Leibniz Online, Nr. 21 (2016)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V.
ISSN 1863-3285

Werner Krause

Verarbeitung von Information in Mikrozuständen

Teil 1: Information

- Ergebnisse der Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung - neu betrachtet - [1, 2]

Zusammenfassung: *Im Beitrag Teil 1 wird gezeigt, dass Information über die Synchronizität zwischen EEG-Signalen gemessen werden kann. Im Teil 2 wird gezeigt, dass die Multimodalitätshypothese mit Hilfe der Topologie bestätigt werden kann. Im Teil 3 wird die Verarbeitung von Information beim Menschen als Markoffkette von Mikrozuständen, die auf zeitkonstanter Synchronizität zwischen EEG-Signalen basieren, abgebildet. Es wird experimentell belegt, dass sich im Grad der Verkettung von Mikrozuständen geistige Leistung ausdrückt, quantifizierbar als Entropiereduktion.*

Vor 27 Jahren begann in Jena eine sehr konstruktive Zusammenarbeit mit der Mathematikerin Bärbel Schack, dem Mathematikdidaktiker Frank Heinrich, dem Mathematiker Gert Grießbach, dem Mediziner Mathias Rother und der Physikerin Erdmute Sommerfeld. Später kamen zu unterschiedlichen Zeitpunkten hinzu die Diplomanden, Doktorenden und Habilitanden der Psychologie Uwe Kotkamp, Gundula Seidel, Martin Grunwald, Heiko Tietze, Jürgen Ptucha, Henning Gibbons, Bettina Kriese, Christine Schleußner, Thomas Hübner, Ralf Goertz, Nicole Kotkamp, Sven Oelsner und Mauricio Parra. Aus der Ferne wirkten mit Dietrich Lehmann (Zürich), Jürgen Bredenkamp (Bonn), Dieter Heller (Aachen), Dietrich Dörner (Bamberg), Rudolf Groner (Bern) und Gerd Lüer (Göttingen). Uns alle trieb die Frage um, ob sich ein auf der Modellebene gefundenes Maß des kognitiven Aufwandes beim Behalten von Information - das differentiell sensibel ist -, durch EEG-Analysen untermauern lässt. Dass daraus der Vorschlag der Entropiereduktion als Maß geistiger Leistungen entstehen sollte, konnte damals niemand ahnen. Heute, nachdem 12 Jahre seit dem Abbruch der Arbeiten vergangen sind, ist der Abstand für eine Neubetrachtung genügend groß, um Wesentliches von Unwesentlichem besser zu trennen, um die Lücken aufzuzeigen und um das Problem besser einzuordnen. Deshalb gehen wir hier nicht auf methodische Details ein. Dieser Text ist auch mit dem nicht ganz uneigennützigen Wunsch verbunden, dass interessierte Forschergruppen solche Experimente wiederholen mögen, um die Frage nach der Entropiereduktion als Maß geistiger Leistungen weiter untermauern oder falsifizieren zu können.

1. Anliegen

Ein neues Maß für kognitive Prozesse setzt die Kenntnis kognitiver Prozess voraus. Diskrete Prozesse lassen sich als Sequenzen von Zuständen beschreiben und manchmal als Markoffketten quantifizieren. Dazu müssen die Zustände spezifiziert sein.

Für den speziellen Fall des elementaren Problemlösens sind Markoffketten zur Analyse des Strategiewechsels angewendet worden, wobei die Zustände Strategien waren (Krause, 1970). Die Regeln

---

[1] In memoriam Bärbel Schack, PD Dr. rer. nat. habil., Dr. Ing. habil.. Ihr viel zu früher Tod hat sie mitten aus einem ereignisreichen Schaffen gerissen. Ohne ihre neuen mathematischen Arbeiten zur adaptiven EEG – Kohärenzanalyse hätten die Befunde über Entropiereduktion als Maß geistiger Leistungen nicht vorgelegt werden können.

[2] Peter Petzold, Erdmute Sommerfeld und Gerd Lüer danke ich für die kritische Durchsicht einer früheren Fassung dieses Textes. Anita Kramer danke ich für die Literaturrecherche mittels „PsyInfo“.

für einen Strategiewechsel im elementaren Problemlösen ließen sich so spezifizieren. Groner (1978) hat in seinem Buch „Hypothesen im Denkprozess“ gezeigt, dass auch der Strategieerwerb im Problemlösen mittels Markoffketten beschrieben werden kann. Dennoch blieben diese Ansätze auf die speziell ausgewählten Anforderungen begrenzt, weil die Zustände der Markoffketten jeweils anforderungsspezifisch definiert werden mussten. Damit war eine Generalisierung der Prozessanalyse mittels Markoffketten bisher nicht möglich.

Für beliebige Anforderungen ist diese Prozessanalyse mittels Markoffketten dann anwendbar, wenn auch die Zustände für beliebige Anforderungen bestimmbar sind. Genau das soll gezeigt werden, indem EEG-Kohärenz-Mikrozustände (Lehmann, 1987) als Zustände der Markoffketten betrachtet werden. Aus den Verknüpfungen der Zustände, gemessen über die bedingten Wahrscheinlichkeiten, lassen sich dann Ordnungen der Markoffkette für beliebige Anforderungen berechnen, die zu geistigen Leistungen in Beziehung gesetzt werden. Dies wird als Maß für geistige Leistungen vorgeschlagen. Im 3. Teil wird darauf eingegangen.

Man kann den Anspruch einer Generalisierung auch noch weitertreiben. Fasst man die EEG-Kohärenz-Mikrozustände als „Buchstaben eines Alphabetes“ auf und ordnet ihnen eine Bedeutung zu, dann wären die Mikrozustandssequenzen „Worte“, die in irgendeiner Weise den kognitiven Prozess abbilden. Zu fragen wäre nach den Regeln, die solche Sequenzen erzeugen, nach einer „mentalen Grammatik“. Vorerst ist ein solcher Weg aber verschlossen, da die Bedeutungsbelegung der Mikrozustände vorerst ungelöst ist. Wir müssen uns auf die syntaktischen Eigenschaften einer Grammatik beschränken.

Mit der Auffassung der Assoziationspsychologie, Denken sei eine Verkettung von Vorstellungen, verbindet sich zunächst keine Erklärung. Aber der Gedanke einer <u>Sequenz</u> von .... wird offenbar. Im Laufe der Entwicklung haben sich 4 Ebenen herausgebildet, in denen mentale Prozesse als Sequenzen abgebildet werden:

- Handlungsebene, die Ebene der externen Repräsentation
- Kognitive Strukturebene, die Ebene der internen Repräsentation
- Mikrozustandsebene, die neurowissenschaftliche Ebene
- Molekularbiologische Ebene, die Ebene der Epigenetik.

Für die molekularbiologische Ebene ist eine gesonderte Betrachtung im Kompetenzbereich der Molekularbiologen erforderlich. Es sei hier u.a. auf die Arbeiten von Müller (2010) oder Spork (2012) verwiesen.

Formal lassen sich solche Sequenzen als Transformation von externen Zuständen Z_i, Z_j, von kognitiven Strukturen S_i, S_j und von Mikrozuständen M_i, M_j vermittels von Operatoren Q^H, Q^S und Q^M darstellen:

- Handlungsebene: $Q^H: Z_i \rightarrow Z_j$
- kogntive Strukturebene: $Q^S: S_i \rightarrow S_j$
- Mikrozustandebene: $Q^M: M_i \rightarrow M_j$

Der Vorteil der Annahme von Sequenzen besteht darin, dass die Eigenschaften eines Prozesses in natürlicher Weise in die Eigenschaften von Sequenzen, in die Art und Weise der Verkettung von Elementen, abgebildet werden können. (In der Wissenschaft ist diese sequentielle Betrachtung eine gern verwendete Methode, weil kaum Voraussetzungen zu erfüllen sind). Die Schwierigkeit besteht in der Bestimmung der Elemente und ihrer Eigenschaften, die Herausforderung in der Bestimmung der Wechselwirkung zwischen den Ebenen, zumal die Zeitskalen zwischen den einzelnen Ebenen keineswegs übereinstimmen. Bei der Handlungsebene bewegen wir uns im Minutenbereich, bei der kognitiven Strukturebene im Sekundenbereich, bei der Mikrozustandsebene im Millisekundenbereich und bei der molekularbiologischen Ebene muss ein ganzes Zeitspektrum betrachtet werden.

Über Sequenzen in der Handlungsebene und Bezüge zur kognitiven Strukturebene hat jüngst Heinz-Jürgen Rothe (2012) in seiner Abschlussvorlesung an der Universität Potsdam berichtet. Über Urteilssequenzen haben Peter Petzold und Gerd Haubensack (2001, 2004) publiziert. Die kognitive Strukturebene, ihre Modellierung und ihre Messung haben Erdmute Sommerfeld (1986, 1991, 1991a,

1994) sowie Erdmute Sommerfeld und Werner Krause (2013) dargelegt. Ich will mich hier auf die Mikrozustandsebene beschränken.

Wir gehen also von der allgemeinen Vorstellung einer Sequenz von Elementen aus. Für die Prozessanalyse in allen Ebenen gilt dann: Gesucht ist ein Operator Q, der das Element E_i in das Element E_j überführt.

Für die Handlungsebene wurden Handlungssequenzen im Problemraum durch die Transformation von Zuständen dargestellt: Gesucht ist ein Operator Q^H, der einen Zustand Z_i (z.B. eine bestimmte Scheibenkonstellation beim Problem „Turm von Hanoi“) in einen Zustand Z_j so überführt, dass z.B. der Zielabstand verringert wird.

Wenn sich ein Denkablauf in einer Handlungssequenz abbilden soll, dann müssten sich Eigenschaften des Denkablaufes in Eigenschaften des Handlungsablaufes niederschlagen, etwa im Ordnungsgrad einer Sequenz und damit in Zahlen ausdrückbar werden. Vermutlich liegt es an der hohen Komplexität und Mannigfaltigkeit der Einheiten auf der Handlungsebene, dass dieser Weg bisher nicht zum Erfolg geführt hat. Es herrscht Uneinigkeit darüber, was als Einheit (oder hier im üblichen Sprachgebrauch besser als Zustand im Problemraum) bei einer beliebigen Problemanforderung definiert werden soll.

Für die kognitive Strukturebene gilt entsprechend: Gesucht ist ein Operator Q^S, der eine kognitive Struktur S_i in eine kognitive Struktur S_j überführt, also den Wechsel von einer internen Repräsentation zu einer anderen internen Repräsentation erfasst. Bisher ist es möglich, für eine Klasse von Problemen eine ausgebildete kognitive Struktur in Abhängigkeit von einer gegebenen externen Repräsentation experimentell nachzuweisen. Für die aus einer vorliegenden kognitiven Struktur S_i erzeugte kognitive Struktur S_j in einer Sequenz, also für die Struktursequenz, müssen erst noch neue Messmethoden entwickelt werden. Damit entfällt (vorerst) auch auf der kognitiven Strukturebene die Analyse von Sequenzeigenschaften zur Messung geistiger Leistungen. Dagegen konnte für die Ausbildung kognitiver Strukturen in Abhängigkeit von einer gegebenen externen Repräsentation gezeigt werden, dass die Eigenschaft der Aufwandsreduktion zum Behalten dieser Struktur (im speziellen Fall die Anzahl von Merkmalen zum Behalten und Rekonstruieren einer kognitiven Struktur) durchaus ein Maß für geistige Leistungen sein könnte (Krause, Sommerfeld, Höhne und Sperlich, 1998; Krause, 1991; Sommerfeld, 1994).

Schließlich kann auch für die neurowissenschaftliche Ebene formuliert werden: Gesucht ist ein Operator Q^M, der einen Mikrozustand M_i (eine bestimmte elektrische Aktivation im Nervennetz) in einen anderen Mikrozustand M_j überführt. Mit diesem Prozess wollen wir uns hier im nachfolgenden befassen.

Wir wollen zunächst die Messgröße zur Erfassung der Elemente in der Sequenz betrachten und danach fragen, ob mit der EEG-Kohärenz tatsächlich Information gemessen wird (Teil 1), sodann die Elemente selbst, d.h., die Mikrozustände und ihre Eigenschaften (Teil 2). Es wird schließlich zu zeigen sein, dass mit dieser Art der Prozessanalyse auf dieser neurowissenschaftlichen Ebene aus den Verkettungseigenschaften nicht nur diagnostische Maße sondern auch Wirkprinzipien wie z.B. das Einfachheitsprinzip bestimmbar sind (Teil 3).

2. Informationsmessung

Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf die Messung des EEG. Traditionell basiert die EEG-Analyse auf der Amplitude des EEG-Signals. Es wird dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass sich der Informationsverarbeitungsprozess in der Amplitude bzw. Amplitudenänderung des EEG-Signals abbildet. Damit wird Information auf ein Leistungsmaß abgebildet, wenn man an das Amplitudenquadrat denkt. Streng genommen sollte jedoch Information mit einem Informationsmaß und Leistung mit einem Leistungsmaß gemessen werden. Wie steht es darum?

2.1 Leistung

Eine konventionelle Auswertung der EEG-Daten, wie sie etwa durch die Bestimmung der *„global field power“ (GFP)* (Lehmann, 1987) als räumliche Standardabweichung aller Amplitudenwerte zu jedem

Zeitpunkt über allen EEG-kanälen möglich ist, zeigt wohl Unterschiede zwischen zwei von uns gewählten Bedingungen, die wir als Begriffsaktivation versus Punktmustervergleich bezeichnen, erlaubt aber keine weitere Detailanalyse über die Ursachen dieser Unterschiede. Bei einer Begriffsaktivation beispielsweise muss eine Versuchsperson entscheiden, ob zwei Buchstaben A und a den gleichen Namen haben (abgekürzt: Na_Aa), bei einem Punktmustervergleich muss entschieden werden, ob zwei Punktmuster nach Garner (1970) gleich aussehen (abgekürzt: Aus_Ga). Eine Begriffsaktivation ist in diesem Fall nicht erforderlich. Diese klassischen Experimente zu Vergleichsprozessen gehen auf Posner und Mitchell (1967) zurück. Wir haben hier aus einer Menge von Bedingungsvariationen (Krause et al., 1997; 1998) zwei Fälle ausgewählt. Die Abbildung 1 zeigt den Verlauf der „Global field power“ für die beiden Bedingungen Begriffsaktivation Na_Aa und Punktmustervergleich Aus_Ga. (Die

