

Werner Krause

Menschliche Informationsverarbeitung interdisziplinär

Unter besonderer Berücksichtigung von ausgewählten Denk- und Gedächtnisprozessen sowie psychophysikalischen Prozessen und mit Beschränkung auf Mathematik, Physik und Neurowissenschaften

Die Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung ist grenzüberschreitend, um einen Begriff von Gert Wangermann (2008) in LIFIS ONLINE aufzugreifen und verlangt den Blick auf das Ganze (Klix, 1992). Sie ist inter- und transdisziplinär. Sie hat ihre Wurzeln in den Natur- und in den Geisteswissenschaften. Lothar und Helga Sprung haben das in ihrem jüngsten Buch „Eine kurze Geschichte der Psychologie und ihrer Methoden“ erneut unter Beweis gestellt (Sprung und Sprung, 2010).

Im Gegensatz zum Beitrag von Michael Köhler (2008) in LIFIS ONLINE, der für sein Gebiet, die Nanotechnologie, Visionen aufzeigt, folgt hier für unser Fach, die menschliche Informationsverarbeitung, der Blick zurück. Dennoch folgen wir dem Verlauf der Geschichte und beginnen mit der historisch frühesten naturwissenschaftlichen Einflussdisziplin. Es wird zu zeigen sein, wie durch das Ineinandergreifen verschiedener Disziplinen ein *Fortschritt* für das Fach entstand und wie sich zugleich *offene Probleme* verschärften.

Die Bewältigung einer Anforderung findet auf der Verhaltensebene, auf der (mathematischen) Beschreibungsebene, auf der neuronalen Ebene, auf der biochemischen Ebene statt und ist von der sozialen Umgebung, von der individuellen Erfahrung sowie den Persönlichkeitseigenschaften abhängig. Die gegenteilige Annahme der Unabhängigkeit führt zum philosophischen Reduktionismus und damit zu verhängnisvollen Fehltritten, wie Herbert Hörz (2008) in seinem Beitrag zur Kritik am Manifest von 11 führenden Neurowissenschaftlern über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung gezeigt hat.

Friedhart Klix hat in seinem Buch „Information und Verhalten“ bereits 1971 konstatiert: „Es ist unbestreitbar, dass *alle* psychischen Prozesse in den Funktionsprinzipien der hochorganisierten materiellen Strukturen des Nervensystems ihre Grundlage und ihre Entsprechung haben“ Klix (1971). Und an anderer Stelle (Klix, 1992) führt er aus: „Ein sehr befähigter Schwingungsmathematiker kann mit aerodynamischen Gleichungen Eigenschaften des Flugs einer Libelle ausrechnen. Aber ob die Nervenzellen im Libellenkopf genauso rechnen, wenn das Tier in der Luft steht und gerade zum Stossflug ansetzt?“

Kein Zweifel an der Forderung nach Interdisziplinarität. Der Teufel steckt im Detail, genauer, in der Entwicklung und dem Zusammenspiel der Analysemethoden der beteiligten Disziplinen.

Wir wollen im Rückblick auf 150 Jahre Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung den Einfluss von Mathematik, Physik und Neurowissenschaften auf ihre Fortentwicklung bis hin zur Einbeziehung weiterer „fremder“ Disziplinen begründen. Dabei wird gezeigt, dass die Art zu fragen, wie sie in den großen naturwissenschaftlichen Disziplinen eine Rolle spielt, auch hier bei der Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung zum Tragen kommt. Es ist die Frage nach der Abhängigkeit versus Unabhängigkeit von Größen – wobei die Unabhängigkeit von Größen allgemein mit dem Begriff der Invarianz bezeichnet wird –, es ist die Frage nach der Vollständigkeit und es ist die Frage nach allgemeinen Größen des Prozessgeschehens wie Transformation, Quantelung, Klassenbildung, Strukturierung, Anordnung, Zuordnung, Umordnung, u.v.a.m.. Beginnen wir mit dem Einfluss der Mathematik.

1. Einfluss der Mathematik

Wir werden zuerst allgemeine Operatoren im Sinne der Systemtheorie und danach Strukturen und Strukturtransformationen im Sinne der Graphentheorie betrachten.

