auf einer (intern repräsentierten) Skala zu kennen. Wir interpretieren den Befund so, dass die Wirkung kategorialer Ordnung der der linearen Ordnung überlagert wird. Die kategoriale Information wird bei der Anforderungsbewältigung mit ausgenutzt und bestimmt im wesentlichen den Vergleichsprozess. Wie erwartet können die Autoren auch zeigen, dass innerhalb der Kategorien der Symbol-Distanz-Effekt für die Gruppe b) erhalten bleibt.

Solcherart Erklärungsversuche über die Wirksamkeit von Klassenbildung gehen natürlich vom klassischen Konzept der äußeren Psychophysik aus. Zwischen einer Bedingungsvariation und einer Verhaltenskomponente wird ein funktionaler Zusammenhang gestiftet. Mittels neurowissenschaftlicher Methoden eröffnen sich neue Möglichkeiten, funktionale Zusammenhänge auch im Sinne der inneren Psychophysik aufzudecken. Diesem methodischen Problem beim Nachweis der Kategorisierung ist der 4. Abschnitt gewidmet. Befassen wir uns jedoch zunächst mit der Bewertung der Klassenbildung. Mit dieser Überlegung wird unterstellt, dass im Denkprozess mehrere kategoriale Ordnungen ausgebildet werden und die (bezüglich einer Bewertung) einfachste kategoriale Ordnung zur Anforderungsbewältigung genutzt wird.

3.2 Komplexitätsreduktion beim Denken

Invarianzeigenschaften beim Denken hat Kotkamp (1999) untersucht. Er zeigt die Anforderungsinvarianz für die Aufwandsreduktion, das Informationsverhalten und die strukturelle Flexibilität in Denkprozessen. Wir wollen hier demonstrieren, dass aufwandsreduzierende Klassenbildung als eine anforderungsunabhängige Größe zur Messung geistiger Leistungen genutzt werden kann. Versuchspersonen müssen Ordnungsprobleme lösen (Sommerfeld, 1994; Kotkamp, 1999; Krause, 2000), wie sie im Prinzip im vorigen Abschnitt beschrieben worden sind. Der Unterschied besteht aber darin, dass die Relationen zwischen den Elementen artifiziell sind und so nicht im Gedächtnis ge-

speichert sein sollen (z. B. ein bis zur Hälfte schwarz ausgefülltes großes Rechteck steht links neben einem kleinen Quadrat, das bis zu 75 % schwarz ausgefüllt ist.). Die Abbildung 3 zeigt die vollständige Menge der dargebotenen paarweise relationalen Aussagen.

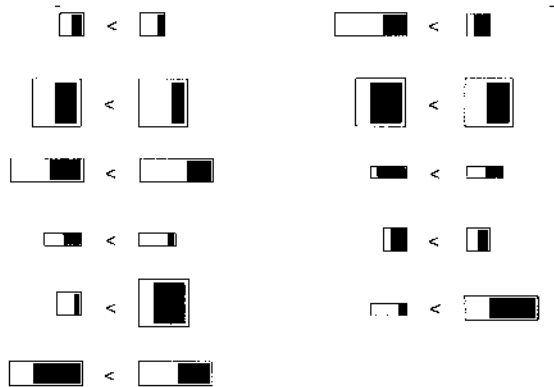


Abbildung 3

Beispiel für die dargebotene Information in der Lernphase. Die Musterpaare werden einzeln gezeigt. Die Relation „<“ bedeutet „steht links von“.

Diese Menge von Aussagen läßt sich unterschiedlich kategorial ordnen, abhängig von den gewählten Merkmalen der Muster. Wir interessieren uns dafür, welche kategorialen Ordnungen ausgebildet werden und ob jene Versuchspersonen, die die einfachste (z. B. durch eine geringste Anzahl zu behaltender Merkmale ausgezeichnet) kategoriale Ordnung ausbilden, auch bei der Bewältigung komplexerer Probleme beste Leistungen zeigen.

Aus den Entscheidungszeiten beim Beantworten von Fragen über die Beziehung zwischen nicht dargebotenen Paaren wurde nach einem differenzierteren Auswertverfahren auf die intern ausgebildeten kategorialen Ordnungen für jede einzelne Struktur geschlossen. Eine Verallgemeinerung des Verfahrens findet sich in Hesse (2000).

Vor dem Hintergrund der Messung des kognitiven Aufwandes können die verschiedenen kategorialen Ordnungen nach der Merkmalsanzahl geordnet

werden, die zu ihrer Beschreibung notwendig sind und von daher behalten werden müssen. Bewertete Komplexitätsreduktion bedeutet hier Zuweisung von Elementen zu so gebildeten Klassen, für deren Behalten eine kleinste Merkmalsanzahl erforderlich ist. Die Abbildung 4 zeigt die Bezugsetzung zwischen der so ausgebildeten kategorialen Ordnung und den Prüfungsnoten in mathematischen Fächern bzw. den Noten für die Bewertung eines großen Belegs in der Konstruktion für jede einzelne Versuchsperson (Punkte).

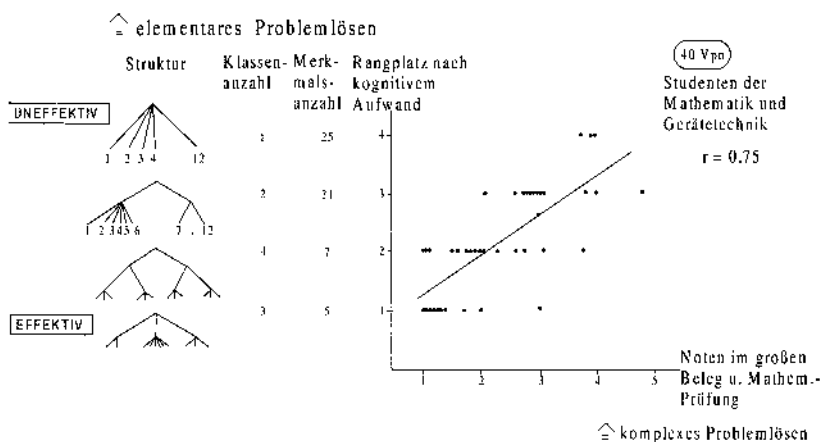


Abbildung 4

Korrelativer Zusammenhang zwischen der Reduktion kognitiver Komplexität beim Lösen eines Ordnungsproblems mit unbekannter Information und der Güte der komplexen Problemlöseleistung für jede Versuchsperson. Die einfachste Struktur ist diejenige mit der kleinsten notwendigen Anzahl zu behaltender Merkmale. Wir bezeichnen sie als effektiv. Die „Güte der komplexen Problemlöseleistung“ wird durch Zensuren für den Entwurf eines Justierisches (für die Konstrukteurstudenten) und durch Noten in mathematischen Prüfungsfächern (für die Mathematikstudenten) ausgedrückt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Versuchspersonen mit guten Noten in den genannten Fächern auch eine Komplexitätsreduktion bei elementaren Denkprozessen durchführen. Nun ließe sich bei Kenntnis der Anzahl möglicher kategorialer Ordnungen, die eine Versuchsperson ausgebildet hat, die