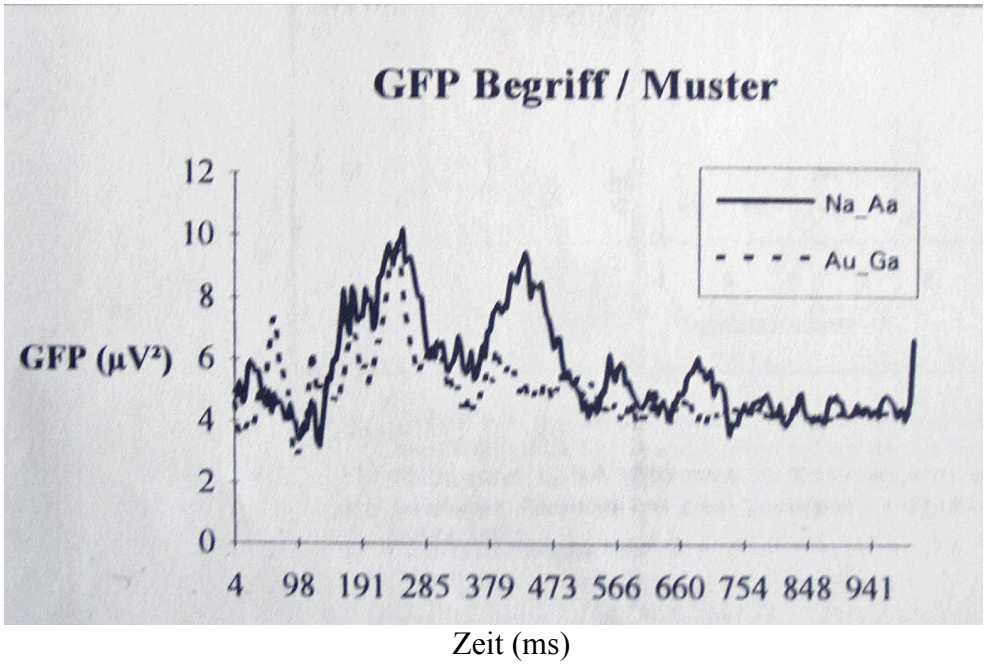


Abb.1: Global field power“ (GFP) für die Bedingungen Na_Aa (Begriffsaktivation) und Aus_Ga (Punktmustervergleich). (aus der Diplomarbeit von Heiko Tietze, 1996; siehe auch W.Krause (1997).Elementaranalyse von Gedächtnis – und Denkprozessen mittels EEG – eine experimentelle Studie; in G. Lüer & U. Lass (Hrgb.), Erinnern und Behalten. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht. Mit freundlicher Genehmigung des Verlages).

methodischen Details finden sich in Krause (1997)). Einen Gipfel bei 250 ms haben beide Kurvenverläufe gemeinsam. In der Bedingung Begriffsaktivation Na_Aa tritt zusätzlich noch ein Gipfel bei 420 ms auf und man wäre geneigt, von einer sensiblen Messgröße zu sprechen. Es wäre jedoch reine Spekulation, die gemeinsamen Gipfel als Ausdruck des gemeinsamen Informationsverarbeitungsprozesses bezeichnen zu wollen und den Gipfel bei 420 ms einer Begriffsaktivation zuzuordnen. Dennoch belegen zahlreiche Experimente die Sensibilität des Leistungsmaßes für kognitive Prozesse. Hier bedarf es einer Erklärung. Am Ende des nächsten Punktes wollen wir darauf zurückkommen.

2. 2 Synchronizität

Mit der „global field power“ wurde der Informationsverarbeitungsprozess auf ein Leistungsmaß abgebildet. Das ist zwar in der psychophysiologischen Praxis allgemein üblich, aber im strengen Sinn nicht korrekt, denn Leistung muss mit einem Leistungsmaß und Information mit einem Informationsmaß gemessen werden. Wir verwenden in eigenen Untersuchungen zur Analyse als Messgröße die EEG-*Kohärenz*. Die Kohärenzfunktion ist ein Maß für die lineare Anhängigkeit zweier EEG-Signale x(t) und y(t) über der Frequenz. Schack (1999) zeigt die Beziehung zwischen Kohärenz und negativer Entropie, also zwischen der gewählten Messgröße und der Information, die wir hier gekürzt wiedergeben (ausführlich in Krause (2000)).

Für zwei EEG-Signale x und y sind S_{xx} und S_{yy} die Autospektren der einzelnen Signale und S_{xy} das Kreuzspektrum beider Signale bzw. seine konjugiert komplexe Größe S_{yx}. Für die quadratische Kohärenz $\rho^2_{x,y}(\lambda)$ zweier Signale x und y mit der Frequenz λ gilt dann:

quadratische Kohärenz:

$$\rho^2_{x,y}(\lambda) = \frac{S_{xy}(\lambda)\cdot S_{yx}(\lambda)}{S_{xx}(\lambda)\cdot S_{yy}(\lambda)} = \frac{\left|S_{xy}(\lambda)\right|^2}{S_{xx}(\lambda)\cdot S_{yy}(\lambda)} \qquad (1)$$

Unser Ansatz beruht bei dieser Untersuchung auf der Kohärenz benachbarter Signale des EEG, der Auswertung der Synchronizität zwischen EEG-Signalen. Die Kohärenz ist dimensionslos. Zwischen der negativen Entropie $E^{neg}_{x,y}$, der übertragenen Information $-I_{x,y}$, und der quadratischen Kohärenz $\rho^2_{x,y}$ gibt Schack (Schack, 1997, 1999; Grießbach, 1990; Schack, Grießbach und Krause, 1999a,b; Krause, 2000) folgende Beziehung an:
negative Entropie:

$$E^{neg}_{x,y} = -I_{x,y} = -\int_0^{\lambda_{Nyq}} \ln\left[1-\rho^2_{x,y}(\lambda)\right] d\lambda \qquad (2)$$

Wir messen also mit der Kohärenz in der Tat *Information*. Gleichung (2) kennzeichnet den Zusammenhang zwischen der quadratischen Kohärenz und der negativen Entropie. Die Darstellung (2) der negativen Entropie zweier EEG-Signalen spiegelt das Postulat wider, dass Informationsübertragung bei Hirntätigkeit durch oszillatorische Tätigkeit in neuronalen Netzen erfolgt.

Im Normalfall wird zur Berechnung des Frequenzspektrums S einer Zeitfunktion, die zur Bestimmung der Kohärenz gemäß (1) erforderlich ist, eine bestimmte Zeit benötigt, die von der unteren Grenzfrequenz der Zeitfunktion abhängig ist. Bei einer unteren Grenzfrequenz von 1 Hz beträgt diese Zeit zur Erfassung der Frequenzeigenschaften des Zeitsignals 1 Sekunde. In dieser für die Berechnung des Frequenzspektrums notwendigen Zeit kann der kognitive Prozess nicht erfasst werden. Da sich jedoch kognitive Prozesse im Millisekundenbereich abspielen, würde sich eine solche Kohärenzanalysemethode für die Analyse kognitiver Prozesse verbieten.

Schack et al (1999) haben die negative Entropie aus EEG-Signalen für ein Begriffsaktivationsexperiment im fortlaufenden Prozess auf der Basis einer momentanen Kohärenzberechnung bestimmt. Die Experimente dazu wurden von Nicole Kotkamp (1998) durchgeführt. Im Begriffsaktivationsexperiment nach Posner und Mitchell (1967) wurden den Versuchspersonen nacheinander – mit einer bestimmten Zeitdifferenz – zwei Buchstaben gezeigt, z.B., ein großes A und ein kleines a, und sie sollten entscheiden, ob die beiden Buchstaben den gleichen Namen haben. Für diesen Begriffsaktivationsprozess messen Posner und Mitchell 658 ms auf der Verhaltensebene. In dieser Zeit ist zudem noch die Zeit für das Drücken einer Taste enthalten. Die tatsächliche Begriffsaktivationszeit muss also noch viel kürzer sein. Es ist offensichtlich, dass eine klassische Kohärenzanalyse, die beispielsweise zur Berechnung eines Wertes 1 Sekunde benötigt, den Begriffsaktivationsprozess nicht abbilden kann. In dem oben beschriebenen Experiment wurde die momentane Kohärenz nach einem von Schack (1997) eingeführten Ansatz berechnet, der eine hohe Zeit – und Frequenzauflösung erlaubt. Dieser Ansatz hat allgemeine *adaptive* Prinzipien zur Grundlage (Grießbach, 1990). Speziell basiert dieser Ansatz auf der Anpassung eines bivariaten linearen Modells (ARMA-Modell) mit zeitabhängigen Parametern und der parametrischen Berechnung der Spektraldichtematrix zu jedem Zeitpunkt n. Es wird also eine Parameterschätzung aus dem „Ruhe"-EEG vor dem eigentlichen Begriffsaktivationsprozess durchgeführt, die die Grundlage für die Berechnung der Auto – und Kreuzleistungsspektren bereits zu Beginn der Messung des ablaufenden kognitiven Prozesses darstellt. Während der Messung werden die Parameter korrigiert. Schack bestimmte aus der momentanen Spektraldichtematrix

zweier Signale $\{x_1(n)\}$ und $\{x_2(n)\}$ deren momentane Autoleistungsspektren $S_{1,1}(n,\lambda)$ und $S_{2,2}(n,\lambda)$ sowie deren Kreuzleistungsspektrum $S_{1,2}(n,\lambda)$ und damit das momentane Kohärenzspektrum $\rho_{1,2}^2(n,\lambda)$:

Momentanes Kohärenzspektrum:

$$\rho_{1,2}^2(n,\lambda) = \frac{|S_{12}(n,\lambda)|^2}{S_{11}(n,\lambda)\cdot S_{22}(n,\lambda)} \qquad (3)$$

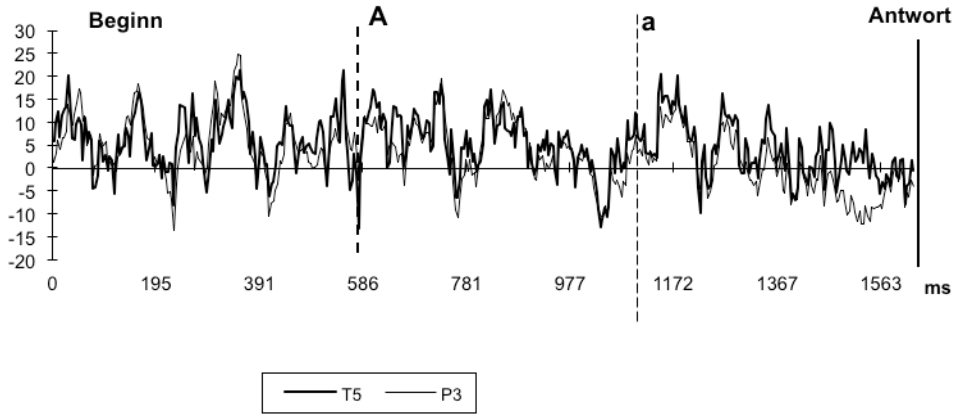
Daraus lässt sich der Zeitverlauf der negativen Entropie $E_{n;x,y}^{neg}[\lambda_1,\lambda_2]$ bezüglich eines Frequenzbandes $[\lambda_1,\lambda_2]$ berechnen:

Momentane negative Entropie:

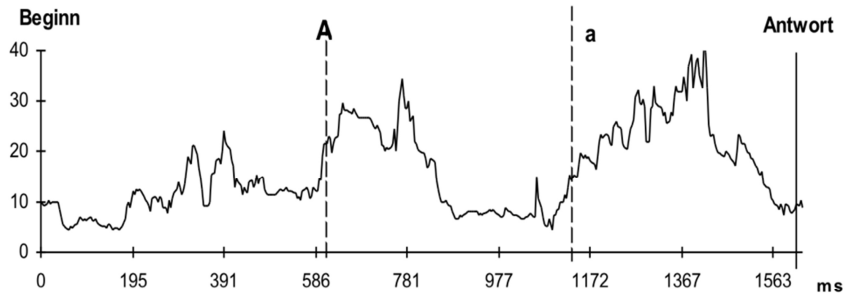
$$E_{n;x,y}^{neg}[\lambda_1,\lambda_2] = -\sum_{\lambda_1\le\lambda_k\le\lambda_2} \ln\left[1-\rho_{1,2}^2(n,\lambda_k)\right]\Delta\lambda \;\text{ mit }\; \Delta\lambda = \lambda_{k+1}-\lambda_k\,,\; n = 1,\ldots,N\,. \qquad (4)$$

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Abbildung 2 dargestellt.

EEG-Verlauf über dem Elektrodenpaar T5/P3 bei Begriffsaktivation



momentane negative Entropie (13-20 Hz) über T5/P3 bei Begriffsaktivation



momentane Kohärenz (13-20 Hz) über T5/P3 bei Begriffsaktivation

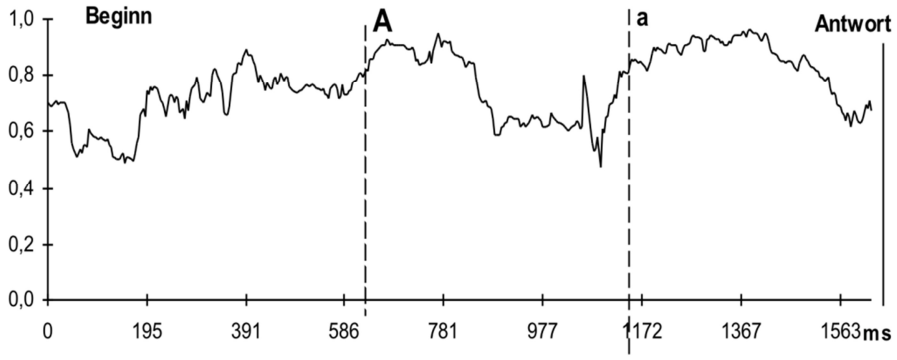


Abb.2: EEG-Signale, momentane negative Entropie und momentane Kohärenz als Funktion der Zeit in einem Begriffsaktivationsexperiment nach Schack (1999). Zu den beiden markierten Zeitpunkten werden ein großer (A) und ein kleiner Buchstabe (a) gezeigt und es soll entschieden werden, ob sie beide den gleichen Namen haben. Die Aktivation eines Namens (hier über dem Elektrodenpaar T5/P3) sollte mit dem Anstieg der negativen Entropie und dem der Kohärenz im Zusammenhang stehen. Das Elektrodenpaar T5/P3 befindet sich über dem Broca-Zentrum, das für Begriffsverarbeitung steht. Eine detailierte Zeit-Frequenz-Analyse der Kohärenzfunktion ergab eine besondere Sensibilität des Frequenzbereiches 13-20 Hz in Verbindung mit den oben beschriebenen kognitiven Elementarprozessen (Schack & Krause, 1995). (Aus W.Krause (2000). Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht. Göttingen: Hogrefe. Mit freundlicher Genehmigung des Verlages).

Die höhere negative Entropie und die höhere Kohärenz über dem Begriffsaktivationszentrum (T5/P3) unmittelbar nach dem Erscheinen der Buchstaben könnten für die Aktivation des Begriffes von A und a sprechen und könnten Ausdruck für die Sensibilität dieses Informationsmaßes für den kognitiven Prozess sein. Dies ist aber hier reine Spekulation. Im zweiten Teil kommen wir darauf zurück.

Mit der Verwendung des Kohärenzmaßes wird der kognitive Informationsverarbeitungsprozeß auf die Synchronizität zweier Signale abgebildet und dies ist eine Abbildung auf ein anderes Maß als die Amplitude. Noch ist nicht streng mathematisch gezeigt, welcher Zusammenhang zwischen der so bestimmten Kohärenz im EEG und dem Bindungsproblem der Hirnforschung (von der Malsburg, 1994; Engel, Brecht, Fries und Singer, 1998) besteht, es ist aber sehr wahrscheinlich, daß ein Zusammenhang zwischen EEG-Kohärenz und der kortikalen Synchronisation auf neuronaler Ebene existiert.