1.1 Transformation

Für die Transformation wird ein allgemeiner Operator bestimmt. Die gewählten Beispiele beschränken sich auf die Psychophysik und das Problemlösen.

1.1.1 Unterscheiden

In der Psychophysik ist vor mehr als 100 Jahren ein allgemeiner Operator durch Messung von subjektiv gerade noch unterscheidbaren Reizeinwirkungen und nachfolgender Transformation bestimmt worden. Mittels solcher Messungen hat Weber (1834, 1846) eine Differenzgleichung aufgestellt. Mit der Infinitesimalrechnung, die 150 Jahre vorher durch Leibniz und Newton eingeführt worden war, bot sich die Aufstellung einer Differentialgleichung an. Fechner (1860) nahm dabei an, dass jede beliebige (differentiell) kleine Reizänderung nach demselben Grundsatz einer unmerklich kleinen Empfindungsstärkeänderung zugeordnet sei. Die Lösung der Differentialgleichung ergab das bekannte Weber-Fechner-Gesetz. Den allgemeinen Operator erhält man aus der Differentialgleichung durch Laplace-Transformation, im Kontext der Systemtheorie als Übertragungsfunktion bezeichnet. Der große Vorteil einer solchen mathematischen Darstellung eines psychischen Prozesses war die Generalisierung. Auf Grund von Reizänderungen zu erwartende Empfindungsänderungen konnten jetzt in Abhängigkeit von der Reizgröße vorhergesagt werden. Diese *Generalisierung* und *Prädiktion* war für die Wissenschaft von der Seele ein enormer Fortschritt. *Offen* blieb die Frage, ob die im neuronalen Netz stattfindende Verrechnung, die letztendlich zum Urteil durch die Versuchsperson führt, nach dem gleichen Prinzip stattfindet. Eher nein. Es bedarf anderer Methoden zur Beantwortung dieser Frage.

Dennoch war die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Menschen im Trackingverhalten (Timpe, 1968) bedeutsam. Denn nun konnte die *Gesamtübertragungsfunktion* des Mensch-Maschine-Systems in Form einer Regelkreisgleichung bestimmt und so beispielsweise die Zuverlässigkeit für das Mensch-Maschine-System berechnet werden.

1.1.2 Lernen von Strategien

Auch für den Prozess des Lernens von Strategien im einfachen Problemlösen (als ein Beispiel: Prädiktion periodischer Binärfolgen, Krause, 1970) lässt sich ein allgemeiner Operator formulieren. Mit Hilfe des Satzes über die totale Wahrscheinlichkeit lässt sich ein Vektor der Auftretenswahrscheinlichkeiten aller Strategien in einer gegebenen Problemlöseanforderung notieren. Der Lernprozess lässt sich rekursiv als Produktbildung Vektor mal Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten darstellen. Die Vorhersage stimmt recht gut mit dem beobachteten Lernprozess der Strategien im Problemlösen überein. Es genügt sogar, die Schrittabhängigkeit der Übergangswahrscheinlichkeiten zu postulieren. Der Vorteil: Ein allgemeiner Operator – hier die Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten – erlaubt die *Prädiktion des Strategieerwerbs* im einfachen Problemlösen. Ein daraus ableitbares Normativ bildet die Grundlage für ein neues Verfahren der Schulreifediagnostik. Aber: Der Lernprozess findet in den neuronalen Strukturen statt. Mit Kandel u.a. (1981) und Kandel (2006) wissen wir, dass Lernen sich in der Änderung der Übergangswiderstände der Synapsen niederschlägt. Langzeittraining bewirkt außerdem ein Wachstum der Dendriten, also eine strukturelle Veränderung des neuronalen Netzwerkes. Um das zu beschreiben bedarf es einer neuen Mathematik für Netzwerke zur Erfassung der Dynamik neuronaler Architekturen.