Entropie nach Boltzmann (Gleichung 5) berechnen und als eine andere Möglichkeit für die geforderte Bewertung über Klassenbildung einführen. Aus mehreren Gründen ist dies jedoch unbefriedigend. Zum ersten verlangt dieser Ansatz die Kenntnis der Verteilung der Elemente auf die gebildeten Klassen. Diese Forderung ist experimentell selten zu erfüllen. Damit erlaubt der Ansatz im allgemeinen keine direkte Messung der Ordnungsbildung. Zum zweiten verlangt der Ansatz für alle Fallberechnungen die gleiche Interpretation der Elemente. Ein „Perspektivwechsel“, wie er im Denkprozess beobachtet und im obigen Beispiel beim Übergang von 4 zu 3 Klassen deutlich wird, wird nicht erfasst. Zum dritten ist der Prozess der Zuweisung von Elementen zu Klassen nur ein Aspekt im Denkprozess, mit dem z.B. die Auswahl von Strategien in die Klassen der Lösungsstrategien bzw. Nichtlösungsstrategien gut beschrieben werden kann. Kodierung von Information, Erzeugung von Alternativstrategien und Antworterzeugung sind z.B. weitere Aspekte, die bei der Messung von Denkleistungen mit berücksichtigt werden. Wie kann das geschehen?

Im Rahmen der nichtlinearen EEG-Analyse gibt es Ansätze, den Entropiebegriff zu nutzen und die Entropie direkt zu messen (Jausovec, 1998), jedoch wird dabei auf einen Bezug zu einem Prozessmodell verzichtet. Wir schlagen einen anderen Weg vor.

4. Komplexitätsreduktion durch Erhöhung sequentieller Abhängigkeiten von Verkettungen

Neben der Komplexitätsreduktion durch Klassenbildung gibt es bekanntlich weitere Möglichkeiten, wie eingangs dargestellt. Eine davon ist Komplexitätsreduktion durch Verkettung. Neurowissenschaftliche Methoden eröffnen neue Möglichkeiten, diesen Gedanken der Komplexitätsreduktion durch Verkettung im Hinblick auf seine Nützlichkeit zur Messung geistiger Leistungen zu prüfen.

Messbar wird Ordnungsbildung im Denken mit der Einführung von Mikrozuständen (Lehmann, 1987), die aber erst durch die adaptive EEG-Kohärenzanalyse (Schack u.a., 1999, Griebbach, 1990, Griebbach u.a., 1993) an Relevanz für die Denkpsychologie gewonnen haben. Eine zeitlich stabile EEG-Kohärenz-Topographie bezeichnen wir als einen Mikrozustand (mit

einer Dauer in der Größenordnung von Millisekunden. vgl. Abb.10). Denken kann so als Sequenz von Mikrozuständen abgebildet werden und ist als Markoffkette behandelbar. Vor diesem Hintergrund wird Entropieabbau als Differenz zwischen der Shannon-Entropie und der bedingten Entropie (Gleichung 10) messbar, wenn die Übergangswahrscheinlichkeiten der Mikrozustände gemessen werden können. Bekanntlich wird mit der bedingten Entropie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Mikrozustandes in Abhängigkeit von seinem Vorgänger erfasst. Die Beschränkung auf eine Abhängigkeit erster Ordnung erfolgt vorerst aus Aufwandsgründen. Je stärker die Übergangswahrscheinlichkeiten der Mikrozustände von einem Zufallsprozess abweichen, umso größer ist der gemessene Entropieabbau H_{red} . Hinter einer solchen Überlegung zur Messung des Entropieabbaues steckt die bisher noch nicht bewiesene Annahme, dass sich kognitive Operationen in Mikrozuständen abbilden und dass sich anforderungsspezifische Zeitbezüge kognitiver Operationen (z. B. Reaktionszeit für Kategorisierung oder Entscheidungszeit bei Strategieauswahl) in den Sequenzen von Mikrozuständen niederschlagen.

Dennoch: Die Messung der Komplexitätsreduktion vor dem Hintergrund der Shannon-Entropie bleibt unbefriedigend, wenn die Ereignisse der Markoffkette, d.h., die Mikrozustände nicht interpretiert werden können. Näherungsweise ist dies unter Ausnutzung von Analogiebeziehungen zwischen Prozessen im Rahmen der äußeren und der inneren Psychophysik möglich. Für große Zeitunterschiede zwischen Anforderungen auf der externen Ebene werden analog große Zeitunterschiede zwischen Prozessen auf der internen Ebene gesucht. So ausgezeichnete Mikrozustände sollten dann eine Topographie aufweisen, die der hypothetisch angenommenen Ursache für die Zeitdifferenz auf der externen Ebene nicht widerspricht. Der Schluss von externen Zeitverhältnissen auf interne Zeitverhältnisse erlaubt eine Interpretation ausgewählter Mikrozustände, sodass zumindest Plausibilitäten nicht verletzt werden. Dies soll im einzelnen gezeigt werden.

Behaltens- und Denkanforderungen wurden untersucht. Das EEG wurde mit 19 Elektroden registriert (10/20 System, verbundene Ohrelektroden als Referenz 256 Hz Abtastfrequenz). Eine fortlaufende EEG-Kohärenzanalyse (Schack u.a., 1999) wurde für 30 Elektrodenpaare durchgeführt. Der 30-dimensionale Vektor des Zeitverlaufes der Bandkohärenz (13–18 Hz) wurde für jede einzelne Anforderung in Segmente mit stabilen Kohärenzwerten un-

terteilt. Mit dieser Segmentierung erhält man für jedes Segment eine Segment-Beginnzeit und eine Segmentdauer. Diese zweidimensionale Verteilung charakterisiert den oben angesprochenen internen Zeitprozess für eine bestimmte Anforderung. Auf dieser Grundlage lassen sich Rangordnungen über Mikrozuständen bestimmen. Im Anschluss an die Segmentierung erfolgte eine Clusterung der Segmente in sechs Cluster. Die Anzahl wurde durch Anpassung bei anderen Anforderungen bestimmt. Die entsprechenden Cluster-maps (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 9) repräsentieren als individuelles Alphabet die Mikrozustände synchroner Oszillationsaktivität (Krause u.a., 2000). Sie stellen die Zustände der Markoffkette dar. Aus der Sequenz der Mikrozustände können die Auftritts- und Übergangswahrscheinlichkeiten bestimmt werden, die eine Rangordnung der Mikrozustände und damit eine Interpretation erlauben. Sie bilden die Grundlage für die Bestimmung des Entropieabbaues.