Plausibel ist, dass Information mit einem Informationsmaß gemessen werden muss, entsprechend Leistung mit einem Leistungsmaß. Vor diesem Hintergrund ist zunächst unplausibel, dass sich Informationsverarbeitung auch in einem Leistungsmaß abbildet, wie vielfach mittels „global field power“ (GFP) oder dem evozierten Potential (EP) bei der Analyse der menschlichen Informationsverarbeitung gezeigt worden ist. Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich leicht aufklären, wenn man daran denkt, wie die Erfassung der elektrischen Aktivität geschieht. Bei der klassischen EEG-Mesung sind die Elektroden über der Kopfhaut so verteilt, dass von jeder Elektrode eine Fläche von etwa 2,5 cm im Durchmesser erfasst wird. Die an der Oberfläche des Kopfes gemessene Amplitude des elektrischen Signales an jeder Elektrode entsteht als Summationseffekt der elektrischen Aktivität einer großen Anzahl von Neuronen und deren Verschaltungen. Wenn wir von 10^{10} Neuronen und 20 Elektroden ausgehen, dann ließen sich größenordnungsmäßig jeder Elektrode mehr al 10^{9} Neuronen mit ihren Verschaltungen zuordnen, ein immer noch hinreichend großes Netz, in dem es zu Überlagerungen kommen kann. Das Resultat der Überlagerung hängt von der Phasenverschiebung der Einzelsignale ab. Die überlagerte Amplitude an der Meßelektrode ist am größten, wenn die Phasenverschiebung zwischen den Einzelsignalen der Neuronen null ist, d.h., bei hoher Synchronizität, d.h., bei hoher Kohärenz. Vor diesem Hintergrund ist auch plausibel, warum sich Information auch in einem Leistungsmaß abbildet: durch diese Art der Messung geht eine hohe Amplitude mit einer hohen Synchronizität, d.h., einer hohen Kohärenz einher. Wenn sich Information in der Kohärenz abbildet, muß sie sich bei dieser Art der Messung auch in der Amplitue abbilden.

Zusammenfassend halten wir fest: Es gibt einen funktionellen Zusammenhang zwischen Kohärenz und Information. Mit der Kohärenz wird Information gemessen (Gleichung(2)). Die adaptive Kohärenz (Schack, 1997) erlaubt eine Prozessanalyse im Millisekundenbereich. Damit eröffnen sich ganz neue Messmöglichkeiten für kognitive Prozesse.

Es versteht sich dabei von selbst, dass es sich hier nur um Shannon – Information handelt. Bedeutungsbelegungen bleiben außen vor.

Literatur am Ende des Teiles 3.

Teil 2 : Topologie

- Ergebnisse der Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung

- neu betrachtet –

Zusammenfassung: Im Beitrag Teil 1 wurde gezeigt, dass Information über die Synchronizität zwischen EEG-Signalen gemessen werden kann. Im Teil 2 wird gezeigt, dass die Multimodalitätshypothese mit Hilfe der Topologie bestätigt werden kann. Im Teil 3 wird die Verarbeitung von Information beim Menschen als Markoffkette von Mikrozuständen, die auf zeitkonstanter Synchronizität zwischen EEG-Signalen basieren, abgebildet. Es wird experimentell belegt, dass sich im Grad der Verkettung von Mikrozuständen geistige Leistung ausdrückt, quantifizierbar als Entropiereduktion.

1. Anliegen

In der 5000 - jährigen Geschichte der Mathematik spielt der Wechsel der Darstellung von Aufgaben eine bedeutende Rolle. So kann z.B. die Zahl fünf

- durch eine Ansammlung von fünf realen Steinen oder
- durch verschiedene übliche Symbole für fünf Objekte: das Zahlwort „fünf“ oder etwa die Zeichen „5“ oder „V“

dargestellt werden (Zimmermann, 2003). Ein Kreis kann als Figur oder als Gleichung dargestellt werden.

Auch in der Gedächtnispsychologie spielt der Wechsel der Darstellungen eine Rolle. Engelkamp (1990) nennt sein Buch „Das multimodale Gedächtnis“ und konzentriert sich darin auf die Tatsache, dass Dinge besser behalten werden, wenn sie in mehreren Modalitäten präsent sind. Der Sachverhalt wird als Multimodalitätshypothese bezeichnet. Ein Gegenstand, als Bild und Wort gezeigt, wird sicherer reproduziert, als wenn er nur allein als Bild oder als Wort präsentiert worden wäre.

In der Denkpsychologie, speziell in der Hochbegabungsforschung, wird durch Verbalisierung gezeigt, dass mathematisch Hochbegabte mehrere Darstellungsformen einer Aufgabe intern ausgebildet haben: z.B. einen Kreis als „Bild“ und als Kreisgleichung. Dieser Befund auf der Verhaltens – bzw. Handlungsebene hat seine Entsprechung auch auf der neurowissenschaftlichen Ebene: Mathematisch Hochbegabte haben beide kortikalen Netzwerke aktiviert, jene für Formeln und diejenigen für bildhaft-anschauliche Vorstellungen (Krause, Seidel und Heinrich, 2003a; Krause, 2006). Soweit so gut. Diese Zustandsbetrachtung ist wegen ihrer mangelnden Eindeutigkeit – zu Recht – häufig kritisiert worden. Um dieser Kritik zu begegnen, haben wir diese Statusmethode um die Einführung einer funktionellen Abhängigkeit erweitert und zeigen, dass durch die Einführung einer „Psychophysischen Funktion“ die Mehrdeutigkeit der topologischen Aussage geringer wird.

Auf der Handlungsebene ist die Beschreibung aber noch wesentlich differenzierter: Heinrich (2003a, 2003b, 2003c) spricht vom Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung beim Lösen mathematischer Probleme und Klix (1992) sagt, Hochbegabte seien in der Lage, für gegebene Probleme geeignete Lösungsstrategien so auszuwählen, dass sie passen „wie der Schlüssel zum Schloss“. Mit solchen Beschreibungen auf der Handlungsebene werden nicht nur Darstellungsformen sondern auch Lösungsprozesse gekennzeichnet, deren Äquivalente auf der neurowissenschaftlichen Ebene bislang fehlen. Wir verwenden hier den Ansatz der Mikrozustandssequenzen – basierend auf

den von Lehmann (Lehmann et al. 1987) im Elektroenzephalogramm nachgewiesenen Mikrozuständen und werden Ideen und vorläufige Ergebnisse dafür vorstellen mit dem Ziel, zur Weiterführung anzuregen. Dies wird im Teil 3 dargestellt.

2. Warum eine topologische Analyse?

Die Leistung mathematisch Hochbegabter ist von je her faszinierend und es hat nicht an Erklärungsversuchen gefehlt, wenn beobachtet wird, dass ein mathematisch Hochbegabter beispielsweise die Aufgabe:

„ Wieviele Diagonalen hat ein Dreiundzwanzigeck ?“

in 6 Sekunden löst (Heinrich, 1997). Ein Erklärungsversuch zielt auf die Multimodalitätshypothese ab, die besagt, dass mathematisch Hochbegabte „Grundbausteine mathematischer Probleme“ in zwei Modalitäten (z.B. Kreis und Kreisgleichung) intern repräsentiert haben und je nach Lösungsaufwand das Problem in der einen oder anderen Modalität lösen können, während mathematisch Normalbegabte vorzugsweise nur eine Modalität aktiviert haben. Eine solche Hypothese lässt sich dadurch verifizieren, dass die zusätzlich aktivierten Modalitäten mathematisch Hochbegabter auch mit zusätzlich aktivierten kortikalen Arealen im neuronalen Netz einhergehen. Lässt sich auf der Handlungsebene nachweisen, dass gleichzeitig das Bild eines Kreises und die Kreisgleichung aktiviert sind, dann sollten auch die kortikalen Areale für „Rechnen“ und für „Bildverarbeitung“ gleichzeitig aktiviert sein. Am Beispiel der von Heinrich (1997) ausgewählten Mathematikaufgaben wollen wir diesen Grundgedanken der topologischen Analyse verdeutlichen. Die Abbildung 1 zeigt die verwendeten Aufgaben. Dabei steht der Begriff „eine Modalitätsstrategie“ für die Anwendung nur einer Modalitätsstrategie (Rechnen oder Bildverarbeitung) zum Lösen der Aufgabe und entsprechend der Begriff „zwei Modalitätsstrategien“ für die Möglichkeit, einunddasselbe Problem auf zweierlei Weise zu lösen, etwa durch das Lösen einer Gleichung („Rechnen“) oder durch geometrische Transformationen („Bildverarbeitung“). Für das Wort „rechnerisch“ verwenden wir teilweise auch das Wort „begrifflich“, weil sich dieser Ausdruck in der Gedächtnispsychologie als Gegensatz zum Ausdruck „bildhaft“ herausgebildet hat.

In Abbildung 1 dienen die Einmodalitätsstrategieaufgaben als Referenzanforderungen: die Addition einstelliger Summanden für das Rechnen und die mentale Navigation für die Bildverarbeitung. Bei dieser Aufgabe ist zu prüfen, ob man durch Anwedung der gegebenen Pfeile von einem Ausgangspunkt links unten vorn zu einem geforderten Punkt links oben hinten gelangen kann. Diese mentale Navigation geschieht in einer „bildhaft“-anschaulichen Vorstellung. In der unteren Zeile der Abbildung 1 sind drei Anforderungen gezeigt, die jeweils mit beiden Modalitätsstrategien lösbar sind. Die linke Aufgabe kann mit Hilfe des Satzes von Pythagoras gelöst werden („rechnerisch“) oder dadurch, dass eine zweite Diagonale in das Quadrat gelegt wird und die dabei entstehenden 4 Dreiecke nach außen geklappt werden. („bildhaft“). Die mittlere Aufgabe kann durch Zählen („rechnen“) oder durch Verschieben („bildhaft“) gelöst werden. Für die am Beginn des Abschnittes 2. gestellte Aufgabe zum 23-Eck benötigte eine unserer mathematisch hochbegabten Versuchspersonen – wie oben erwähnt - zur Lösung 6 Sekunden. Unterstellt man einen induktiven („rechnerischen“) Lösungsweg durch Schluß von einem Viereck, einem Fünfeck, einem Sechseck usw. auf ein 23-Eck, so dürfte dies wohl kaum in 6 Sekunden zu schaffen sein.

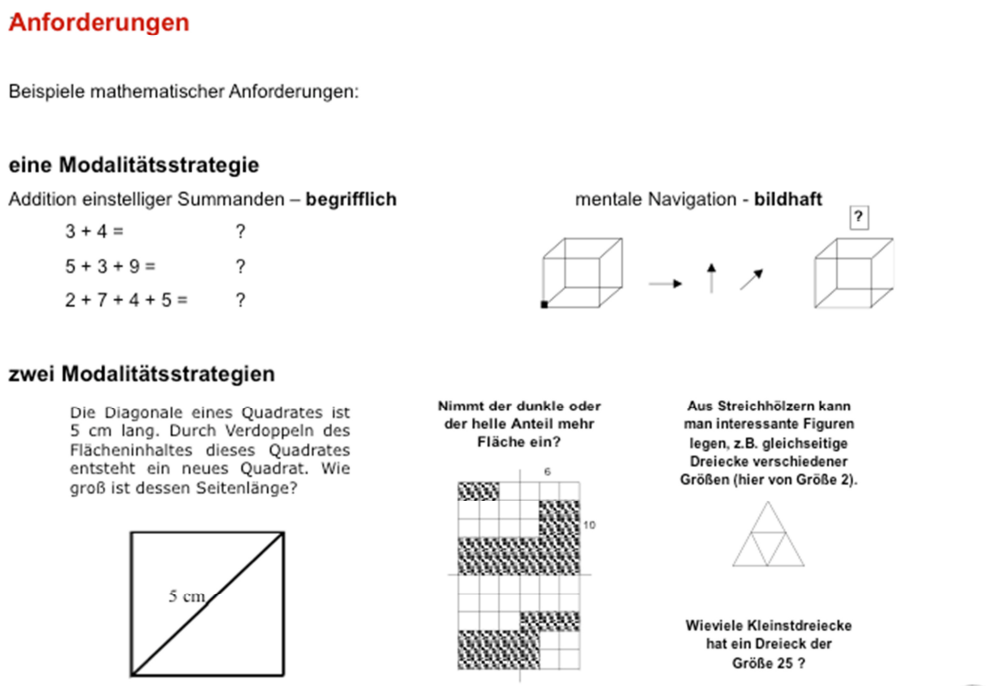


Abb.1: Die in den Untersuchungen verwendeten Matematikaufgaben, zusammengestellt von Heinrich (1997). Erläuterungen im Text.

Eine Befragung ergab, dass diese Versuchsperson sich ein Bild von einer Ecke vorstellte, die Anzahl der wegführenden Linien (22) bestimmte, davon die Diagonalen, dividiert durch 2 (10) und dies mit der Anzahl der Ecken multiplizierte.

Diese phänomenologische Interpretation auf der Verhaltensebene sollte – wenn sie denn zutreffen sollte – auch ihre topologische Entsprechung auf der neurowissenschaftlichen Ebene haben: Wenn wir – im Sinne der Verifikation der Modalitätshypothese - davon ausgehen, dass mathematisch Hochbegabte zwei Modalitäten und mathematisch Normalbegabte nur jeweils eine Modalität beim Lösen von „Zwei-Modalitätsstrategie-Aufgaben“ repräsentiert haben (zumindest zu Beginn des Lösungsprozesses der Aufgabe), dann sollten bei einer topologischen Analyse auf neurowissenschaftlicher Ebene bei mathematisch Hochbegabten zwei kortikale Areale und bei mathematisch Normalbegabten nur jeweils ein kortikales Areal aktiviert sein. Wie läßt sich das zeigen ?

3. Die traditionelle Vorgehensweise

Auf Donders (1889, Nachdruck 1969) geht die Substitutions – oder Subtraktionsmethode zurück, die die Bestimmung des Zeitverbrauches einer kognitiven Operation erlaubt. Um dies zu ermöglichen, wird die Zeitdifferenz zwischen zwei Anforderungen bestimmt, die sich in genau einer kognitiven Operation unterscheiden. Dabei wird vorausgesetzt, dass diese Anforderungen sich in den verbleibenden kognitiven Operationen nicht unterscheiden.

Diese – in den Neurowissenschaften nunmehr übliche – Differenzmethode wurde auch hier, getrennt für jede einzelne Versuchsperon angewandt. Bestimmt man bei einem mathematisch Hochbegabten die Topologie beim Lösen einer Zwei-Modalitätsstrategie-Aufgabe („rechnerisch“ und „bildhaft“, in Abbildung 1 beispielsweise die Aufgabe links unten) und zieht davon die Topologie beim Lösen einer Ein-Modalitätsstrategie-Aufgabe („rechnerisch“ in Abbildung 1 beispielsweise die Addition mit 3 und 4 Summanden) ab, dann sollte bei dieser Differenzbildung jenes kortikale Areal „übrigbleiben“, das für eine Bildverarbeitung zuständig ist, wie wir sie mit dem Umklappen von Dreiecken oben beschrieben haben. Bei mathematisch Normalbegabten dagegen sollte nach der Differenzbildung keine zusätzliche Aktivation zu beobachten sein, denn für diese Versuchspersonen

sollte auch bei Vorliegen von Zwei-Modalitätsstrategie-Aufgaben nur eine Strategie aktiviert sein, zumeist wird mit dem „Rechnen“ begonnen. Für das oben genannte Beispiel würde das etwa der Berechnung mit Hilfe des Satzes von Pythagoras entsprechen. Dabei wird natürlich unterstellt, dass sowohl beim Lösen der Additionsaufgabe als auch beim Rechnen mittels Pythagoras das gleiche kortikale Areal aktiviert wird. Die Topologie wurde über Kohärenzmaps aus einer EEG-Auswertung bestimmt.