1.1.3 Zustandstransformation

Problemlösen wurde als Transformation von Zuständen auf der Grundlage von Bewertungen aufgefasst (Mesarovic, 1964; Sydow, 1970; Krause, 1970; Klix, 1971; Dörner, 1976, 2002; Sommerfeld, 1979; Lüer, 1987; Hesse, 1991). Gesucht wurde ein Operator, der einen Zustand in einen anderen Zustand mit besserer Bewertung überführt. Bewertungen waren der Zielabstand oder Eigenschaftsvektoren des Zielzustandes. Mit dieser durch die Mathematik (Entscheidungstheorie, Spieltheorie, Systemtheorie) diktierten Vorstellung konnten bedeutsame Eigenschaften menschlichen Problemlösens aufgezeigt werden, wie z.B. die Änderung der subjektiven Metrik im Denkprozess (Sydow, 1970) oder die Tendenz zur Vereinfachung (Sommerfeld, 1979, 1991; Krause, 2000) und zur Merkmalsreduktion (Dörner, 1989) bei der Entscheidungsfindung. Es sei hier nur am Rande erwähnt, dass die Resultate nur für eine bestimmte Klasse von Problemen gelten, für Probleme mit abgeschlossenem Problemraum. Wie der Mensch z.B. sogenannte kreative Probleme löst, die zur Klasse der Probleme mit nicht abgeschlossenem Problemraum gehören, ist heute noch völlig offen.

Offen bleiben musste, – weil es das mathematische Modell nicht leistete und außerdem die methodischen Voraussetzungen fehlten – die Frage nach der subjektiven Repräsentation der Zustände, genauer: Wie stellt sich eine Versuchsperson das Problem, die Zustände, den Problemraum und deren Änderung vor. Denn es ist klar: die von außen zu beobachtenden Handlungen basieren auf einer – bis dahin unbekannt – internen Repräsentation. Die Auffassung von Problemlöseprozessen als Handlungssequenz und deren mathematische Beschreibung führte zugleich zu einer neuen Aufforderung: der *Erfassung der internen Repräsentation* und deren Veränderung im Problemlösen. In der Literatur und von der Phänomenologie her lassen sich zwei Klassen von Ansätzen unterscheiden: ein modalitätsspezifischer und ein modalitätsunspezifischer Ansatz.

Zunächst zur Modalitätsspezifität (regelmäßig versus bildhaft). Aus Untersuchungen zum „Turm von Hanoi“ wurde geschlussfolgert, dass Versuchspersonen Regeln ausbilden, z.B. die sogenannte „Drei-Scheiben-Regel“. Eine Zugfolge mit 7 Zügen, die im Sinne einer „lokalen Optimierung“ zu einer geschlossenen Folge „verkettet“ werden und die danach als Modul, als verfügbare und ein-

setzbare Makrooperation zur Verfügung steht (Klix, 1992). Aus dem Experten-Anfänger-Vergleich schlussfolgert man eine bildhaft-anschauliche Vorstellung. Im Alltagsdenken weist man häufig Schachgroßmeistern kreative Fähigkeiten beim Schachspielen zu. Lassen sich kreative Denkleistungen dieser Art als neuartige Kombinationen kognitiver Operationen im Schach darstellen? De Groot (1965, 1966) und später Chase und Simon (1973) sowie Kämpf und Strobel (1998) haben Schachexperten und Schachanfänger untersucht (vgl. auch Waldmann und Weinert, 1990). Im Ergebnis dieser Experten-Anfänger-Untersuchung ließ sich zeigen, dass sich die Experten von den Anfängern weder in der schachspezifischen Behaltensleistung noch in der Anzahl antizipierter Züge (also in der neuartigen Kombination von Zügen) unterschieden. Sie finden deutliche Unterschiede in der Anzahl und Größe der Chunks, besonders gravierende Unterschiede aber in der Anzahl aus dem Gedächtnis repräsentierter Schachkonstellationen. Experten auf diesem Gebiet können bis zu 50.000 Schachkonstellationen – gewissermaßen als Muster – behalten. Was als Zugkombination erwartet wird, ist dann ein Musterauswahlprozess. Die kreative Leistung bestünde dann in der Inhibition einer großen Anzahl aktivierter Situationen mit dem Ziel der Selektion erfolgversprechender Situations-Aktions-Kombinationen. Die Kombination von Operationen wird hier offenbar ersetzt durch den (viel einfacheren) Musteraktivations- und -inhibitionsprozess. Neuartige Lösungen entstehen offenbar nicht nur durch neuartiges Kategorisieren und Kombinieren, wie man sich das in der Verhaltensebene gut vorstellen und vielleicht experimentell auch erzwingen kann, sondern Aktivierung großer Mengen von Möglichkeiten (hier bildhafter Vorstellungen) mit anschließender Inhibition (aller bis auf eine Möglichkeit) sind Prozesse, die bei der Betrachtung kreativen Problemlösens mit herangezogen werden müssen.