4.1 Entropieabbau als Messgröße der Komplexitätsreduktion zur Unterscheidung zwischen Anforderungen

Behalten: Wenn Klassen durch ihre Klassenbegriffe im Gedächtnis repräsentiert sind, dann sollte bei der Klassifizierung von Elementen das sensorische Sprachzentrum (links centroparietal, links centrofrontal) aktiv sein. Das sensorische Sprachzentrum müsste seine Aktivaktion gerade zu dem Zeitpunkt ausweisen, zu dem mit der Zuweisung von Elementen zu Klassen der Aufruf des Klassenbegriffs erfolgt. Der gesamte Prozess von der Informationsaufnahme bis zur Entscheidung wird durch die Exekutive bzw. das Arbeitsgedächtnis (frontozentral) gesteuert. Es muss also darüber hinaus erwartet werden, dass die Beginnzeit für den Mikrozustand der Executive zeitlich vor dem Mikrozustand des Sprachzentrums liegt.

Die Untersuchungen mittels Magnet-Resonanz-Tomographie stützen die Annahme einer kategorialen Repräsentation im Gedächtnis (Spitzer, u.a., 1995), erlauben jedoch wegen ihrer geringen zeitlichen Auflösung keine Prozessanalyse. EEG-Messungen sind wegen ihrer hohen zeitlichen Auflösung dazu besser geeignet.

Wir verlangen von unseren Versuchspersonen Klassifizierungs- und Vergleichsanforderungen und leiten dabei das EEG ab. (Krause u.a., 2000). Im Kategorisierungsexperiment mussten Fragen beantwortet werden wie z.B.:

Gehören „Kleid“ und „Mütze“ zur gleichen Kategorie? Zur Entscheidung ist die Aktivierung eines Kategoriebegriffes zwingend erforderlich. Bei der Frage nach der physikalischen Identität, ob z.B. die Worte „Hemd“ und „Hemd“ gleich aussehen, ist die Aktivierung eines Kategoriebegriffes nicht erforderlich. Anstelle der Worte wurden auch Bilder verwendet mit der Hypothese, dass beim Klassifizierungsprozess kein Unterschied zu beobachten sein sollte. Bereits Posner und Mitchell (1967) fanden bei solchen Experimenten eine Zeitdifferenz zwischen Kategorisierung und physikalischer Identität von ca. 300 ms, die für die Aktivierung des Klassenbegriffes verbraucht werden sollte. In unseren Experimenten lag die mittlere Zeitdifferenz bei 193 ms für Wörter und bei 179 ms für Bilder. Eine entsprechende Zeitdifferenz müsste auch bei der Aktivierung im Sprachzentrum zu erwarten sein. Die Abbildung 5 zeigt die Entscheidungszeit von drei Versuchspersonen für Kategorisierung und Vergleich auf physikalische Identität für Wort und Bilddarbietung. Aus den sechs Mikrozuständen (vgl. Abbildung 6) wurde ein Mikrozustand ausgewählt, der die größte Differenz in den Beginnzeit-Dauer-Segmentverteilungen zwischen Kategorisierung und Vergleich aufweist. Für diesen ausgewählten Mikrozustand ist in Abbildung 5 auch das EEG-Kohärenzmap dargestellt. Wie aus der Antwortzeit vorhersagbar, tritt dieser Mikrozustand beim Vergleich im Mittel früher auf als bei der Kategorisierung¹.

Ordnet man die Beginnzeit-Dauer-Verteilung der sechs Mikrozustände nach dem Unterschied der Verteilungen zwischen den beiden Anforderungen, dann ist diejenige Verteilung mit der größten Differenz einem Kohärenzmap mit hoher Kohärenz im sensomotorischen Sprachzentrum (Elektrodenpaare C3P3, F3C3) zuordenbar. Auffällig ist, dass trotz unterschiedlicher Darbietungsmodalitäten (Wort bzw. Bild) ähnliche Mikrozustände unter gleichen Bedingungen auftreten. Sowohl unter Wort- als auch unter Bilddarbietung wird die Aktivierung des sensomotorischen Sprachzentrums beobachtet, wenn Kategorisierung verlangt wird. Wir interpretieren das als Aufruf des Klassenbegriffes (auch bei Bilddarbietung) und damit als neurowissenschaftliche Präsenz der Klassenbildung. Wie erwartet, findet sich für kleinere Differenzen in den Beginnzeit-Dauer-Segmentverteilungen ein Mikrozustand, der als Exekutive interpretiert werden kann (in Abbildung 5 nicht dargestellt, vgl. aber 4. Mikrozustand in Abbildung 6). Dieser Mikrozustand liegt zeitlich früher.