Die EEG-Auswertung erfolgte mit der von Schack entwickelten adaptiven EEG-Kohärenzanalyse (Schack, 1997, 1999; Schack u.a. 1995, 1999a, 1999b). Die Kohärenz ist ist ein Maß für die Synchronizität zweier Signale. Hohe Kohärenz bedeutet hohe (synchrone) Aktivation. Es erfolgte eine Beschränkung auf benachbarte Elektrodenpaare und auf ein üblicherweise verwendetes Frequenzband von 13 bis 20 Hz. Bezüglich der EEG-Datenauswertmethode sei auf die genannte Literatur verwiesen. Die zeitliche Analyse beschränkte sich auf die erste Sekunde nach dem Instruktionsverstehen. Der 800 ms Startpunkt (und nicht Null ms) ist methodischen Bedingungen der adaptiven EEG-Kohärenzanalyse geschuldet. Das Analyseintervall von 1200 ms ist willkürlich gewählt worden. Dabei spielte auch die Beherrschung großer Datenmengen eine Rolle. Die Abbildung 2 zeigt die gemittelten Differenzkohärenzmaps für mathematisch Normal – und Hochbegabte beim Lösen von mathematischen Anforderungen („zwei Modalitätsstrategien (2M) minus eine Modalitäts-strategie (1M) “).

Der Befund in Abbildung 2 besagt, dass innerhalb der ersten Sekunde nach dem Instruktionsverstehen bei Hochbegabten bereits jene Hirnregionen aktiviert sind, die für beide Modalitäten verantwortlich sind, wohingegen in der Stichprobe der Normalbegabten zu diesem Zeitpunkt - innerhalb der ersten Sekunde nach dem Instruktionsverstehen – eine bildhaft-anschauliche Modalitätsstrategie in der Stichprobe der Normalbegabten (noch) nicht verfügbar ist.

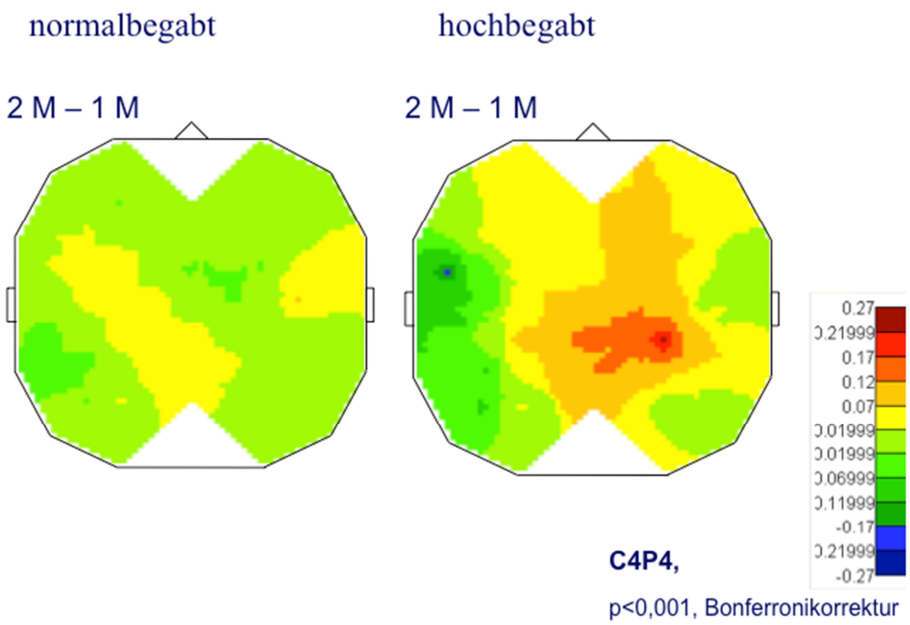
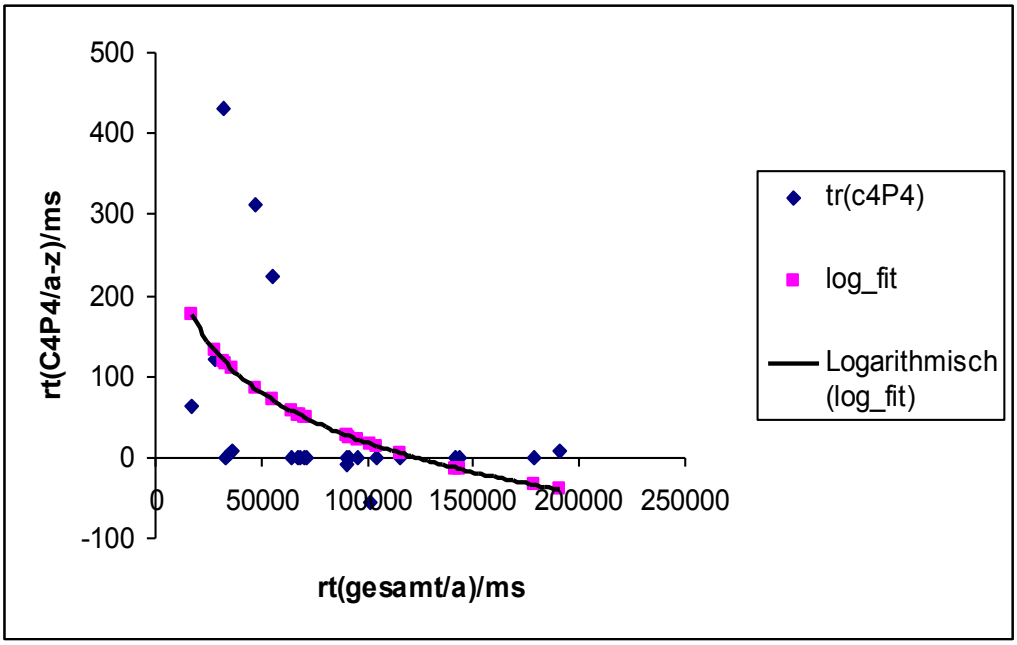


Abb 2: Gemittelte Differenzkohärenzmaps beim Lösen mathematischer Anforderungen („zwei Modalitäts-strategien (2M) minus eine Modalitätsstrategie (1M) “) für Normal – und Hochbegabte. Die Kohärenzdifferenz von 0,27 über dem Elektrodenpaar C4P4 (der rote Fleck centroparietal rechts) ist signifikant (p < 0,001, Bonferronikorrektur). Die Skala der Kohärenzwerte: von +0,30 (dunkelrot) bis -0,30 (dunkelblau). (Abbildung aus Krause, Seidel und Heinrich, 2003; mit freundlicher Genehmigung des Erhard Friedrich Verlages, Seelze.) Jede der 14 normal- und hochbegabten Versuchspersonen wurde einzeln ausgewertet und im Hinblick auf die Differenz zwischen der Menge der beiden Anforderungen auf Signifikanz geprügt. Bei 12 von 14 Hochbegabten fand sich ein signifikanter Unterschied über dem Elektrodenpaar C4P4. Über diese 12 Hochbegabten erfolgte die Mittelung der Maps. Bei den Normalbegabten fand sich kein signifikanter Unterschied.

Und dennoch kommen Zweifel, denn das oben angegebene Postulat von Donders ist im strengen Sinn nicht erfüllt: die beiden gewählten Anforderungen („eine Modalitätsstrategie versus zwei Modalitätsstrategien“) unterscheiden sich zwar in genau einer Modalität. Ob jedoch die kognitiven Operationen in der gemeinsamen Modalität vollkommen identisch sind – wie das vom Postulat gefordert wird – ist nicht streng nachgewiesen. Um es am Beispiel zu sagen: ob die Addition von Summanden kognitiv und neuronal den Rechenoperationen beim Anwenden des Satzes von Pythagoras äquivalent sind, ist offen. Wir verschärfen deshalb die Auswertung und verlangen zusätzlich das Zeigen einer funktionalen Abhängigkeit der Daten auf der Handlungsebene von den Daten auf der neurowissenschaftlichen Ebene.

4. Die Bestimmung einer „psychophysischen“ Funktion zwischen der Handlungs – und der neurowissenschaftlichen Ebene

Gehen wir wieder von Plausibilitätsüberlegungen aus. Die in Abbildung 1 gezeigten Mathematikaufgaben sind von Heinrich (1997) so ausgewählt worden, dass bei Nutzung einer bildhaft-anschaulichen Strategie die Lösungszeit verkürzt werden kann im Vergleich zu einer rechnerischen Strategie. Um eine Hypothese über eine Funktion zwischen Handlungsebene und neurowissenschaftlicher Ebene aufstellen zu können, betrachten wir zwei Extremfälle: (1) Wird eine bildhaft-anschauliche Strategie verwendet, dann sollte die Aktivationszeit über dem für die Bildverarbeitung zuständigen kortikalen Areal lang und die Lösungszeit kurz sein. (2) Wird keine bildhaft-anschauliche Strategie verwendet, dann sollte die Aktivationszeit über dem für die Bildverarbeitung zuständigen kortikalen Areal kurz oder Null sein und die Lösungszeit lang. Eine „psychophysische Funktion“, die die Aktivationszeit des für die Bildverarbeitung zuständigen kortikalen Areals als Funktion der Lösungszeit erfasst, sollte demnach einen negativen Anstieg aufweisen, während über allen anderen kortikalen Arealen kein funktioneller Zusammenhang zu erwarten ist. Die Differenzbildung zwischen einer Zwei-Modalitätsstrategieaufgabe (in den Diagrammen in Abbildung 3 und Abbildung 4 mit a bezeichnet) und einer Ein-Modalitätsstrategieaufgabe (in den Diagrammen in Abbildung 3 und Abbildung 4 mit z bezeichnet wegen der Beschränkung auf die Addition von Ziffern) wird dabei immer vorausgesetzt. In Abbildung 3 ist eine so bestimmte „psychophysische Funktion“ rechts centroparietal (über dem Elektrodenpaar C4P4) dargestellt.



R2=0.22	F=5.9	sgn F=0.023
beta=-0.47	T=-2.44	p=0.023
konst.=1047	T=2.559	p=0.018

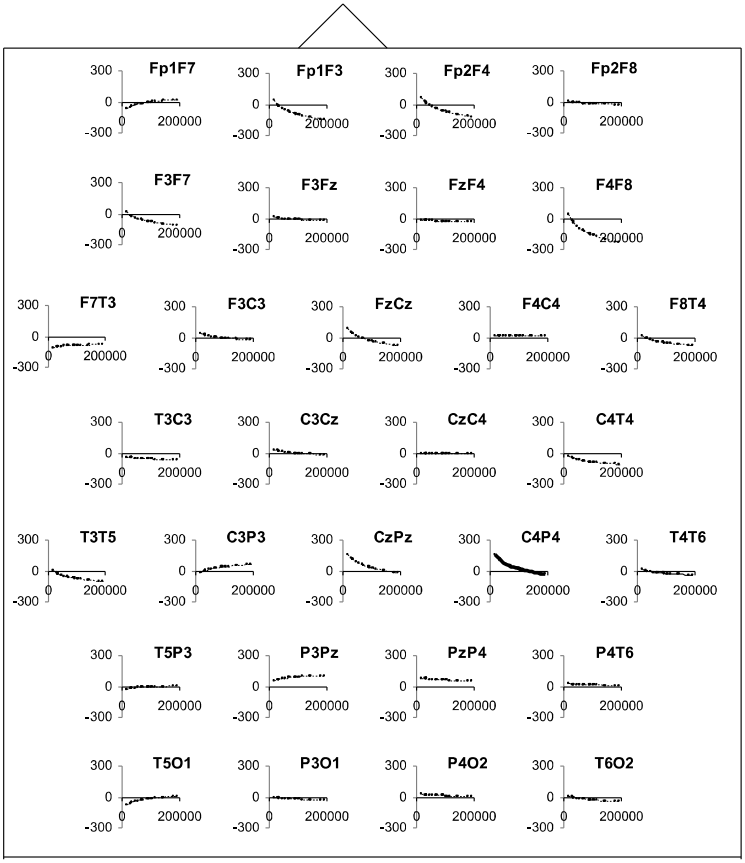
Abb.3: Aktivationszeitdifferenz rt(C4P4/a-z) beim Lösen von Zwei-Modalitätsstrategieproblemen (a) minus Ein-Modalitätsstrategieaufgaben (z) über dem Elektrodenpaar C4P4 in Abhängigkeit von der Lösungszeit rt(gesamt/a) bei Zwei-Modalitätsstrategieproblemen. Jeder dunkelblaue Punkt (tr(C4P4)) im Diagramm steht für gemessene Zeitdifferenzen einer Versuchsperson. (Abbildung aus Krause, Seidel und Heinrich, 2003; mit freundlicher Genehmigung des Verlages Erhard Friedrich Verlag, Seelze.)

Der negative Anstieg der angepassten Funktion ist signifikant von Null verschieden (B = - 79,6; p = 0,038). Die Abbildung 4 zeigt die „psychophysische Funktion“ für alle Elektrodenpaare.

Das Erwartete tritt auf. Die „psychophysische Funktion“, die die Aktivationszeit über dem Elektrodenpaar C4P4 in Abhängigkeit von der Lösungszeit darstellt, weist einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang für dieses Analyseintervall der ersten Sekunde auf. Je länger dieses ausgewählte kortikale Areal – in diesem frühen Zeitabschnitt – aktiv ist, umso kürzer ist die Lösungszeit.

Die Funktion in Abbildung 4 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.

Wir deuten diesen Befund so, dass eine frühzeitige längere Aktivation der für eine bildhaft anschauliche Modalitätsstrategie verantwortlichen kortikalen Areale die Lösungszeiten verkürzt. Dies unterstreicht den Einfluß der frühzeitigen Verfügbarkeit von Strategien auf die Lösungszeit und stellt eine Erklärungsmöglichkeit dar, warum Hochbegabte kürzere Lösungszeiten aufweisen.



Nur bei C4P4 ist der negative Anstieg signifikant.

Abb 4: *Die „psychophysische Funktion" in Abbildung 3 für alle Elektrodenpaare. Nur beim Elektrodenpaar C4/P4 ist der negative Anstieg signifikant von Null verschieden. Alle anderen angepaßten Kurven über den Elektrodenpaaren zeigen keinen systematischen Zusammenhang zwischen der jeweiligen Aktivationszeit und der Lösungszeit.*

Die Verarbeitungszeit in Abbildung 4 ist ganz offensichtlich keine unabhängige Variable einer Versuchsperson. Um dies zu erreichen müsste z.B. ein Lernprozess eingeführt werden, durch den die Verarbeitungszeit für jede einzelne Versuchsperson verkürzt werden könnte. Dies muss zukünftiger Forschung vorbehalten bleiben.

Zusammenfassend halten wir fest: Es läßt sich ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Handlungsebene und der neurowissenschaftlichen Ebene herstellen, eine „psychophysische Funktion" (Abb.3). Hiermit läßt sich die Multimodalitätshypothese bestätigen.

Literatur am Ende von Teil 3.