Der modalitätsspezifische Ansatz bezieht sich auf die Ausbildung und Veränderung kognitiver Strukturen.

1.2 Vollständigkeit

Auch zur Erfassung der internen Repräsentation stellt die Mathematik Möglichkeiten zur Formalisierung bereit, wenn wir uns auf kognitive Strukturen (man stelle sich z.B. Begriffsnetzwerke vor) beschränken und die Frage nach der Modalität (Bild, Begriff) vorerst außer Acht lassen: die Graphentheorie. Um exakte Aussagen über die Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen machen zu können, ist es erforderlich, Operationen über solchen Strukturen genau zu beschreiben, wie dies von Klix und Krause, B. (1969) vorgelegt worden ist.

Unglücklicherweise existiert bisher noch keine allgemeine Messmethode für die interne Repräsentation. Das bisher existierende Verfahren (Messung des Symbol-Distanz-Effektes) ist auf die Klasse der Ordnungsprobleme (deduktive Inferenzen) beschränkt. Für diese Klasse von Problemen konnte Sommerfeld (1994) eine Systematik kognitiver Strukturtransformationen aufstellen und die Vollständigkeit zeigen. Mit 4 Änderungsmöglichkeiten kognitiver Strukturen (Vergrößerung, Verkleinerung, beides, keine) und ebenso vielen Änderungsmöglichkeiten des Informationsgehaltes erhält sie genau 16 Klassen kognitiver Strukturtransformationen, von denen genau 3 (integrative, hierarchische und selektive kognitive Strukturtransformationen) experimentell besonders häufig auftreten. Eine große Anzahl von in der Literatur beschriebenen und vollkommen unterschiedlich benannten kognitiven Operationen lässt sich genau diesen 3 Klassen kognitiver Strukturtransformationen zuordnen. Es sei nur am Rande erwähnt, dass die Aufstellung von Taxonomien in allen Wissenschaftsdisziplinen die Grundlage für die Entwicklung von Theorien bildet.

Durch Einführung einer Bewertung (kognitiver Aufwand) über den kognitiven Strukturtransformationen gelang der Nachweis, dass leistungsstarke Versuchspersonen aufwandsarme (in diesem

Sinne einfache) kognitive Strukturen beim Lösen von Ordnungsproblemen ausbilden (Krause, 2000). Mehr noch: Fest eingelernte, im Langzeitgedächtnis eingespeicherte Wissensstrukturen werden zur Anforderungsbewältigung umstrukturiert, wenn damit eine Aufwandsreduktion verbunden ist (Sommerfeld, 1994). Was hier im Elementaren gemessen wurde, unterstreicht die häufig zitierte Flexibilität im Denken und begründet die Notwendigkeit der Disponibilität für die Lehre. Der Vorteil: die Mathematik erlaubt den Nachweis der Vollständigkeit der Menge kognitiver Strukturtransformationen und damit eine Systematik interner Repräsentationen. Mit dem Befund der Proportionalität zwischen so bewerteten kognitiven Strukturtransformationen und durch Noten ausgedrückten Leistungen in Prüfungen der Mathematik und der Konstruktionswissenschaften lassen sich objektive Maße für geistige Leistungen ableiten, deren Voraussetzung die Vollständigkeitsbetrachtung und die Strukturbewertung ist. *Ungeklärt* ist, ob und wie solche kognitiven Strukturen im neuronalen Netz ausgebildet und repräsentiert werden.