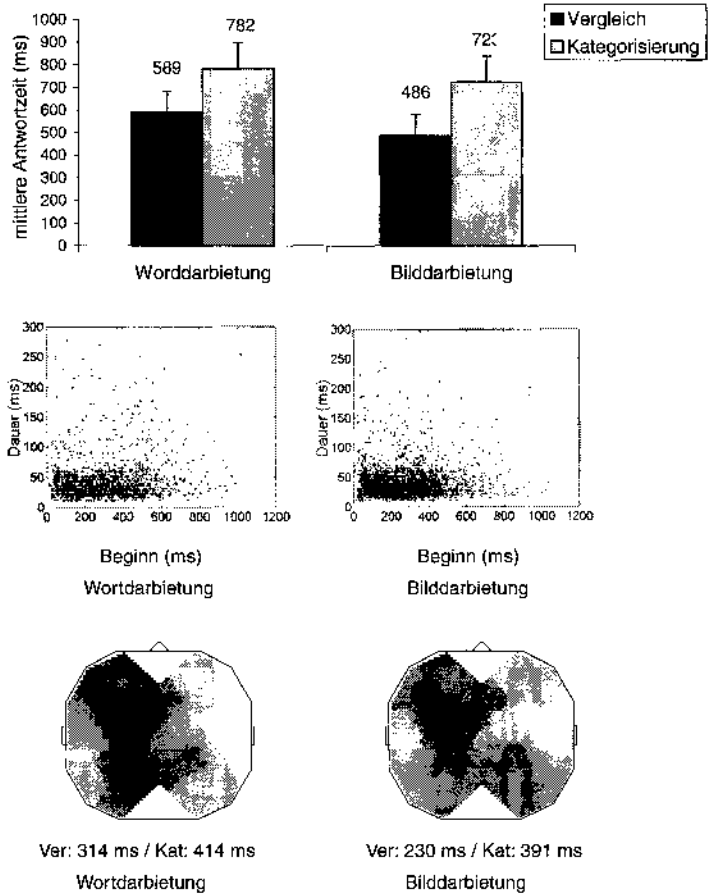


Abbildung 5

Zur Interpretation von Mikrozuständen bei Kategorisierung. Der Mikrozustand kann als Aktivierung des sensomotorischen Sprachzentrums interpretiert werden. Für Wort- und Bilddarbietung ergeben sich die gleichen Befunde. Ver: = mittlere Beginnzeit des Mikrozustandes beim Vergleich. Kat: = mittlere Beginnzeit des Mikrozustandes bei Kategorisierung. Für den so ausgewählten Mikrozustand ist der Unterschied in den Beginnzeit-Dauer-Segmentverteilungen zwischen Kategorisierung und Vergleich am größten. Der Unterschied wurde über den euklidischen Abstand bestimmt.

Der Entropieabbau als Größe zur Unterscheidung zwischen Anforderungen lässt sich nach Gleichung (10) berechnen und ist für die Kategorisierung 1,09 und für den Vergleich auf physikalische Identität 0,81. Die Unterschiede sind signifikant. Die gleichen Relationen ergeben sich bei der Bildarbeit. Die maximale Entropie ist bei 6 Mikrozuständen 2,58. Der größere Entropieabbau bei der Kategorisierung ist im wesentlichen auf eine Erhöhung der Eigenübergänge der beiden Mikrozustände für die Kategoriebegriffsaktivierung und für die Exekutive zurückzuführen. Die Abbildung 6 zeigt die Markoffkette dieses Prozesses für Wortdarbietung. Die Pfeile kennzeichnen die Verkettung der Mikrozustände als

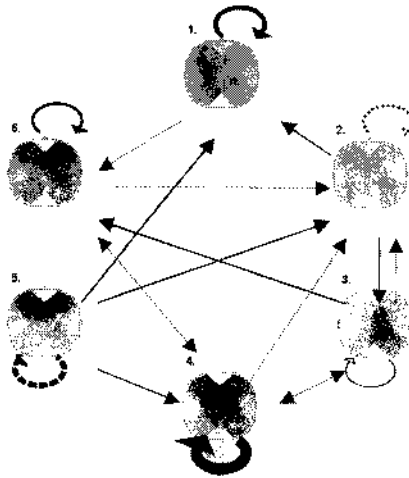


Abbildung 6

Markoffkette für Kategorisierungs – versus Vergleichsprozesse bei Wortdarbietung. Dargestellt sind die 6 Mikrozustände und die Differenz der Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Kategorisierung und Vergleich. Ausgezogenen Linien kennzeichnen positive Differenzen, gestrichelte Linien negative Differenzen. Die Dicke der Pfeile gibt die Größe der Übergangswahrscheinlichkeitsdifferenzen an (von 0,01 bis 0,08). Maßstab der Kohärenzmaps: von 0,35 (weiß) bis 0,85 (schwarz). Die Ordnung der Mikrozustände erfolgte nach dem euklidischen Abstand zwischen den Beginnzeit-Dauersegmentverteilungen für Kategorisierung und Vergleich: eine repräsentative Versuchsperson.

Differenz zwischen Kategorisierung und Vergleich. Deutlich zu erkennen sind die höheren Eigenübergänge bei den Mikrozuständen 4 (Exekutive) und 1 (Kategoriebegriffsaktivierung) bei Kategorisierungs – im Gegensatz zu Vergleichsanforderungen.

Denken: Bei komplizierteren Denkanforderungen ist die Interpretation der Mikrozustände mit Hilfe der Zeitverhältnisse schwer möglich, da die Entscheidungszeitdifferenzen nicht eindeutig interpretierbar sind. Deshalb wird die Ordnung der Mikrozustände nach ihren Eigenübergängen bestimmt. Die Eigenübergangswahrscheinlichkeiten sind ein Maß für das „längere Andauern“ eines Mikrozustandes, also ein Maß für die zeitliche Stabilität kognitiver Operationen, die durch die Mikrozustände und deren Verkettung repräsentiert werden. Es ist offensichtlich, dass eine Erhöhung der Eigenübergänge zu einer Erhöhung des Entropieabbaues führt. Derjenige Mikrozustand mit der größeren Erhöhung der Eigenübergangswahrscheinlichkeit hat dann den größeren Anteil am Entropieabbau, ist also in dieser Hinsicht von größter Bedeutung für die Ordnungsbildung.

Zurück zur Modellvorstellung: Mit Boltzmann (1872) und Prigogine (1979) wird – wie eingangs gezeigt – Ordnungsbildung als eindeutige Zuweisung von Elementen zu Klassen definiert. Überträgt man diesen Gedanken auf die Denkpsychologie, dann kann Unordnung z. B. dadurch abgebaut werden, dass aus einer Menge verfügbarer Strategien so ausgewählt wird, dass eine eindeutige Zuordnung einer Strategie zur Klasse der Lösungsstrategien erfolgt. Dabei wird von einem Zweiklassenproblem ausgegangen: die Klasse der Lösungsstrategien und die Klasse der Nichtlösungsstrategien. Danach ist eine größere Strategieanzahl mit einer höheren Unordnung verbunden, die beim Denken beseitigt werden muss.

Wir betrachten zwei Modalitätsstrategien in vier unterschiedlich komplizierten mathematischen Anforderungen. So kann zum Beispiel eine Aufgabe durch Rechnen (oder Formelmanipulation) oder bildhaft-anschaulich gelöst werden. Sind beide Modalitätsstrategien (rechnerisch und bildhaft-anschaulich) möglich, dann muss ausgewählt werden.