Teil 3 : Mikrozustandssequenzen

- Ergebnisse der Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung

- neu betrachtet -

Zusammenfassung: Im Beitrag Teil 1 wurde gezeigt, dass Information über die Synchronizität zwischen EEG-Signalen gemessen werden kann. Im Teil 2 wurde gezeigt, dass die Multimodalitätshypothese mit Hilfe der Topologie bestätigt werden kann. Im Teil 3 wird die Verarbeitung von Information beim Menschen als Markoffkette von Mikrozuständen, die auf zeitkonstanter Synchronizität zwischen EEG-Signalen basieren, abgebildet. Es wird experimentell belegt, dass sich im Grad der Verkettung von Mikrozuständen geistige Leistung ausdrückt, quantifizierbar als Entropiereduktion.

1. Anliegen

Das Messen geistiger Leistungen ist nach wie vor ein Problem. Es ist zu zeigen, dass sich geistige Leistung in der Ordnung von Mikrozustandssequenzen abbilden lässt und so als Entropiereduktion messbar wird. Wir greifen damit auf einen von Clausius (1865) vor ca. 150 Jahren in die Physik eingeführten Begriff zurück, der später als ein Maß für die Unordnung weiterentwickelt wurde: die Entropie. Werner Ebeling (2015) hat kürzlich in einem Vortrag in der Leibniz-Sozietät die historische Entwicklung dieses Begriffes und seine Universalität für die Wissenschaft dargelegt.

Mikrozustände (Lehmann, 1987) sind zeitlich stabile Aktivationszustände im Gehirn. Mikrozustandssequenzen werden als Markoffketten aufgefasst und ihre Eigenschaften differentiell berechnet.

Eine Literaturrecherche unter dem Stichwort „Microstates“ in den Suchmaschinen „PsyInfo“ und „PubMed“ über die letzten 25 Jahre ergab eine Anzahl von 128 Beiträgen. Es fand sich darin kein Beitrag zur Erfassung der Entropie bzw. Entropiereduktion in Mikrozustandssequenzen. Dies bestärkt uns in der Absicht, mit diesem Text die Wiederholung der Untersuchungen zu diesem Ansatz einzufordern.

Wir gehen in diesem Text wie folgt vor: zuerst werden die *Mikrozustände* und ihre Eigenschaften beschrieben, sodann die Abbildung kognitiver Prozesse auf Eigenschaften der Mikrozustände. Danach betrachten wir *Mikrozustandssequenzen* und ihre Eigenschaften und berichten über die Abbildung kognitiver Leistungen auf Sequenzeigenschaften der Mikrozustände.

2. Mikrozustände und ihre Eigenschaften

Für beide EEG-Maße (vgl. Teil 1), zunächst für die Leistung und später für die Kohärenz, betrachten wir Mikrozustände und ihre Sequenzen.

2.1 Mikrozustände auf der Basis von Isopotentiallinien

Auf Lehmann und Strick (Lehmann, Ozaki & Pal, 1987; Strick & Lehmann, 1993; Strick, 1993) geht eine EEG-Analysemethode zurück, die unter dem Begriff „Segmentierung“ bekannt geworden ist und gelegentlich von Lehmann als eine Methode zur Bestimmung der „Atome des Denkens“ bezeichnet wird. Solche Mikrozustände – als Segmente bezeichnet – sind aus Mapsequenzen bestimmbar. Ein Map ist die Aktivationsverteilung über der Topographie. Der Grundgedanke ist folgender: Jede gemessene Potentialverteilung über dem Elektrodenfeld ist zu jedem Zeitpunkt als Map über Isopotentiallinien darstellbar. Nach einem zu definierenden Kriterium wird die Ähnlichkeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Maps bestimmt. Unterschreitet dieses Ähnlichkeitskriterium einen bestimmten Wert, wird eine Segmentgrenze gesetzt. Die Segmentdauer eines Segmentes ist die Zeit zwischen zwei benachbarten Grenzen. Eine solche Folge ähnlicher Maps wird Segment genannt und als Mikrozustand interpretiert. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Maps besteht in der Ermittlung der Lage von Schwerpunkten der Potentialverteilung, sogenannter Centroide. Zwei aufeinanderfolgende Maps sind sich z.B. ähnlich, wenn ihre Centroide ein vorher definiertes Fenster nicht verlassen.

In diesen zeitlich stabilen Segmenten, wie Lehmann sie nennt, muss sich jeweils ein bestimmter Informationsverarbeitungsprozess abspielen.

Mit dieser Methode lassen sich für jede beliebige Anforderung Sequenzen zeitlich stabiler Elemente bestimmen. Tietze (1996) konnte mit Hilfe dieser Methode und einem von Strick (1993) entwickelten Softwarepaket Begriffsaktivation von Mustervergleich unterscheiden und zeigen, dass die Codierung von Information in ausgezeichneten Segmenten erfolgt. Wir gehen unter 3. darauf ein.

2.2 Zeiteigenschaften der Mikrozustände

Tietze (1996) bestimmte die Häufigkeitsverteilung der Segmentdauern (Dauer der Mikrozustände) nach der unter 2.1 beschriebenen Methode von Lehmann und Strick. Die nachfolgende Betrachtung der Segmentdauerverteilung basiert damit auf der Global field power, also auf der Leistung als

Meßgröße. Die Segmentdauerverteilung wurde für Begriffsaktivation (Na-Aa) und Mustervergleich (Au-Ga) bestimmt. Darüber hinaus wurde das Histogramm der Segmentdauern für zwei weitere Vergleichsexperimente bestimmt: (Na-AA und Au-AA). Im ersten Fall wurde gefragt, ob die identischen Buchstaben den gleichen Namen haben. Die Anforderung ist offensichtlich ohne Begriffsaktivation zu lösen. Im zweiten Fall handelt es sich um einen Buchstabenvergleich, der ebenfalls ohne Begriffsaktivation lösbar ist (Experiment siehe auch Teil 1).

Die Verteilung der Segmentdauern für das Frequenzband 2 – 30 Hz ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Abbildung 2 zeigt das Histogramm für unterschiedlich schmale Frequenzbänder. Die

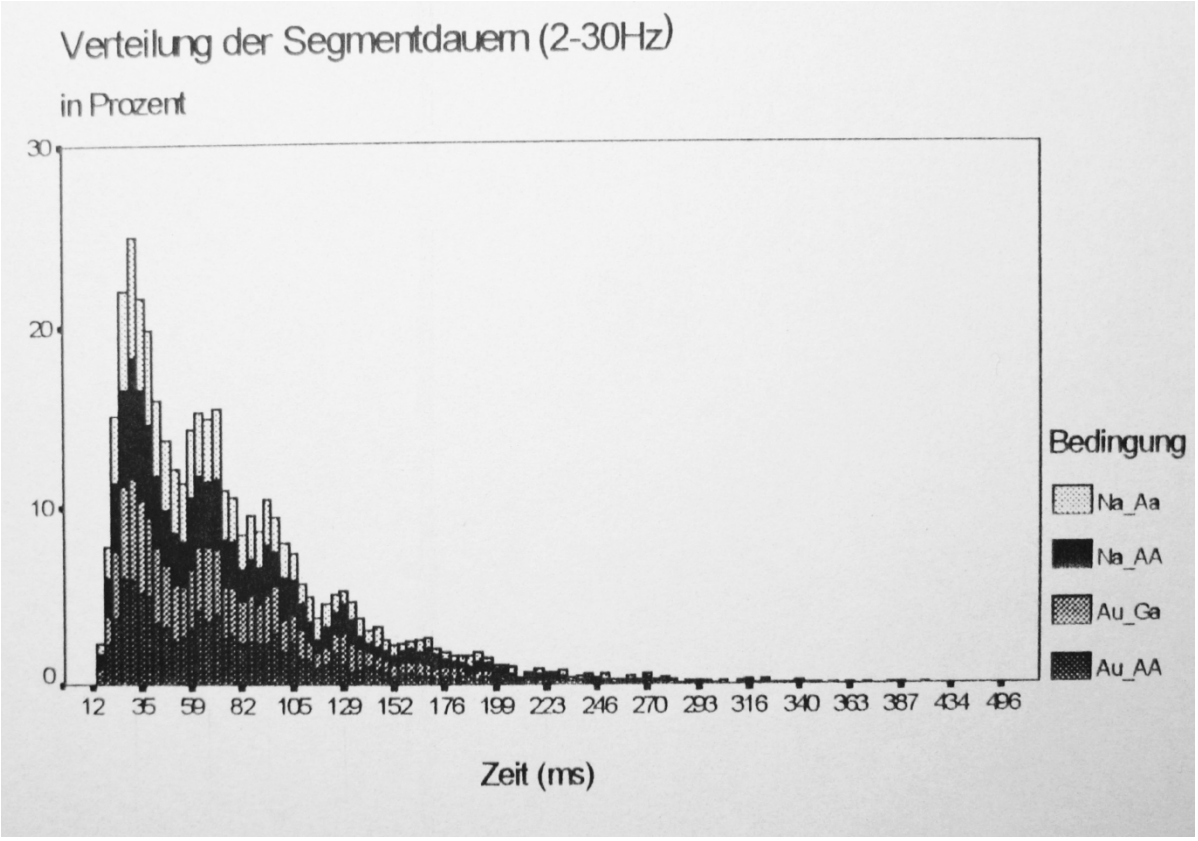


Abb.1: Relative Häufigkeit (%) der Segmentdauern als Funktion der Zeit für die vier Bedingungen Na-Aa, Na-AA, Au-Ga und Au-AA im Frequenzbereich 2 – 30 Hz (Tietze, 1996). (Aus W. Krause, Elementaranalyse von Gedächtnis- und Denkprozessen mittels EEG – eine experimentelle Studie; in G. Lüer und U. Lass (Hrgs.), Erinnern und Behalten, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1997. Mit freundlicher Genehmigung des Verlages).

Anforderungen Na-Aa, Na-AA, Au-Ga und Au-AA sind Parameter. Die Verteilung der Segmentdauern ist für alle vier Anforderungen quasi diskret. Es ist natürlich selbstverständlich, dass die diskreten Verteilungen mit schmalerer Bandbreite der Frequenz schärfer werden müssen. Die Abbildung 2 soll die Diskretisierung nochmals deutlich unterstreichen. Die Maxima der Verteilung in Abbildung 1 finden sich bevorzugt bei 32 ms und bei ganzzahligen Vielfachen davon: 64 ms, 96 ms, 144 ms, usw. Die hier gemessene kleinste Zeitdauer von 32 ms ist zwar das Siebenfache des Geißlerschen Zeitquants von 4,56 ms, jedoch muss man beim absoluten Vergleich der aus dem EEG bestimmten diskreten Zeitdauern mit der Zeitquantenhypothese von Geißler (1991, 1992, 1994) Zurückhaltung üben, denn die Segmentdauern werden hier durch eingeführte Restriktionen bestimmt (vgl. Ähnlichkeitskriterium gemäß Punkt 2.1). Dessen ungeachtet unterstreicht der Befund die Kopplung zwischen den Ebenen, der Handlungsebene, in der Geißler seine Daten erhoben hat, und der neurowissenschaftlichen Ebene. In beiden Ebenen liegt eine Diskretisierung kognitiver Elementarprozesse vor.

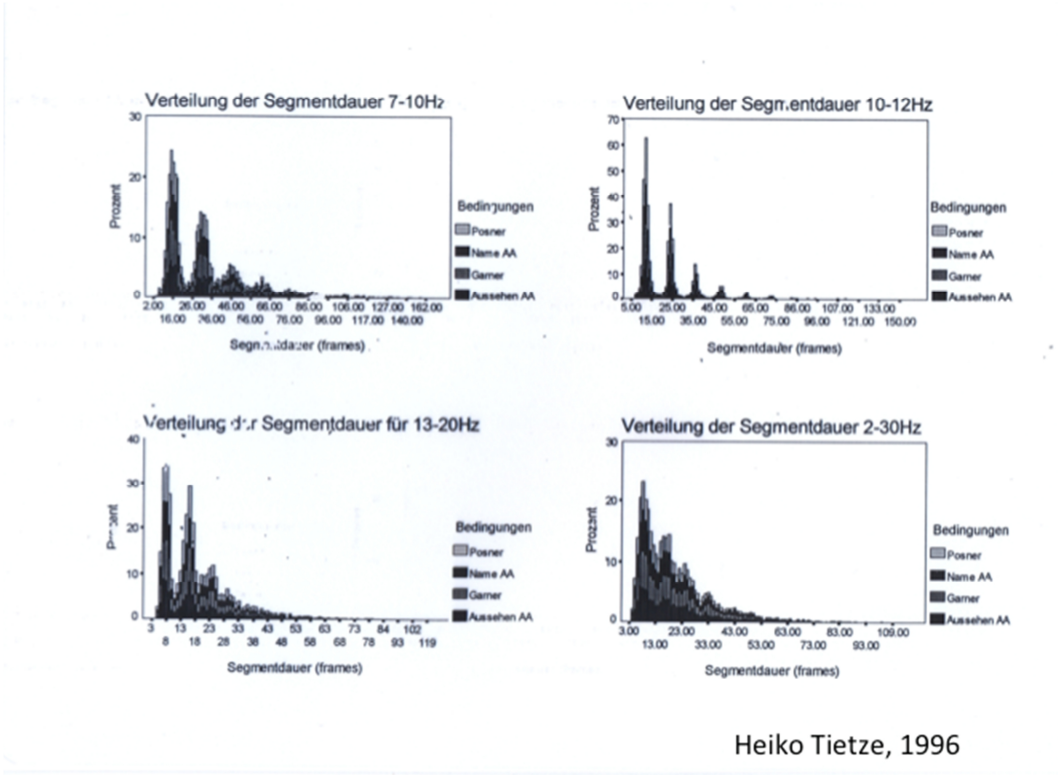


Abb. 2: Relative Häufigkeit (%) der Segmentdauern für vier Frequenzbänder analog Abbildung 10 (Tietze, 1996) Auf der X-Achse sind die Anzahlen der Frames (Abtastpunkte) aufgetragen. Ein Frame steht für 3,91 Millisekunden.

Nach diesem von Tietze erhobenen Befund haben die zeitlich stabilen Segmentdauern eine Zeit von 32 ms und ganzzahlige Vielfach davon. Man muss sich noch einmal die Bedeutung dieser Aussage für den Informationsverarbeitungsprozess verdeutlichen: In solchen diskreten Zeitabschnitten ist die Aktivation über der Topographie konstant. In diesen „konstanten“ Zeitabschnitten sollte Information verarbeitet werden, sollte die Codierung von Information geschehen. Kann man das nachweisen und sind bestimmte Segmentdauern (Mikrozustandsdauern) diesbezüglich ausgezeichnet?