2. Einfluss der Physik

Die in der Physik weit verbreitete Denkweise, Variable zu erklären und nach funktionalen Beziehungen zwischen ihnen zu suchen, hat zu einer traditionellen Bindung zwischen Physik und menschlicher Informationsverarbeitung geführt. Das bestätigt nicht nur die eigenständige Disziplin der Psychophysik, auch weitere Teildisziplinen wie „Memory psychophysics“ oder „Psychophysik kognitiver Prozesse“ haben sich etabliert. Wir wollen hier nur zwei Aspekte herausgreifen, um den Nutzen zu verdeutlichen, den die menschliche Informationsverarbeitung aus der Partnerschaft mit der Physik gezogen hat. Am Beispiel von „Invarianz“ und „Quantelung“ soll gezeigt werden, dass die naturwissenschaftliche Herangehensweise der Physik auch bei der Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung zu bedeutsamen Ergebnissen führt.

2.1 Invarianz

Invarianzen stellen wesentliche Säulen für eine Theorienbildung in der Physik dar. Invarianzleistungen hat Cavanagh (1972) auch für Gedächtnisprozesse nachgewiesen. Er konnte zeigen, dass es für Gedächtniseigenschaften eine Größe gibt, die von dem zur Untersuchung von Gedächtniseigenschaften verwendeten Testmaterial (Ziffern, Farben, Buchstaben, Wörter, geometrische Formen, Zufallsformen, sinnfreie Silben) unabhängig ist. Traditionell wurde bis dato die Gedächtnisspanne, also die nach einmaliger Vorsage bestimmte Anzahl reproduzierter Items aus dem Gedächtnis verwendet. Für Ziffern als Testmaterial ergab sich allgemein die Anzahl sieben plus minus zwei. Unglücklicherweise wurde diese Gedächtnisspanne generalisiert, obwohl bereits zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts für sinnfreie Silben eine Gedächtnisspanne von 3,4 gemessen wurde. Cavanagh hat nun zur Charakterisierung der Gedächtniseigenschaften nicht nur die Gedächtnisspanne sondern auch die Scanningzeit pro Item, also die Abtastzeit pro Item bei der Gedächtnissuche, herangezogen. Für die Scanningzeit pro Item findet sich auch eine Materialabhängigkeit. Für Ziffern ist die Abtastzeit pro Item kleiner (33,4 ms/Item), für sinnfreie Silben dagegen größer (73 ms/Item). Cavanagh zeigt, dass das Produkt aus Gedächtnisspanne und Scanningzeit pro Item materialinvariant ist. Die später nach ihm benannte Cavanagh-Konstante ist gegenüber einer Materialvariation invariant und somit eine universellere Größe zur Bestimmung der Gedächtnisleistung. Da sie die Dimension einer Zeit trägt, wird sie auch als eine Art Gedächtnisspur interpretiert (vgl. auch Lüer und Lass, 1997).

2.2 Quantelung

Bekanntlich hat in den großen naturwissenschaftlichen Disziplinen eine Denkweise bedeutende Fortschritte gebracht, die darauf abzielt, aus theoretischen Überlegungen Ereignisse, Strukturen oder Prozesse vorherzusagen, die durch experimentelle Überprüfung verifiziert oder falsifiziert werden konnten. Eine solche Denkweise hat auch die Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung beeinflusst, insbesondere bei der Aufklärung von Kodierungsprozessen im menschlichen Gedächtnis: Bredenkamp (1988, 1990, 1992) prüft, ob die außergewöhnlichen Leistungen des Rechenkünstlers Gert Mittring mit dem derzeitigen Wissen um kognitive Prozesse aufklärbar sind. Der Rechenkünstler ist in der Lage, in 42 Sekunden die 137. Wurzel aus einer 1000-stelligen Zahl zu ziehen. Bredenkamp findet für den Rechenkünstler eine Gedächtnisspanne von 17,65 Ziffern und eine Abtastzeit pro Ziffer von 27,09 ms. Daraus errechnet sich die Cavanagh-Konstante mit 478 ms. Cavanagh selbst hat die über viele Versuchspersonen gemittelte Cavanagh-Konstante mit 243 ms angegeben. Um diesen gravierenden Widerspruch zu lösen, geht Bredenkamp von der Annahme aus, dass jedes Item aus einem Bündel von m Merkmalen besteht. Ein Item ist analysiert, wenn die Analyse der Merkmale der Items abgeschlossen ist. Unabhängig davon entwickelt Geißler (1991,1997) den gleichen Grundsatz, der zu seiner Zeitquantenhypothese führte:

Gehören zu einem Item m Merkmale und dauert die Zeit für die Analyse eines Merkmals t ms, dann beträgt die Abtastzeit für ein Item m mal t ms. Aus dieser Überlegung ergeben sich zwei Konsequenzen: (1) Da die Anzahl m von Merkmalen nur ganze Zahlen annehmen kann: $m = 1, 2, 3, \dots$, kann die Abtastzeit pro Item (auch Sternbergrate genannt) nur diskrete Werte annehmen. Mit Sternbergexperimenten von Puffe (1990) zeigt Geißler, dass genau dies der Fall ist. (2) Es muss eine kleinste Zeit t für die Verarbeitung eines Merkmals geben. Geißler nennt diese kleinste Zeit ein Zeitquant und bestimmt diesen Wert mit 9,13 ms, in jüngster Zeit mit der Hälfte dieses Wertes, 4,56 ms, und spricht in diesem Zusammenhang von einer „doppelten Quantelung“. Mit dem Zeitquant von 9,13 ms sind die diskreten Zeitniveaus für die Scanningzeit 9,13; 18,26; 27,39; ... ms. Zeiten zwischen diesen diskreten Werten treten in der Tat so gut wie nicht auf.

Der oben angegebene Widerspruch zwischen den Cavanagh-Konstanten des Rechenkünstlers und von Normalpersonen ist nun leicht aufklärbar. Bei gleichem Zeitquant ergibt sich für den Rechenkünstler eine Merkmalsanzahl von $m = 3$, für Normalpersonen dagegen eine Merkmalsanzahl zwischen $m = 5$ bzw. $m = 6$. Bredenkamp hat dem Rechenkünstler auch binäre Ziffern angeboten und erhält eine Gedächtnisspanne von 52,17. Daraus errechnet sich eine Merkmalsanzahl von $m = 1$, was den angegebenen Trend noch verstärkt. Der Rechenkünstler analysiert – im Sinne der Interpretation von Geißler – deutlich weniger Merkmale als dies Normalpersonen tun. Wenn die Anzahl m der Merkmale als eine Eigenschaft der Strukturierung aufgefasst wird (z.B. als Klassenmerkmal), dann bedeutet dieses Ergebnis, dass der Rechenkünstler einfacher strukturiert als jede andere Versuchsperson. Die besondere Leistung des Rechenkünstlers ist also nicht nur durch seine große Gedächtnisspanne, sondern auch durch seine „optimale“ Strukturierung bedingt. Er verfügt demnach nicht nur über hohe Ressourcen, sondern auch über eine bessere Ressourcenverteilung. Jedermann weiß, dass man sich Zahlenreihen besser merken kann, wenn man die Reihe strukturiert. Dies ist plausibel und natürlich. Die Elementaranalyse begründet effiziente Vorgehensweisen.

Es sei hier nur am Rande erwähnt, dass der Rechenkünstler nur wenige Ziffern der 1.000-stelligen Zahl verwendet, wie Bredenkamp (2010) berichtet.

Mit dieser von Bredenkamp und Geißler vorgenommenen Zerlegung in Gedächtnisspanne als Gedächtnisumfang und Merkmalsanzahl als Strukturierung des Gedächtnisinhaltes können im Gedächtnistraining zwei Größen beeinflusst werden: die *verfügbaren Ressourcen* und deren *Strukturierung*. Bredenkamp schlägt verschiedene Methoden zum Training der optimalen Strukturierung und zur Erweiterung der verfügbaren Ressourcen vor.

Das Beispiel zeigt, wie eine Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung für eine differentielle Fragestellung ausgenutzt werden kann. Die Cavanagh-Konstante ist invariant gegenüber Materialtransformation (von Ziffern bis zu sinnfreien Silben). Die Cavanagh-Konstante ist personenspezifisch. Der Unterschied zwischen Behaltensleistungen einzelner Personen lässt sich mit der Gedächtnisspanne g und der Merkmalsanzahl m sehr gut diagnostizieren. Wenn man dabei an die traditionellen Methoden zur Bestimmung der Gedächtnisspanne denkt, bei der die Anzahl reproduzierter Items gemessen wird, wird der Unterschied zu diesem elementaranalytisch fundierten Diagnoseinstrument noch deutlicher. Kommen wir nun zum Einfluss der Neurowissenschaften.