Bei Aufgaben mit zwei Modalitätsstrategien (rechnen und bildhaft) muss demnach ein größerer Entropieabbau zu erwarten sein als bei Aufgaben mit nur einer Modalitätsstrategie. Die Plausibilität dieser Vorstellung steht der Nichtmessbarkeit der Ordnungsbildung nach Gleichung (5) entgegen. Wird

Ordnungsbildung nach Gleichung (10) gemessen, dann sollte zumindest einer der Mikrozustände im Sinne der Strategiewahl interpretierbar sein.

Die Anforderungen²:

1) Addition einstelliger Summanden – **rechnen**:

$$3 + 4 = ?$$

$$5 + 3 + 9 = ?$$

$$2 + 7 + 4 + 5 = ?$$

2) mentale Navigation – **bildhaft**:

Der Punkt des linken Würfels muss entsprechend der Richtungsinformation bewegt werden.

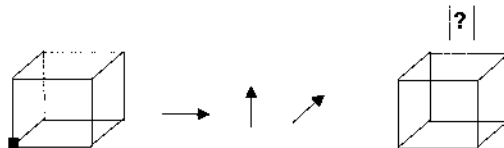


Abbildung 7

Anforderung zur mentalen Navigation.

3) einfache mathematische Anforderungen (Problem A) – **rechnen, bildhaft**:
Die Diagonale eines Quadrates beträgt 5 cm. Wie lang ist die Seitenlänge eines Quadrates mit doppeltem Flächeninhalt?

4) komplexere mathematische Anforderungen (Problem B) – **rechnen, bildhaft**:

Berechnen Sie die Anzahl der Diagonalen in einem 23-Eck!

Für diese vier Aufgabenklassen ist der Entropieabbau in Abhängigkeit von der Strategieanzahl in Abbildung 8 dargestellt. Diese und nachfolgende Ergebnisse wurden zusammen mit Seidel (2001) im Rahmen der Betreuung ihrer Dissertation erarbeitet (s. Abb. 8).

Mit dieser Messgröße der Ordnungsbildung sind die mathematischen Anforderungen unterscheidbar, wenn die Anzahl der Modalitätsstrategien als unabhängige Variable gewählt wird. An den Experimenten nahmen 12 ma-

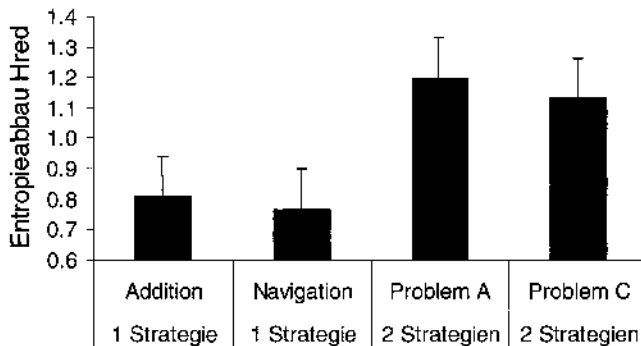


Abbildung 8
Entropieabbau als Funktion der Anzahl von Strategien

thematisch hochbegabte (9 männliche, 3 weibliche, Alter 18,3, IQ = 124) und 12 normalbegabte Abiturienten (6 männliche, 6 weibliche, Alter 17,9, IQ = 115³) teil. Die hochbegabten Abiturienten waren Schüler eines Mathematik-Spezialgymnasiums. Die Auswahl erfolgt nach Lehrerurteil. Die Abbildung 8 zeigt den Entropieabbau bei der Gruppe der Hochbegabten. Untersucht man die topographischen Eigenschaften der Mikrozustände nach der oben dargestellten Ordnung der Eigenübergänge, dann lässt sich zeigen, dass Mikrozustände mit hohen Eigenübergängen gegenüber Mikrozuständen mit niedrigen Eigenübergängen durch eine höhere Kohärenz in frontozentralen kortikalen Arealen ausgewiesen sind. Die Auswahl von Strategien geht demnach mit einer erhöhten Aktivität im Arbeitsgedächtnis einher. Die Abbildung 9 zeigt die Eigenübergangshäufigkeit für Anforderungen mit 1 und 2 Strategien.

Im unteren Diagramm sind die Mikrozustände nach ihren Eigenübergangshäufigkeiten geordnet. Aus der Differenz der Kohärenzmaps mit hohen (1+2) und niedrigen (5+6) Eigenübergängen wird deutlich, dass beim Problem A mit 2 Strategien Mikrozustände mit hohen Eigenübergangshäufigkeiten⁴ höhere Kohärenzen frontal (Elektrodenpaare F7 F3, F3 Fz) aufweisen. Interpretativ bedeutet das: Die Auswahl verfügbarer Strategien geht einher mit einem „längeren Andauern“ von Mikrozuständen mit hoher Frontalaktivierung. Dies führt zum höheren Entropieabbau. Ordnungsbildung im Denken wird damit direkt

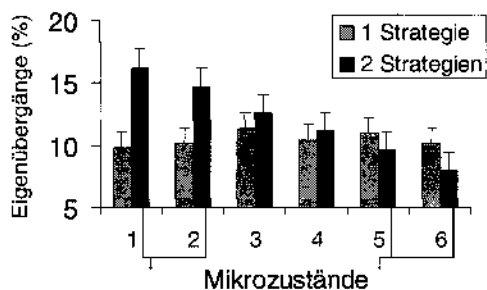
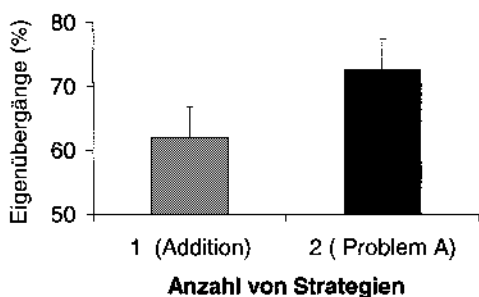


Abbildung 9

Eigenübergangshäufigkeiten (%) in Abhängigkeit von der Strategiemenge, Eigenübergangshäufigkeiten der sechs Mikrozustände für Anforderungen mit einer Strategie (Addition) und mit zwei Strategien (Problem A) und EEG-Kohärenzmaps der Mikrozustände 1+2 (gemittelt) und 5+6 (gemittelt) für die Anforderung mit zwei Strategien (Problem A, schwarze Säulen). Maßstab der Kohärenzmaps: 0,22 (weiß) -0,85 (schwarz). Maßstab des Differenzmaps ((1+2) - (5+6)): von -0,11 (weiß) bis +0,11 (schwarz).

messbar. Dieser Ansatz erlaubt Aussagen sowohl über den intern ablaufenden Prozess als auch über die Topographie der Mikrozustände. Beim Vergleich zwischen Extremgruppen kann damit geprüft werden, auf welche der beiden Komponenten der Ordnungsbildung der Unterscheid zwischen Personen zurückführbar ist.