3. Abbildung kognitiver Prozesse auf Eigenschaften der Mikrozustände: Codierung

Segmentdauer und Lage hochaktivierter Zentren: Mit der Methode der Segmentierung kann für jedes Segment die mittlere Positionierung der Centroide bestimmt werden. Damit sind die Segmente durch zwei Eigenschaften ausgezeichnet: durch die Zeitdauer und die Lage ihrer Schwerpunkte (Centroide) im elektrischen Feld. Für die Lokalisation wird ein 5 mal 5 Koordinatensystem verwendet, das durch das 10-20 System der Elektrodenplazierung bestimmt wird. Die Koordinaten 1/1 kennzeichnen die Position links frontal, die Koordinaten 4/4 eine Position rechts temporoparietal. Durch die Koordinaten 3/3 ist die Elektrode Cz (im Zentrum) bezeichnet. Da die elektrische Potentialverteilung positive und negative Werte annehmen kann, werden jeweils 2 Centroide bestimmt, die die Lage eines Dipols festlegen. Tietze hat zunächst die Position der Centroide für jedes Segment und für die beiden Bedingungen Begriffsaktivation Na-Aa und Punktmustervergleich Au-Ga, gemittelt über alle Segmentdauern, bestimmt und findet die erwartete Linksverschiebung der Centroide im 3. und 4. Segment bei Begriffsaktivation Na-Aa gegenüber Mustervergleich Au-Ga, wohingegen in anderen Segmenten davor und danach kein signifikanter Lageunterschied zu beobachten ist. Die beobachtete

Linksverschiebung (wegen der Sprachverarbeitung linkshemisphärisch) entspricht der Erwartung. Unbefriedigend ist die geringe Effektstärke (0,3) der signifikanten Unterschiede der Centroidenpositionierung, sodass eine Reanalyse angeraten erscheint.

Basierend auf der diskreten Verteilung der Segmentdauern hat Tietze in einer zweiten Auswertung eine Beschränkung auf die Segmentdauer von 94 ms (diese Zeit entspricht dem 3. Maximum in der Verteilung der Segmentdauern nach Abbildung 1 mit einer Streubreite zwischen 78 ms und 110 ms) vorgenommen. Die genaue Methodik (Material, Versuchsdurchführung, Stichprobe, Datenerhebung und Datenauswertung) findet sich in Tietze (1996, vgl. auch Krause (1997)). Die Abbildung 3 zeigt das Ergebnis. Es ergeben sich signifikante Unterschiede der

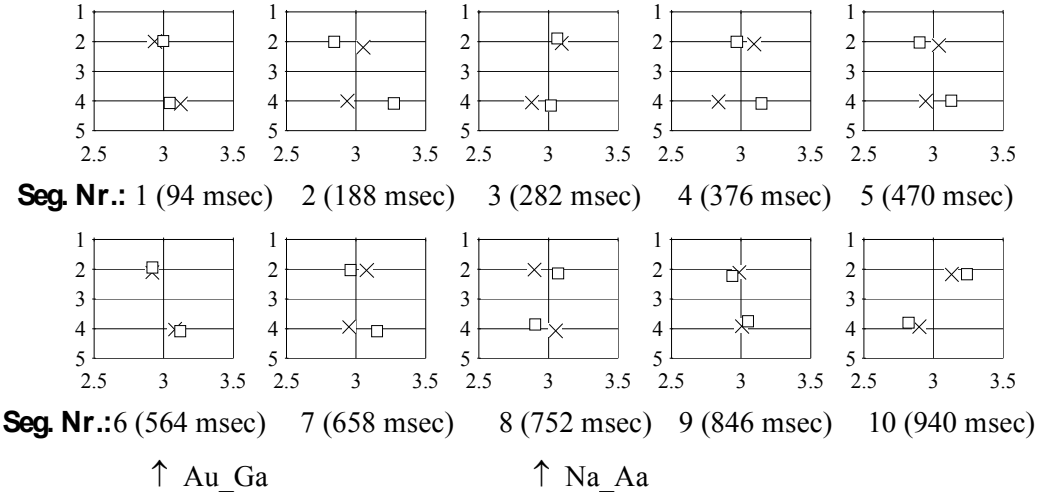


Abb. 3: Centroidenpositionen bei Begriffsaktivation (Na_Aa) und Punktmustervergleich (Au_Ga) in aufeinanderfolgenden Segmenten mit einer Segmentdauer von 94 ms (nach Tietze, 1996). Die Koordinaten nehmen in x- und y-Ausdehnung Werte zwischen 1 und 5 an. Die Koordinaten 1,1 kennzeichnen ein Gebiet links frontal, die Koordinaten 5,5 ein Gebiet rechts temporoparietal. Die x- und y-Koordinaten sind nicht äquidistant. Das Kreuz steht für die Begriffsaktivation, das Quadrat für den Mustervergleich und die Pfeile für den Zeitpunkt der Antwort. (Aus W. Krause, (2000). Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht. Göttingen: Hogrefe-Verlag. Mit freundlicher Genehmigung des Verlages).

Centroidenpositionen zwischen den beiden Bedingungen Begriffsaktivation und Mustervergleich im 2. und 4. Segment. Möglicherweise beginnt die Begriffsaktivation mit dem 2. Segment und ist spätestens nach dem 4. Segment abgeschlossen. Im Vergleich zu der oben angeführten Mittelung über alle Segmentdauern ist jetzt bei der Betrachtung nur einer Segmentdauer von 94 ms die Distanz zwischen den Centroidenpositionen der beiden Bedingungen deutlich größer geworden. Die Centroide für die Begriffsaktivation sind weiter nach links gerückt.

Offensichtlich tritt der Unterschied zwischen den beiden Bedingungen deutlicher hervor, wenn sich die Auswertung nur auf die 94 ms - Segmentdauer bezieht. Kürzere Segmentdauern tragen nach diesem Befund möglicherweise weniger zu diesem Informationsverarbeitungsprozess bei. Über die längeren Segmentdauern gibt es noch keine Aussagen. Anders ausgedrückt: für die Aktivation eines Begriffes bedarf es mindestens eines Segmentes von mindestens ca 100 ms Dauer. Kürzere Segmentdauern genügen dieser Art der semantischen Codierung offenbar nicht. Es ist zweifelsohne notwendig, diese Befunde weiter zu prüfen.

Auf der Handlungsebene finden Klix (1992) sowie van der Meer und Schmidt (1992) eine Mindesterkennungszeit von 226 ms für eine Merkmalsdifferenz beim Vergleich von Begriffspaaren. Generalisiert man diese Zeit als Zeit für eine kognitive Operation auf der Handlungsebene bei Begriffsaktivation, dann bedarf es offenbar mindestens zweier Segmente mit einer Segmentdauer von ca. 100 ms auf der neurowissenschaftlichen Ebene, um diese Zeit auszufüllen. Hat diese Verdoppelung etwas mit der Erhöhung der Übertragungssicherheit in der menschlichen Informationsverarbeitung zu tun?

Trotz hoher Taktfrequenzen sowohl auf der Handlungsebene (Geißler) als auch auf der neurowissenschaftlichen Ebene (Tietze) bedarf es einer Mindestzeit für die Codierung bei Begriffsaktivation bzw. Merkmalsvergleich auf beiden Ebenen.

Tietze hat diese Auswertung der Segmentierung und Centroidenpositionsbestimmung auch für zwei Vergleichsprozesse durchgeführt, die keine Begriffsaktivation erfordern; genauer: ein Buchstabenvergleich (Au-AA) und eine „Nichtbegriffsaktivation" bei identischen Buchstaben (Na-AA). Für diese beiden Bedingungen sollten sich die Centroide im hinteren Bereich (dorsal) nicht unterscheiden, da beide Anforderungen ohne die Aktivation eines Begriffes bewältigt werden können. Dies ist auch der Fall.

Zusammenfassend halten wir fest: Zur Codierung semantischer Information - hier der Begriffsaktivation - sind Segmente (Mikrozustände) längerer Dauer - hier mindestens ca. 100 ms - erforderlich. Segmente mit kürzerer Segmentdauer tragen diese Art der Codierung offenbar weit weniger. Ein Nachweis, dass in den Mikrozuständen semantische Information verarbeitet wird, kann also erbracht werden, wenngleich es weiterer Untersuchungen bedarf.

4. Mikrozustandssequenzen und ihre Eigenschaften

4.1 Anzahl der Mikrozustände, Alphabet

Informationsübertragung zwischen Neuronen oder neuronalen Zellverbänden im Nervennetz ist offenbar verbunden mit hoher synchroner Oszillation der elektrischen Signale, die über diesen kortikalen Arealen gemessen werden. Mit der von Grießbach eingeführten adaptiven Signalanalyse und der von Schack (Schack, 1997, 1999) eingeführten adaptiven EEG-Kohärenzanalyse konnten Schack et. al. (1999a,1999b,1999c) zeigen, dass zeitlich stabile Elemente auch dann in der EEG-Messung beobachtbar sind, wenn statt der Amplitude die adaptive Kohärenz zur Grundlage der Signalanalyse gemacht wird. Aufgezeichnet wird das EEG über den klassischen (10-20 Elektrodenverteilung) Elektrodenplazierungen. Daraus wird für jeweils benachbarte Elektrodenpaare die Kohärenz errechnet und ebenso als Zeitverlauf dargestellt. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt (hier alle 4 ms) sind die Kohärenzwerte über den 30 Elektrodenpaaren abgreifbar und als Map über der Topographie des Kopfes farbig skaliert darstellbar. Aus dem Verlauf (hier nicht dargestellt, Verweis auf die unten aufgeführten Arbeiten) kann man erkennen, dass zeitlich stabile Abschnitte auftreten, wie sie Lehmann bereits durch Amplitudenmessung gefunden hat. Diese zeitlich stabilen Abschnitte nennen wir Kohärenzsegmente oder einfach nur Segmente und die Zeit Segmentdauer. Die sich nicht verändernde Kohärenz über der Topographie in bestimmten zeitlichen Abschnitten ist Ausdruck der Verarbeitung von Information, soweit Informationsverarbeitung auf die Oszillation von Signalen zurückgeführt werden kann (ausführlich in Schack (1999), Sommerfeld und Krause (2013)).

Schack (1999) hat mittels Clusterung die Segmente nach ihrer topographischen Ähnlichkeit zusammengefasst und die so erhaltenen Kohärenzmaps – analog der Lehmannschen Betrachtung – als Mikrozustände bezeichnet. Die Anzahl der Mikrozustände wird während der Clusterung üblicherweise über eine „Straffunktion" bestimmt, die möglichst geringe Werte annehmen soll. Die ausführliche Darstellung des Verfahrens findet sich in Schack (1999) sowie in Seidel (2004). Seidel (Seidel 2004, Krause, Seidel und Heinrich, 2003)) hat mit dieser Auswertmethode Experimente zum mathematischen Problemlösen durchgeführt und die Anzahl notwendig zu unterscheidender Mikrozustände bestimmt. Ein Mikrozustand stellt – um das nochmals zu verdeutlichen – eine Aktivationsverteilung über dem Kopf dar, in diesem Fall gemessen mittels adaptiver EEG-Kohärenz. Nun sollte man meinen, dass die Anzahl zu unterscheidender Mikrozustände sehr groß ist, da die Komplexität des Gehirns groß ist, nicht nur wegen der Neuronenanzahl und der Anzahl seiner Verknüpfungen sondern auch wegen seiner Architektur und Dynamik. Seidel konnte mit dieser Methode von Schack und der von Heinrich (1997) entwickelten mathematischen Problemanforderung zeigen, dass dies gerade nicht der Fall ist. Vielmehr sind es nur w e n i g e Mikrozustände, die im Experiment unterscheidbar sind. Je nach Wahl des Kriteriums der Straffunktion kann sie zwischen 6 und 10 Mikrozuständen individualspezifisch für eine Klasse von Anforderungen unterscheiden. Rein theoretisch lassen sich mit

dieser Methode 300 Mikrozustände unterscheiden, wenn man von 30 Messpunkten ausgeht und jeder Messpunkt in 10 Ausprägungen variiert.

Kindler et al. (2011) sowie Schlegel et al. (2011) berichten bei ihren Untersuchungen von jeweils 4 Mikrozuständen, jedoch gemessen mittels „Global field power". Für ihre Untersuchung der akustischen Halluzination bei schizophrenen Patienten konnten Kindler et al (2011) zudem denjenigen Mikrozustand identifizieren, der die akustische Halluzination widerspiegelt. Bislang muss dies aber als ein Sonderfall betrachtet werden.

Jeder beliebige kognitive Prozess kann als Sequenz solcher Mikrozustände abgebildet werden. Fasst man die Mikrozustände als Buchstaben eines Alphabetes auf, dann stellen kognitive Prozesse „Worte" eines solchen Alphabetes dar. Weder der genaue Umfang des Alphabetes noch die Interpretation der Mikrozustände, also die Bedeutung der Buchstaben, auf Kohärenzbasis sind bislang erforscht. Hier liegt ein zukünftiges Betätigungsfeld.

Dennoch ist es möglich, das Auftreten von *Subsequenzen* in den Mikrozustandssequenzen der neurowissenschaftlichen Ebene zum Problemlöseverhalten in der Handlungsebene in Beziehung zu setzen (vgl. 5.3).

4.2 Verkettung, Entropie, Entropiereduktion, Ordnung

Betrachten wir zunächst im Sinn der Kasuistik Ausschnitte aus zwei Mikrozustandssequenzen von je einer mathematisch normalbegabten und einer mathematisch hochbegabten Versuchsperson beim Lösen eines mathematischen Problems innerhalb der ersten 10 Sekunden:

Mikrozustandssequenzen:

normalbegabt:

. . . . E D A B D A D E F A B D A E B E D A C A B D A D C A F C . . . .

hochbegabt:

. . . . B E B E B E C E B E B C B E B E B E D C D E F E B E B E . . . .

Die 6 Mikrozustände sind hier mit A bis F bezeichnet. Nur aus Demonstrationsgründen sind für beide Personen die gleichen Bezeichnungen für die Mikrozustände gewählt worden. Wie oben beschrieben, sind die Mikrozustände individualspezifisch, wenngleich ähnlich. Phänomenologisch fallen längere Verkettungen bei der hochbegabten Person und kürzere Verkettungen bei der normalbegabten Versuchsperson auf. Durch die Berechnung der Entropie bzw. Entropiereduktion lässt sich die Ordnungsbildung im Denken (Krause, 1991) quantifizieren.

Entropiereduktion: Im Falle einer Abhängigkeit der Mikrozustände ist der Zugewinn an Information durch den Vorgänger auf den Nachfolger als Entropiereduktion definiert (Schack, 1999):

$$H_{red} = H - \sum_{i=1}^{N} P(i) \cdot H(i) \qquad \text{i = 1,..., N (Menge der Mikrozustände)} \qquad (1)$$

Die Entropiereduktion reflektiert die sequentiellen Eigenschaft der Mikrozustandessequenzen. Mit

$$H = -\sum_{j=1}^{N} P(j) \cdot ld(P(j)) \qquad \text{j = 1,..., N (Menge der Mikrozustände)} \qquad (2)$$

$$H(i) = -\sum_{j=1}^{N} P(j/i) \cdot ld(P(j/i)) \qquad \text{i = 1,...,N (Menge der Mikrozustände)} \qquad (3).$$

Die Entropiereduktion drückt den Unordnungsabbau oder die Ordnungsbildung in einer Mikrozustandssequenz als Zahl aus. Bei N = 6 Mikrozuständen liegt der Wert zwischen 0 und 2,56. Die Entropiereduktion wird umso größer, je stärker die Übergangswahrscheinlichkeiten vom Zufall abweichen. Damit drückt die Erhöhung der Zahl den Übergang von einem stochastischeren zu einem deterministischeren Prozess aus, den wir als Ordnungsbildung im Denken bezeichnen können.