3. Einfluss der Neurowissenschaften

Seit Berger (1929) gab es eine erste Möglichkeit, die elektrischen Abläufe im neuronalen Substrat an der Oberfläche des Kopfes zu registrieren. Mit der Einführung der funktionellen Magnetresonanztomographie wurden auch Stoffwechselprozesse zur Erfassung des kognitiven Geschehens genutzt. Die bildgebenden Verfahren haben einen heftigen Streit in der wissenschaftlichen Gemeinschaft ausgelöst, der bis heute anhält. Ursache des Streites ist die Euphorie über die „bunten Bilder“, gepaart mit mangelnder Sachkenntnis über den kognitiven Prozess. Eine exakte Analyse des kognitiven Prozesses, verbunden mit neurowissenschaftlichen Analysemethoden ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Analyse. Beispielgebend ist hier eine Untersuchung von Jordan und Wüstenberg (2010) über den Einfluss von Geschlecht und Erfahrung auf die Raumkognition und auf ihre Auswirkung in neuronalen Netzen. Die Befunde legen nahe, dass die Geschlechtsunterschiede in den aktivierten Arealen der Informationsaufnahme und Antworterzeugung wesentlich größer sind als in den Arealen der Raumkognition selbst. Die Konsequenzen für Trainingsprozesse liegen auf der Hand. Durch die Verknüpfung beider Disziplinen ist auch die Analyse unterschiedlicher kortikaler Netzwerke möglich (Krause, Gibbons und Schack, 1998). So lässt sich ein Netzwerk zur Begriffsaktivierung von einem Netzwerk zur Koordination von Aktivationsprozeduren unterscheiden. Die Executive in Verhaltensmodellen des Gedächtnisses hat ihre biologische Entsprechung.

Im nachfolgenden sollen drei Fälle unterschieden werden, die Schritt für Schritt eine differenziertere Betrachtung des Geschehens über der kognitiven Architektur erlauben. Die Beispiele stammen aus Gedächtnis- und Denkanforderungen.

3.1 Kortikale Areale

Die traditionelle Nutzung der Neurowissenschaften für die Analyse menschlicher Informationsverarbeitung bezieht sich auf die Registrierung der Aktivierung kortikaler Areale und deren Interpretation unter der Voraussetzung von allgemeinen Annahmen. Hier ein Beispiel: Im Rahmen der Multimodalitätshypothese wird angenommen, dass Hochbegabte zur Lösung mathematischer Probleme unmittelbar nach dem Verstehen des Problems Multimodalitätsstrategien (bildlicher und formelmäßiger Lösungsweg) aktivieren, während Normalbegabte im allgemeinen nur Einmodalität

tätsstrategien (z.B. formelmäßiger Lösungsweg, etwa pythagoräischer Lehrsatz) aktivieren. Eine mögliche Aufgabe lautet: „Für ein Quadrat mit der Diagonalenlänge $d = 5$ cm soll der Flächeninhalt verdoppelt werden. Wie lang ist die Seite des neuen Quadrates?“. Es können zwei Modalitätsstrategien zur Lösung des Problems eingesetzt werden. Eine bildhaft-anschauliche Strategie besteht im „Herausklappen“ der vier kongruenten gleichschenkelig rechtwinkligen Dreiecke, die durch Einzeichnen beider Diagonalen entstanden sind. Ein solches Vorgehen führt auf eine geometrische Figuration, welche die Lösung unmittelbar nahe legt. Eine rechnerische Strategie besteht im Anwenden des Satzes von Pythagoras (Heinrich, 1997).