4.2 Entropieabbau als Messgröße der Komplexitätsreduktion zur Unterscheidung zwischen mathematisch Hoch- und Normalbegabten

Die Zurückweisung der ursprünglich weit verbreiteten Annahme, dass die Zeit (und damit der Prozess) ein wesentlicher Indikator zur Unterscheidung zwi-

schen Hoch- und Normalbegabten sei, hat zu einer intensiven Untersuchung topologischer Eigenschaften zwischen den Extremgruppen geführt. Für die Doppel- oder multimodale Repräsentationshypothese (Hendrickson, 1986, Klix, 1992) sind in der Zwischenzeit neurowissenschaftliche Belege vorgelegt worden, die zusammenfassend in der Aussage gipfeln: Hochbegabte und Normalbegabte (aber auch Experten und Nichtexperten) „verwenden“ unterschiedliche kortikale Areale zur Anforderungsbewältigung.

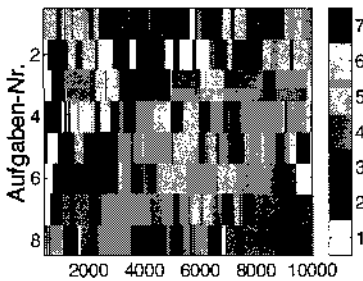
So fanden Pesenti u.a. (2001) bei dem bereits erwähnten Rechenkünstler Rüdiger Gamm beim Lösen schwieriger mathematischer Aufgaben zusätzlich eine Aktivierung im rechten prefrontalen und medial temporalen Kortex. Interpretiert wird dieser Befund als eine Erweiterung der Gedächtniskapazität. Zugleich spekulieren die Autoren, dass eine „Beschleunigung“ kortikaler Prozesse keine Unterscheidungsmerkmal zwischen den Extremgruppen ist.

Mit Hilfe des Ansatzes der Komplexitätsreduktion können Seidel u.a. (2001a, 2001b) zeigen, dass sich mathematisch Hoch- und Normalbegabte in beiden Komponenten, im intern ablaufenden Prozess und in der Topographie unterscheiden: Bei Hochbegabten dauern Mikrozustände mit rechts-hemisphärischer Aktivierung länger an, wenn die Anforderung es erfordert. Das soll gezeigt werden:

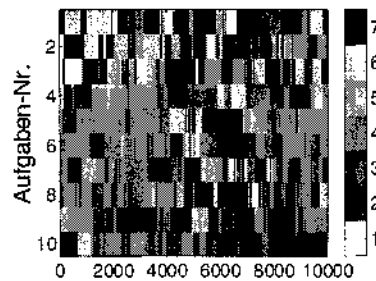
Um die unterschiedliche Dynamik zu verdeutlichen, betrachten wir zunächst die Sequenz und Dauer von Mikrozuständen beim Lösen von einfachen mathematischen Problemen (Problemklasse A) und bei Additionsaufgaben für eine hochbegabte und eine normalbegabte Versuchsperson. Die Abbildung 10 zeigt die Sequenz und Dauer (x-Achse) der sechs Mikrozustände (sechs unterschiedliche Grauwerte) für jeweils 10 Aufgaben aus der Problemklasse A (links) und 10 Additionsaufgaben (rechts) für eine hochbegabte (oben) und eine normalbegabte (unten) Versuchsperson.

Bereits vom Eindruck her fällt ein Unterschied zwischen der hoch- und normalbegabten Versuchsperson beim Lösen einfacher mathematischer Probleme (Problem A) auf, der bei den Additionsaufgaben nicht zu beobachten ist. Spekulativ kann man vermuten, dass bei der hochbegabten Versuchsperson die Mikrozustände länger andauern und dass (damit im Zusammenhang) der Wechsel zwischen den Mikrozuständen seltener erfolgt. Quantitativ lässt sich der Unterschied zwischen mathematisch Hoch- und Normalbegabten durch den Entropieabbau (Gleichung (10)) erfassen. Wie Abbildung 11 ver-

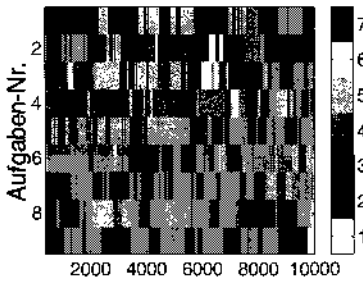
hochbegabt: 2 Strategien (Problem A)



1 Strategie (Addition)



normalbegabt: 2 Strategien (Problem A)



1 Strategie (Addition)

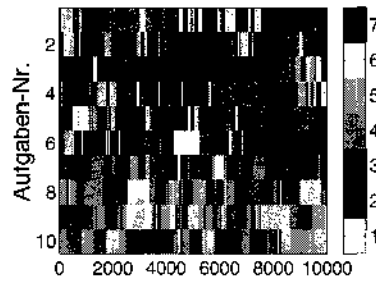


Abbildung 10

Mikrozustandssequenzen für eine mathematisch hoch- und eine normalbegabte Versuchsperson bei einfachen mathematischen Problemen (Problem A, 2 Strategien) und bei Additionsaufgaben (1 Strategie).

deutlich, zeigen Hochbegabte bei mathematischen Problemen (Problem A) einen signifikant größeren Entropieabbau als Normalbegabte. Diese Differenz im Entropieabbau findet sich nicht bei den verwendeten Additionsaufgaben. Sie ist offenbar anforderungsabhängig. Die unterste Zeile der Abbildung 11 zeigt das Differenzmap der Mikrozustände zwischen Hoch- und Normalbegabten bei hohen Eigenübergängen für die beiden Anforderungen (Problem A (links) und Addition (rechts)). Bei Hochbegabten gegenüber Normalbegabten zeigt sich eine höhere Kohärenz in frontalen und in linken und rechten centro-parietalen kortikalen Arealen (Elektrodenpaare F7F3, C3P3, C4

P4), wenn die Kohärenzmaps der Mikrozustände mit hohen Eigenübergangshäufigkeiten verglichen werden. Dieser Unterschied tritt nicht bei der Addition auf. Erwartungsgemäß zeigt sich bei Mikrozuständen mit geringen Eigenübergangshäufigkeiten in beiden Anforderungen kein Unterschied (hier nicht dargestellt).