5. Abbildung kognitiver Prozesse auf Sequenzeigenschaften der Mikrozustände

5.1 Entropiereduktion

Seidel (2004) hat mit dem von Schack (1999) entwickelten Maß die Entropiereduktion beim Lösen mathematischer Probleme für mathematisch Hochbegabte und mathematisch Normalbegabte gemessen. Die Abbildung 4 zeigt eine signifikant höhere Entropiereduktion bei Hochbegabten gegenüber Normalbegabten innerhalb der ersten Sekunden beim Lösen des Problems (Die verwendeten Mathematikaufgaben sind im Teil 2 beschrieben). Interpretativ kann das als größere Ordnungsbildung im Denken bezeichnet werden.

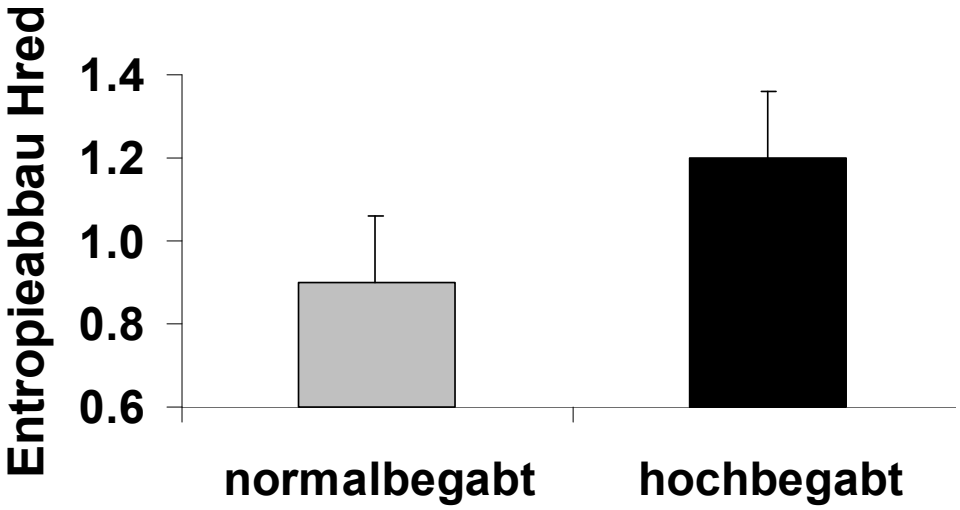


Abb. 4: Entropiereduktion H_{red} (siehe Gleichung (1)) (in der Abbildung als Entropieabbau bezeichnet) beim Lösen mathematischer Probleme innerhalb der ersten 10 Sekunden für mathematisch Hochbegabte und Normalbegabte nach Seidel (2004), bestimmt aus der EEG-Kohärenzanalyse nach Schack (1999). Der Unterschied ist signifikant. Das von Schack eingeführte Verfahren zur Erfassung der Mikrozustandssequenzen aus der EEG-Kohärenzanalyse findet sich in den Abbildungen 16 bis 19 in Sommerfeld und Krause (2013): http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2013/11/sommerfeld_krause-3.pdf

Wie kann man sich einen solchen Befund erklären? Die Daten beziehen sich auf Zwei-Modalitätsstrategieaufgaben, also Aufgaben, zu deren Lösung die Aktivation zweier Modalitäten (Bild und Formel) von Vorteil sein kann. Es wäre also gut möglich, dass solche Strategien der Multimodalität von den Hochbegabten von vornherein aktiviert werden, wenn eine solche Klasse von Aufgaben angezeigt wird. Aus diesen Überlegungen ergibt sich zwingend, dass bei Ein-Modalitätsstrategieaufgaben kein Unterschied in der Entropiereduktion zwischen der Extremgruppe und der Normalgruppe zu erwarten ist. Bei einer Ein-Modalitätsstrategieaufgabe kann nur eine Modalität zur Lösung verwendet werden, entweder nur eine Formel (z.B. einfache Addition von Ziffern) oder ein Bild. Die Abbildung 5 zeigt die Bestätigung.

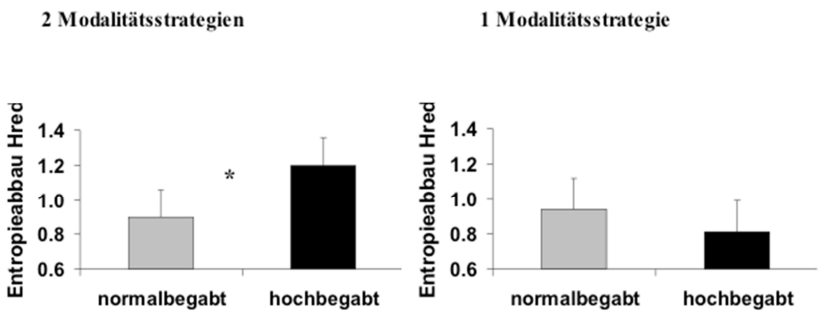


Abb.5: Entropiereduktion H_{red} (in der Abbildung als Entropieabbau bezeichnet) beim Lösen von Ein – und Zwei-Modalitätsstrategieaufgaben innerhalb der ersten 10 Sekunden für mathematisch Hochbegabte und Normalbegabte. Der Unterschied bei Zwei-Modalitätsstrategieaufgaben ist signifikant, bei Ein-Modalitätsstrategieaufgaben dagegen nicht. (Seidel, 2004) (vgl. auch Abb. 4).

Natürlich ist zu erwarten, dass die Fähigkeit mathematisch Hochbegabter zur Multimodalität a n f o r d e r u n g s u n a b h ä n g i g ausgebildet ist. Um das zu zeigen vergleichen wir die Entropiereduktion jeder einzelnen Versuchsperson beim Lösen einfacher (vgl. Abbildung 1 im Teil 2, Aufgaben a genannt) und schwieriger (z.B. Wie viele Diagonalen hat ein 23-Eck ? (Heinrich (1997)), Aufgaben c genannt) Zwei-Modalitätsstrategieaufgaben. Für b e i d e Klassen (einfache und schwierige) von Zwei-Modalitätsstrategieaufgaben sollten Hochbegabte eine größere Entropiereduktion aufweisen als Normalbegabte. Für unterschiedliche Ein-Modalitätsstrategieaufgaben (z.B. Addition versus mentale Navigation, hier bildliche Aufgaben genannt) sollten sich dagegen die Stichprobenverteilungen nicht unterscheiden. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen das Ergebnis.

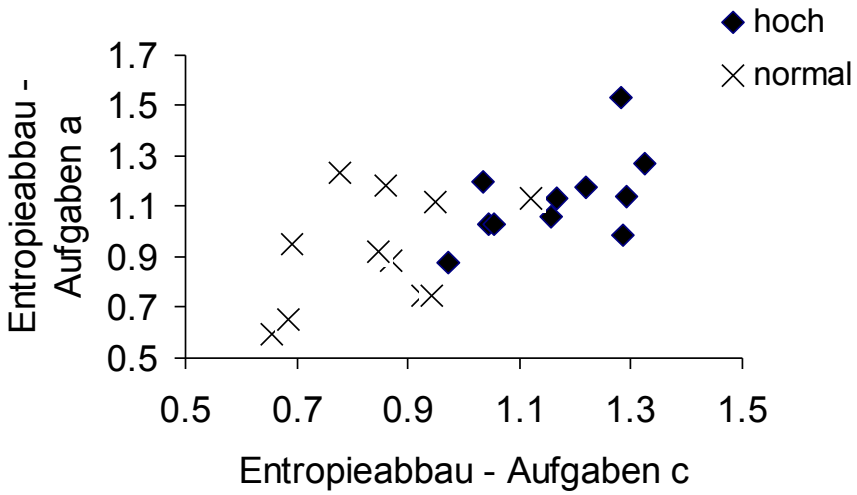


Abb. 6: Entropiereduktion H_{red} (in der Abbildung als Entropieabbau bezeichnet) für jede einzelne Versuchsperson der mathematisch Hoch – und Normalbegabten beim Lösen einfacher (Aufgaben a) und schwieriger (Aufgaben c) Zwei-Modalitätsstrategieaufgaben (vgl. auch Abb. 4).

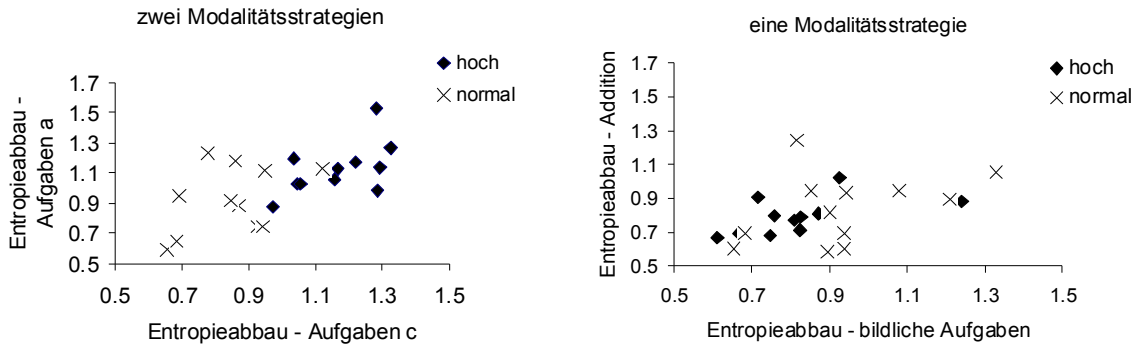


Abb. 7: Analog Abbildung 6 für Ein – und Zweimodalitätsstrategieaufgaben. Wie erwartet ist im rechten Diagramm die Trennung der Verteilung aufgehoben.

5.2 Grammatik

Um den Grad der Abhängigkeit, der sich beim Denken mathematisch Hochbegabter in den Mikrozustandssequenzen niederschlägt, zu verdeutlichen, versuchen wir, uns eine Grammatik vorzustellen, die solche Sequenzen erzeugt. Dann muss es Regeln R_{ij} geben, die die Nachfolge des Mikrozustandes M_j vom Vorgängermikrozustand M_i bestimmt:

$$R_{ij} : M_i \text{ ---> } M_j \qquad (4)$$

Da die Mikrozustände bislang noch nicht semantisch codiert sind, ist es auch nicht möglich, semantische Regeln zu bestimmen. Anstelle solcher Regeln lassen sich aber aus unseren Daten durch Anpassung die bedingten Wahrscheinlichkeiten bestimmen, nach denen Mikrozustand Mi aus Mikrozustand Mj folgt. Für 6 Mikrozustände und die zugehörige sequentielle Entscheidungsstruktur sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten R(1/i), R(2/i),.... für unsere zwei Stichproben in Abbildung 8 dargestellt. Aus dieser Darstellung folgt, dass <u>mathematisch Hochbegabte im Vergleich zu Normalbegabten wenige Übergänge (“Regeln“) mit größerer Wahrscheinlichkeit verwenden.</u>

Dies könnte den Entscheidungsprozess verkürzen und sich in einer Zeitverkürzung auf der Handlungseben äußern.

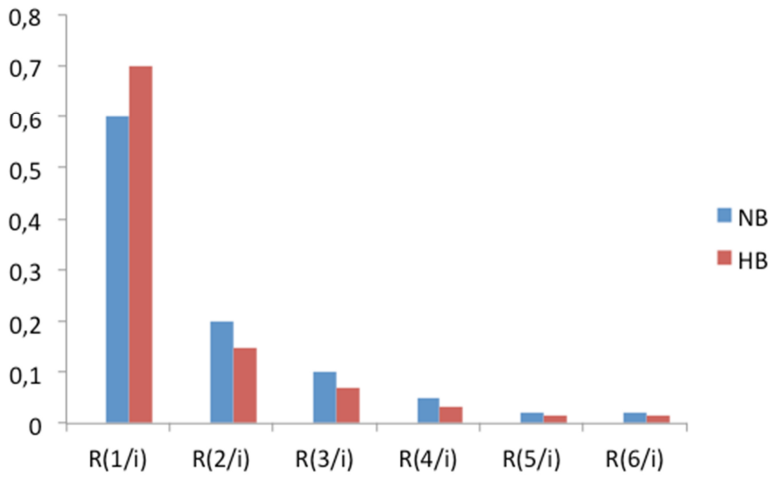


Abb. 8: Bedingte Wahrscheinlichkeiten R(1/i), R(2/i),.... bei Annahme von 6 Mikrozuständen für mathematisch Normal (NB) – und Hochbegabte (HB), durch Anpassung bestimmt (i = 1,..,N (Menge der Mikrozustände)).

Beim Erfassen der bedingten Wahrscheinlichkeiten höherer Ordnung lassen sich so auch ausgezeichnete Regeln und deren Häufigkeiten darstellen. Damit könnten sich neue Möglichkeiten für eine Intelligenzdiagnostik eröffnen.

5.3 Subsequenzen

Seidel (2004) bestimmte die Sequenzen von Mikrozuständen beim Lösen mathematischer Probleme für mathematisch Normal – und Hochbegabte. In Abbildung 9 sind die mittleren Lösungszeiten und die Mikrozustandssequenzen für je einen mathematisch Hoch – und Normalbegabten beim Lösen mathematischer

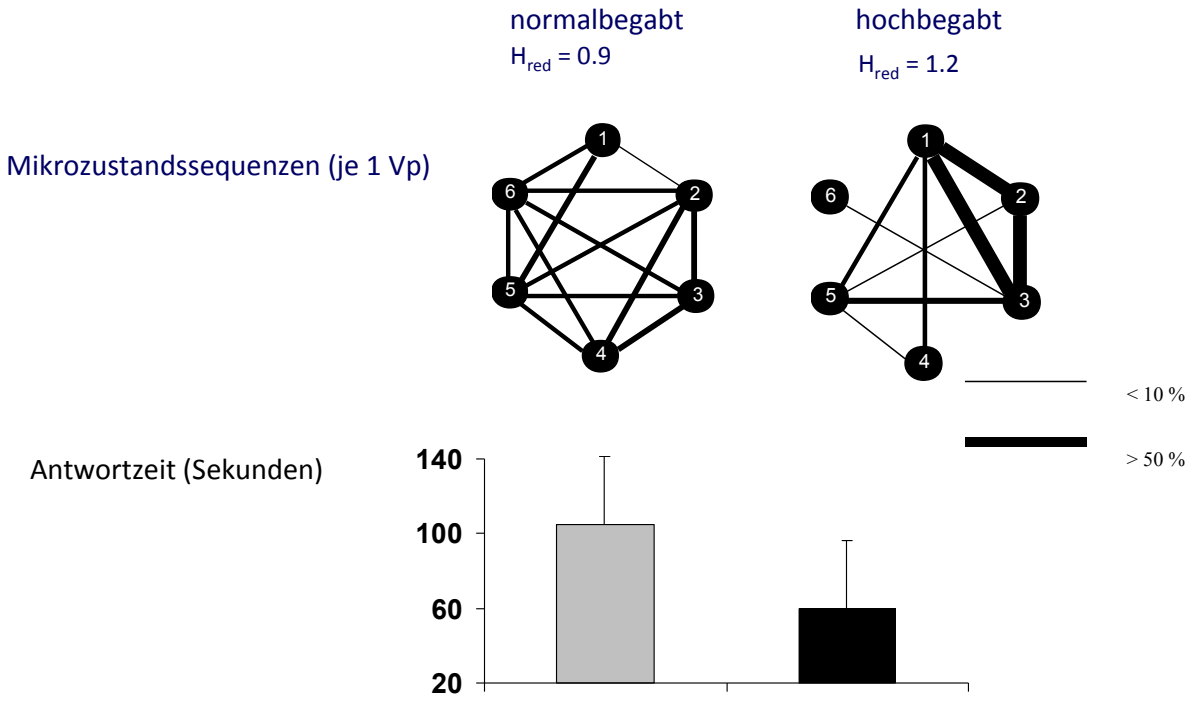


Abb. 9: Mittlere Lösungszeiten (Sekunden) und Mikrozustandssequenzen (Markoffketten) für einen mathematisch Normal (NB)- und Hochbegabten (HB) beim Lösen mathematischer Probleme (Seidel, 2004; Krause, Seidel und Heinrich, 2003).

Probleme dargestellt. Die Strichstärke steht für die Häufigkeit der Übergänge. Auffällig ist, dass die kürzeren Lösungszeiten der Hochbegabten mit Subsequenzen in den Markoffketten einhergehen. Die Zeitverkürzung Hochbegabter auf der Verhaltensebene ist kürzeren Sequenzen der Mikrozustände auf der neurowissenschaftlichen Ebene zuordenbar. Offenbar aktivieren Hochbegabte häufiger ausgezeichnete Verkettungen und lassen andere außeracht. Dies könnte zu einer kürzeren Lösungszeit beitragen. Interpretativ könnten wir mit Klix (1992) konstatieren: Hochbegabte wissen, worauf es ankommt und haben Lösungsstrategien verfügbar.

6. Ein Wechsel auf die Zukunft

Die Codierung der Mikrozustände bedarf einer systematischen Analyse. Die Methoden dafür liegen vor, beispielsweise die Differenzmethode nach Donders. Das gleiche gilt für die Transformationen verbunden mit der Frage nach einer mentalen Grammatik.

Das Entropiemaß muss hinsichtlich der Methodenkriterien weiter geprüft werden. Das Spektrum der Anforderungen muss erweitert werden auf z.B. Konstruktion, Literatur, Musik, Sport usw., um zu prüfen, ob dieses „wissen, worauf es ankommt“ als eine Eigenschaft von Hochbegabung sich – disziplinübergreifend – in der Entropiereduktion niederschlägt.

Die Software muss modernisiert werden, sodass sich die Auswertzeiten deutlich reduzieren.

Zusammenfassung:
Die Verarbeitung von Information beim Menschen wird als Markoffkette von Mikrozuständen dargestellt. Jeder kognitive Prozess ist als Mikrozustandssequenz abbildbar.

Aus den Mikrozustandssequenzen wird die Entropiereduktion berechnet. Im Grad der Verkettung von Mikrozuständen bildet sich geistige Leistung ab. Die Entropiereduktion wird als ein Maß für geistige Leistungen vorgeschlagen. Weitere Prüfungen dieses Maßes sind erforderlich.

Die Sequenzanalysen auf verschiedenen Ebenen erlauben auch eine Aussage zur Wechselwirkung zwischen Ebenen. So kann z.B. die Zeitverkürzung beim Lösen mathematischer Probleme zur Bildung von spezifischen Subsequenzen von Mikrozuständen in Beziehung gesetzt werden. Die Mikrozustände können semantisch kodiert werden. Der höhere Zeitverbrauch bei einer Begriffsaktivation gegenüber einem Mustervergleich geht in dieser Untersuchung mit zwei zusätzlichen Mikrozuständen einher.

Es erhärtet sich der Verdacht, dass sich in der Entropiereduktion, die auf einer häufigeren Aktivierung ausgezeichneter Verkettungen der Mikrozustände basiert, Ordnungsbildung im Denken äußert.

Literatur

Clausius, R. (1865). Ann. Phys., 125, p. 353.

Donders, F.C. (1889, Nachdruck 1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica.(Amst.)*, 30: 412-431.

Ebeling,W. (2015). Entropie – ein Begriff der Physik, der universelle Bedeutung gewinnt. http://leibnizsozietaet.de/dezember-klassensitzung-emergente-systeme-bericht/

Engel, A. K,; Brecht, M., Fries, P. & Singer, W. (1998). Zeitliche Bindung und der Aufbau visueller Objektrepräsentationen. In U. Kotkamp & W. Krause (Hrgb.), *Intelligente Informationsverarbeitung* (S. 193 – 200). Wiesbaden: Universitätsverlag.

Engelkamp, J. (1990). *Das menschliche Gedächtnis.* Göttingen, Toronto, Zürich: Hogrefe.

Garner, W. R. (1970). Good patterns have few alternatives. *American Scientist*, 58, 34 – 42.

Geissler, H.-G. (1991). Zeitcodekonstanten - ein Bindeglied zwischen Psychologie und Physiologie bei der Erforschung kognitiver Prozesse? Hypothesen und Überlegungen zu Quantenstrukturen in der Alphaaktivität des Gehirns. *Zeitschrift für Psychologie*, *199,* 121-143.

Geissler, H.-G. (1992). New magic numbers in mental activity: On a taxonomic system for critical time periods. In H.-G. Geissler, S.W. Link, & J.T. Townsend (Eds.), *Cognition, Information Processing and Psychophysics.* (pp. 293-321). Hillsdale: Erlbaum.

Geissler, H.-G. (1994). Über Möglichkeiten zeitlich-diskreter Strukturierung in Wahrnehmung und Gedächtnis: Betrachtungen in Sachen "Zeitquanten". In D. Dörner & E. van der Meer (Eds.), *Das Gedächtnis.* (pp. 19-52). Göttingen: Hogrefe.

Grießbach, G. (1990). *Computerorientierte Meßstochastik in der Technischen Diagnose und dem Signalmapping.* Habilitationsschrift, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Groner, R. (1978). *Hypothesen im Denkprozess*. Bern, Stuttgart, Wien: Huber.

Heinrich, F. (1997). Diskussionsmaterial zur Untersuchung der Doppelrepräsentationshypothese und einige Bemerkungen aus mathematikdidaktischer Sicht. (unveröffentlicht).

Heinrich, F. (2003a). Theoretische Analysen und empirische Erkundungen über das Wechseln von Lösungsanläufen beim Lösen mathematischer Probleme. Habilitationsschrift, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Heinrich, F. (2003b). Zum Wechselspiel zwischen Geometrie und Arithmetik/Algebra als ein heuristisches Leitprinzip im (bzw. von) Mathematikunterricht. Vortrag zur Habilitationsverteidigung, Fakultät für Sozial – und Verhaltenswissenschaften, Friedrich – Schiller – Universität Jena.

Heinrich, F. (2003c). Zur Einführung. *Der Mathematikunterricht. Zum Wechselspiel zwischen Figuren und Zahlen*. 49, 6, 3 -5.

Kindler, J., Hubl, D., Strik, W.K., Dierks, T. & Koenig, T. (2011). Resting – state EEG in schizophrenia: Auditory verbal hallucinations are related to shortening of specific microstates. *Clinical Neurophysiology* 122, 1179 – 1182.

Klix, F. (1992). *Die Natur des Verstandes.* Göttingen: Hogrefe.

Kotkamp, N. (1998). *Zur mentalen Repräsentation von Bildern, Wörtern und Kategorien bei Vergleichsprozessen.* Diplomarbeit, Institut für Psychologie der Universität Jena.

Krause, W. (1970). Untersuchungen zur Komponentenanalyse in einfachen Problemlösungsprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, 177, 199-249.

Krause, W. (1991). Ordnungsbildung im Denken und kognitiver Aufwand. *Zeitschrift für Psychologie (Suppl.), 11,* 404-421.

Krause, W. (1991). Klassenzuweisung und Vergleich statt Inferenz? Zur Messung geistiger Leistungen: eine alte Idee und ein neuer Ansatz. In W. Krause, E. Sommerfeld, & M. Ziessler (Eds.), *Inferenz und Interpretation.* (pp. 106-126). Jena: Universitätsverlag.

Krause, W. (1997). Elementaranalyse von Gedächtnis- und Denkprozessen mittels EEG – eine experimentelle Studie; in G. Lüer und U. Lass (Hrgb.), Erinnern und Behalten, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Krause, W. (2000). *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht.* Göttingen: Hogrefe-Verlag.

Krause, W. (2006). Außergewöhnliche menschliche Informationsverarbeitung. – Extremgruppenvergleiche -. http://www.leibniz-sozietaet.de/journal/leibniz online 2/2006.

Krause, W. (2011) Menschliche Informationsverarbeitung interdisziplinär. LIFIS ONLINE www.leibniz-institut.de/archiv/krause_18_04_11.pdf

Krause, W., Sommerfeld, E., Höhne, G., & Sperlich, H. (1989). Aufwandsminimierende Umstrukturierung von Wissenssstrukturen der Konstruktion im menschlichen Gedächtnis. *Proceedings des 34.Internationalen Kolloquiums der Technischen Universität Ilmenau*, 51-54. (abstract).

Krause, W., Schack, B., Gibbons, H., & Kriese, B. (1997). Über die Unterscheidbarkeit begrifflicher und bildhaft-anschaulicher Repräsentationen bei elementaren Denkanforderungen. *Zeitschrift für Psychologie*, *205,* 169-203.

Krause, W., Gibbons, H., & Schack, B. (1998). Concept activation and coordination of activation procedure require two different networks. *Neuroreport.*, *9,* 1649-1653.

Krause, W.; Seidel, G. & Heinrich, F. (2003a) Über das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung beim Lösen mathematischer Probleme. Der Mathematikunterricht, 6, 50-62.

Krause, W.; Seidel, G. & Heinrich, F. (2003b) Entropy reduction in mathematical giftedness. In: Lindemann, U. (Ed.) Human Behaviour in Design. Berlin, Heidelberg, NewYork: Springer, 63-71.

Krause, W. & Seidel, G. (2004) Biologische Grundlagen des Verstandes. Höhere Ordnung – kürzere Zeiten: allgemeinpsychologische und differentielle Untersuchungen zur Entropiereduktion. In: Krause, B. & Krause, W. (Hrsg.) Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften. Festschrift für Friedhart Klix zum 75. Geburtstag. Abhandlungen der Leibniz- Sozietät, Bd.12. Berlin: trafo Verlag, 189-214.

Lehmann, D (1987). Principles of spatial analysis. In A. Gevins & A. Remona (Eds.), *Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology*, vol. 1, pp. 309-354. Amsterdam: Elsevier.

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.

Lüer, G., & Laß, U. (1997).(Eds.). *Erinnern und Behalten.* Göttingen: Vandenhoeck & Rupprecht.

Malsburg, C. von der (1994). The correlation theory of brain function. In E. Donany, J. L. van Hemmen & K. Schulten (Eds.), Models of Neural Networks II (pp.95 – 119). Berlin: Springer – Verlag. (Nachdruck eines 1981 erschienen Internal Reports des Max – Planck – Institutes für Biophysikalische Chemie in Göttingen).

Müller, S. (2010). Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch? *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät.* 108, 57 – 65.

Petzold, P. & Haubensak, G. (2001). Higher order sequential effects in psychophysical judgments. *Perception & Psychophysics 63 (6), 969-978.*

Petzold, P. & Haubensak, G. (2004). The influence of category membership of stimuli on sequential effects in magnitude judgment. *Perception & Psychophysics 66 (4), 665-678*

Posner, M. J. & Mitchell, R. F. (1967). Chronometric analysis of classification. *Psychological Review,* 74e, 392 – 409.

Rothe, H.-J. (2012). *Quo vadis Arbeitspsychologie?* Abschiedsvorlesung. http://www.psych.uni-potsdam.de/psych/rothe/index-d.html

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 Neurophsyiological 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., Grießbach, G., Arnold, M. & Bolten, J. (1995) Dynamic cross-spectral analysis of biological signals by means of bivariate ARMA processes with time-dependent coeffi-
cients. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 33, 605-610.

Schack, B., Grieszbach, G., & Krause, W. (1999a). 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.

Schack, B., Grieszbach, G., Nowak, H., & Krause, W. (1999b). The sensitivity of instantaneous coherence for considering elementary comparison processing. Part II: similarities and differences between EEG and MEG coherences. *Int.J.Psychophysiol.*, *31,* 241-259.

Schack, B., Chen, A.C.N., Mescha, S., & Witte, H. (1999c). Instantaneous EEG Coherence Analysis during the Stroop Task. *Electroencephalogr.Clin.Neurophysiol.*

Schlegel, F., Lehmann, D., Faber, P. L., Milz, P., Giannotti, L. R. R. (2011). EEG Microstates During Resting Represent Personality. Brain Topogr. DOI 10.1007/s10548-011-0189-7.

Seidel, G. (2004). *Ordnung und Multimodalität im Denken mathematisch Hochbegabter: sequentielle und topologische Eigenschaften kognitiver Mikrozustände.* Berlin: WVB.

Sommerfeld, E. (1986). Modellierung kognitiver Strukturtransformationen auf der Basis von Graphtransformationen. In E. Sommerfeld & F. Sobik (Eds.), *Beiträge zur mathematischen Modellierung.* (pp. 1-103). Berlin: Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, Akademie der Wissenschaften der DDR, Berlin.

Sommerfeld, E. (1991). Inferenzprozesse und kognitiver Aufwand. In W. Krause, E. Sommerfeld, & M. Zießler (Eds.), *Inferenz - und Interpretationsprozesse.* (pp. 127-172). Jena: Universitätsverlag.

Sommerfeld, E. (1991a). Mathematisch-psychologische Analysen der Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen. Habilitationsschrift, Institut für Psychologie der Humboldt-Universität Berlin.

Sommerfeld, E. (1994). *Kognitive Strukturen.* Münster: Waxmann.

Sommerfeld, E. (2001). *Comparison processes in memory: performance indicators and synchronous brain activity*. In E. Sommerfeld, R. Kompass & T. Lachmann (Eds.), Fechner Day 2001, Pabst Science Publishers: Lengerich, 81 – 86.

Sommerfeld, E. & Krause, W. (2013). „Objektiv, aber speziell“: Psychologie als Naturwissenschaft. http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2013/11/sommerfeld_krause-3.pdf

Spork, P. (2012). *Der zweite Code. Epigenetik oder: Wie wir unser Erbgut steuern können.* Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg.

Strik, W.K. (1993). Mikrozustände der hirnelektrischen Felder: Methode und Ergebnisse bei Gesunden und psychiatrischen Patienten. Habilitationsschrift, Universität Würzburg.

Strik, W.K. & Lehmann, D. (1993). Data-determined windows size and space-oriented segmentation of spontaneous EEG map series. *Journal of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology,* 87, 169 – 174.

Tietze, H. (1996). Prozeßanalyse von Vergleichsprozessen mittels Segmentierung. Diplomarbeit, Institut für Psychologie der Universität Jena.

van der Meer, E., & Schmidt, B. (1992). Final, kausale und temporale Inferenzen - Analyse ihres kognitiven Hintergrundes. *Zeitschrift für Psychologie*, *200,* 303-320.

Zimmermann, B. (2003). Darstellungswechsel als eine wichtige Methode zur Lösung von Problemen – schon in der Geschichte der Mathematik. *MU Der Mathematikunterricht*, 49, 6, 6 – 15.

Anschrift des Autors: urwe.krause@t-online.de