Dieser Befund besagt: Der größere Entropieabbau mathematisch Hochbegabter beim Lösen mathematischer Probleme, deren Lösung zwei Modalitätsstrategien erlauben, ist auf eine Erhöhung der Eigenübergangshäufigkeiten solcher Mikrozustände zurückzuführen, die links frontal sowie bilateral centroparietal eine höhere Kohärenz aufweisen. Dies sind jene Areale, die auch in rechnerische (Deheane u.a., 1999) und bildhaft-anschauliche Verarbeitungsprozesse involviert sind (Zago, u.a., 2001). Dies spricht für eine starke Nutzung multimodaler Repräsentationen. Die zusätzliche Aktivierung rechtshemisphärischer kortikaler Areale bei Hochbegabten wird mehrfach in der Literatur beschrieben, so auch bei Pesenti, u.a. (2001), wengleich die Autoren über andere Stichproben berichten. Darüber hinaus zeigt sich in den Untersuchungen von Seidel u.a. ein deutlicher Unterschied zwischen Hoch- und Normalbegabten im Entropieabbau, also auch im Prozeß.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Hochbegabte weisen gegenüber Normalbegabten eine Änderung in Prozess und Struktur auf. Nicht nur andere kortikale Areale sind bei mathematisch Hochbegabten aktiv; die Stärke der Verkettung von Mikrozuständen ist weniger chaotisch.

Natürlich muss ein solcher Ansatz weiter überprüft werden. Dies betrifft nicht nur die Einbeziehung weiterer Stichproben oder anderer Disziplinen (z. B. Musik oder Konstruktion) sondern auch Fragen des Trainings Normalbegabter oder die Erkennung von Frühbegabung. Dazu werden gegenwärtig Untersuchungen durchgeführt.

Ausgangspunkt unserer Überlegungen zur Basiskomponente Komplexitätsreduktion war die Boltzmann-Entropie als Maß für die Unordnung bei der Zuweisung von Elementen zu Klassen bzw. der Auswahl von verfügbaren Strategien. Denkpsychologisch ist dies eine nützliche Modellvorstellung, die jedoch keine direkte Messung der Ordnungsbildung erlaubt. Mit der Einführung von Mikrozuständen und deren Verkettung ist Ordnungsbildung unter Nutzung der Shannon-Entropie direkt messbar. Die Validität eines solchen Maßes wird umso größer, je besser die Interpretation der Mikrozustände ge-

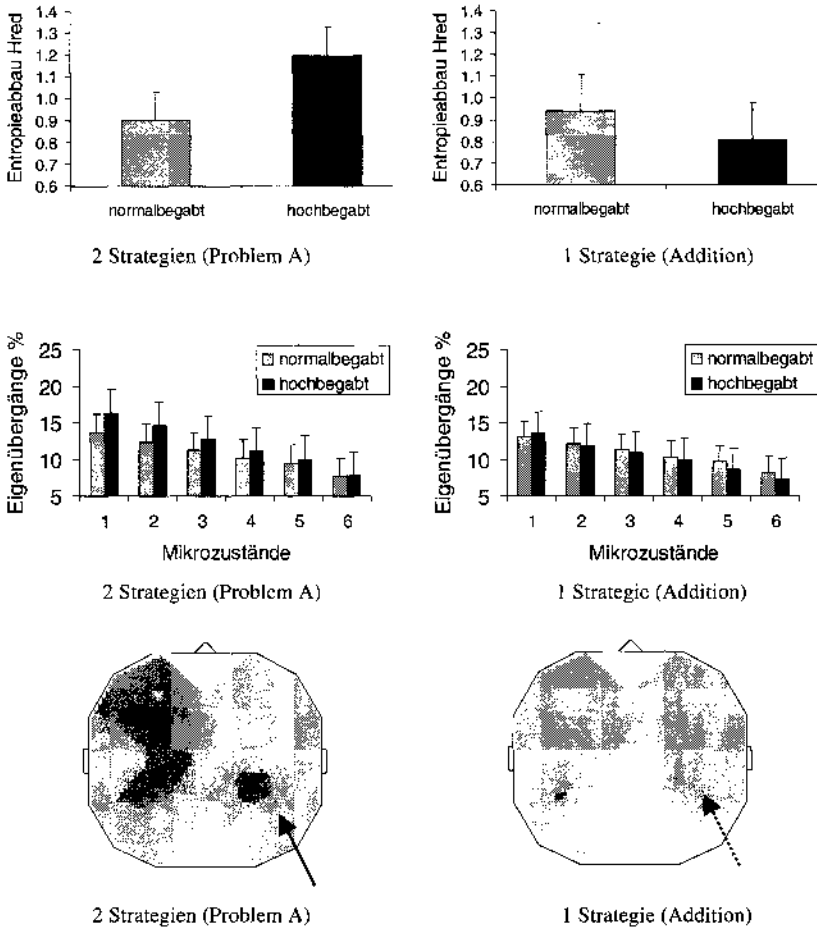


Abbildung 11

Entropieabbau, Eigenübergangshäufigkeiten (%) der Mikrozustände und Differenzmap für mathematisch Hoch- und Normalbegabte bei einfachen mathematischen Problemen (Problem A, 2 Strategien) und bei Additionsaufgaben (1 Strategie). Maßstab der Kohärenzdifferenzen: von -0,069 (weiß) bis +0,10 (schwarz).

lingt. Dieses Problem ist noch nicht befriedigend gelöst. Zwei Möglichkeiten wurden vorgestellt.

Ob ein solches Maß der Komplexitätsreduktion differenzierte Denkleistungen besser abbildet als die traditionellen Maße, muss vorerst noch offen bleiben. Die größere Adäquatheit des Prozesses spricht dafür.

Endnoten

- 1 Da die Daten für beide Anforderungen zusammen verarbeitet worden sind, ist auch nur ein Mikrozustand für beide Anforderungen dargestellt. Bei getrennter Analyse erhält man ähnliche Mikrozustände.
- 2 Die Anforderungen wurden von Dr. Frank Heinrich, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Jena entwickelt. Ihm gilt unser herzlicher Dank.
- 3 Der Intelligenzquotient für die beiden Stichproben wurde von Simone Bawey mit dem LPS-U3 erhoben.
- 4 Die hohe Sensibilität der Eigenübergänge der Mikrozustände für kognitive Prozesse ist in Experimenten bisher besonders aufgefallen. Über die Änderung der Übergangswahrscheinlichkeit der Mikrozustände und deren Ordnung in Abhängigkeit von Änderungen des kognitiven Prozesses lassen sich derzeit noch keine Angaben machen. Dessen ungeachtet fanden wir eine hohe intraindividuelle Stabilität der Mikrozustände bei Anforderungsvariation.

Literatur

- Aebli, H. (1980): Denken: Das Ordnen des Tuns I. Stuttgart: Klett-Cotta
- Amunts, K., Schlaug, G., Jäncke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A., Zilles, K. (1997). Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain. *Human brain mapping*, 5, 206–215
- Boltzmann, L. (1872). Wien. Ber. 66, S. 275
- Bredenkamp, J., Klein, K.-M., von Hayn, S., & Vaterrodt, B. (1988). Gedächtnispsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. *Sprache und Kognition*, 69–83
- Bredenkamp, J. (1992). Die Zeitquantenhypothese und experimentelle Daten aus Untersuchungen an einem Rechenkünstler. Vortragsmanuskript (unveröffentlicht)
- Deheane, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284, 970–974

- Ebeling, W., & Feistl, P. (1982). *Physik der Selbstorganisation und Evolution*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften
- Eigen, M., & Winkler-Oswatitsch, R. (1975). *Das Spiel*. München, Zürich: Piper
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig
- Gardner, H. (1999). Vielerlei Intelligenzen. *Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3*, 18–23
- Gottfredson, L. S. (1999). Der Generalfaktor der Intelligenz. *Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3*, 24–31
- Grießbach, G. (1990). Computerorientierte Meßstochastik in der Technischen Diagnose und dem Signalmapping. Habilitationsschrift, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Grießbach, G., & Schack, B. (1993). Adaptive quantile estimation and its application in analysis of biological signals. *Biomed.J.*, 35, 165–179
- Grabowski, J. (1999). Von Tests zu Intelligenzmodellen. *Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3*, 36–38
- Hesse, W. (2000). Mathematisch-statistische Modellierung der Reaktionszeiteigenschaften kognitiver Repräsentationen von Ordnungsstrukturen. Diplomarbeit, Institut für Informatik, Universität Jena
- 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
- Jäncke, L., Schlaug, G., Steinmetz, H. (1997). Hand skill asymmetry in professional musicians. *Brain and Cognition*, 34, 424–432
- Jausovec, N. (1998). Are gifted individuals less chaotic thinkers?. *Personality and Individual Differences*, 25, 253–267
- Johnson, L.M. (1939). The relative effect of a time interval upon learning and retention. *Journal of Experimental Psychology*, 24, 169–179
- Klix, F. (1992). *Die Natur des Verstandes*. Göttingen: Hogrefe
- Kotkamp, U. (1999). *Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen*. Lengerich: Papst
- Krause, W. (2000). *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen: Hogrefe
- Krause, W., Schack, B., Krause, U., Kotkamp, N., Tietze, H., Möller, E. (2000). Classifying words. *NeuroImage*, 11,5, S. 410

- Krause, W. Sommerfeld, E. (2000). Elementaranalysen von Denkprozessen mit psychophysikalischen und neurowissenschaftlichen Methoden. *Z Psychol*, 208, 322–339.
- Lehmann, D., Ozaki, H., & Pal, I. (1987). EEG alpha map series: brain microstates by space-oriented adaptive segmentation. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 67, 271–288
- Moyer, R.S. (1973). Comparing objects in memory: Evidence suggesting an internal psychophysics. *Perception and Psychophysics*, 13, 180–184
- Moyer, R.S., & Bayer, R.H. (1976). Mental Comparison and the Symbolic Distance Effect. *Cognitive Psychology*, 8, 228–246
- 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
- Pliske, R. M., & Smith, K. M. (1979). Semantic categorization in a linear order problem. *Memory and Cognition*, 7, 297–302
- Posner, M.I., & Mitchell, R.F. (1967). Chronometric analysis of classification. *Psychological Review*, 74, 392–409
- Prigogine, I. (1979). *Vom Sein zum Werden*. München: Piper
- Rösler, H. D., Biele, H., & Lange, E. (1988). Diskrepanz zwischen Schul- und Intelligenzleistungen. *Psychologie für die Praxis*, 1, 21–31
- 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
- Schaub, H. (1988). Intelligenz, Problemlösen und künstliche Intelligenz. Memorandum Nr. 65, Lehrstuhl Psychologie II der Universität Bamberg
- Schaub, H. (1988). Die Situationsspezifität des Problemlöseverhaltens. Memorandum Nr.61, Lehrstuhl Psychologie II der Universität Bamberg
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Staiger, J.F., Steinmetz, H. (1995a). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 33,8, 1047–1055
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Steinmetz, H. (1995b). In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science*, 3, 267, 699–701
- Seidel, G. (2001). Ordnungsbildung und Multimodalität im Denken mathematisch Hochbegabter – sequentielle und topologische Eigenschaften

- kognitiver Mikrozustände. Dissertation, Fakultät für Sozial – und Verhaltenswissenschaften, Universität Jena (in Vorbereitung)
- Seidel, G., Krause, W., Schack, B., Heinrich, F., Krause, U. (2001a). Entropy reduction and mathematical giftedness: A microstate study of EEG oscillations. *NeuroImage*, 2001
- Seidel, G., Krause, W., Schack, B., Heinrich, F. (2001b). Ordnungsbildung im Denken mathematisch Hochbegabter: Verkettung von Mikrozuständen. Prossedings Teap 2001, Regensburg
- Singer, W. (2000). Vom Gehirn zum Bewußtsein. In Elsner, N. & Lüer, G. *Das Gehirn und sein Geist*. Göttingen: Wallstein
- Sommerfeld, E. (1994). *Kognitive Strukturen*. Münster: Waxmann
- Spitzer, M., Kwong, K. K., Kennedy, W., Rosen, B. R., & Belliveau, J. W. (1995). Category-specific brain activation in fMRI during picture naming. *Neuroreport*, 6, 2109–2112
- Sternberg, R. J. (1999). Wie intelligent sind Intelligenztests? *Spektrum der Wissenschaft*, Spezial 3, 12–17
- Welford, A. T. (1960). The measurement of sensory-motor performance: Survey and reappearance of twelve years progress. *Ergonomics*, 3, 189–230
- Winner, E. (1999). Hochbegabte, Wunderkinder und „Savants“. *Spektrum der Wissenschaft*, Spezial 3, 40–45
- 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