Wird ein bildhaft-anschaulicher Lösungsweg bevorzugt, dann sollte das auch kortikal nachweisbar sein. In der Tat konnte mittels EEG-Kohärenzanalyse (Schack, 1997, 1999) gezeigt werden (Krause, Seidel, Heinrich, 2003a), dass mathematisch Hochbegabte im Vergleich zu Normalbegabten bereits 800 ms nach dem Verstehen der Aufgabe eine signifikant höhere Aktivierung rechts centroparietal aufweisen. Dieses Areal – bilateral – ist allgemein für bildhafte Verarbeitung zuständig. Die Präferenz rechtshemisphärisch ist durch die Differenzbildung Zweimodalitätsstrategie minus Einmodalitätsstrategie (also durch das Versuchsdesign) bedingt. Der Vorteil liegt in der Bestätigung der Erwartung vermittelt einer anderen Disziplin, hier der Neurowissenschaften. Das *offene Problem* betrifft die Hypothese. Das angenommene kortikale Areal für die Bildverarbeitung entstammt einer Stichprobe und muss nicht zwingend sein für das aktuell untersuchte Individuum. Man kann diese Schwachstelle leicht ausräumen, wenn man zu kortikalen Funktionen übergeht.

Doch zuvor sei noch auf einen *weiteren Vorteil* hingewiesen, der mit dem Einfluss der Neurowissenschaften auf die Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung verbunden ist: das *Auffinden neuer objektiver Maße für geistige Leistungen*. Aus der Analyse zum mathematischen Problemlösen hat Seidel in ihrer Dissertation (Seidel, 2004) mit Hilfe der bereits zitierten EEG-Kohärenzanalysemethode von Schack und der von Lehmann (1987) entwickelten Idee der Identifikation von Mikrozuständen (deren Verteilung quasi diskret ist (Tietze, 1996)) zeigen können, dass näherungsweise sechs Mikrozustände – also nur eine sehr geringe Anzahl – topographisch unterscheidbar sind. Trotz Variation der Anforderung treten individualspezifisch die gleichen (oder extrem ähnliche) wenige Aktivationsmuster auf. Unterstellt man, dass diese topographisch unterscheidbaren EEG-Kohärenzmuster kognitive Prozesse widerspiegeln, so drängt sich der Gedanke auf, dass sich unterschiedliche Anforderungsbewältigungen in unterschiedlichen Sequenzen – gleichsam wie bei einem Alphabet – von nur wenigen Elementarbausteinen abbilden lassen. Ein solcher Prozess bleibt mit wachsender Komplexität der Anforderungen einfach. Die Information steckt hier in der Anordnung der Mikrozustände bzw. in ihrer Zuordnung zu Positionen. Daraus ließ sich ein neues, objektives Maß für geistige Leistungen entwickeln: die Entropiereduktion (0,91 normalbegabt; 1,20 hochbegabt; 2,56 maximal), deren Nützlichkeit für Mathematikdidaktiker (Heinrich in Krause, Seidel und Heinrich, 2003a) und Konstrukteure (Krause, Seidel und Heinrich, 2003b) gezeigt wurde. *Offen* ist bislang die Frage nach der Interpretation der Mikrozustände, d.h. nach der Zuordnung der Mikrozustände zu kognitiven Prozessen bzw. Operationen. Daran wird geforscht (z.B. Lehmann und Michel, 2010).

Die EEG-Kohärenzanalyse erlaubt auch die Prüfung der Konnektivität zwischen kortikalen Arealen. Vorzugsweise für Wahrnehmungsprozesse wurde die Frage nach einer funktionalen Koppelung verschiedener Hirnareale untersucht. Mit dem Modell eines zeitlichen Integrationsmechanismus, wonach im Kortex verteilte Neuronen durch eine *Synchronisation* ihrer Entladungen zu Assemblies zusammengeschlossen werden, legte von der Malsburg (1981, 1994) den Grundstein

für zahlreiche Experimente mit Katzen und Affen, deren Resultate dieses Modell (als Lösung des sogenannten „Bindungsproblems“) stützen (vgl. z.B. Engel et al., 1997, 1998; Singer und Gray, 1995). Sommerfeld u.a. (1999) konnten die Konnektivität zwischen Hirnregionen und ihre Veränderung durch Übung beim Denken zeigen. Übung bzw. Training reduziert im allgemeinen auch die Bearbeitungszeit zur Lösung eines Problems. Diese Zeiteinsparung wird oft auf eine Verringerung kontrollierter Prozesse zugunsten automatisierter Prozesse zurückgeführt, ist aber zunächst Interpretation. Es wurde von der Annahme ausgegangen, dass sich hoher kognitiver Aufwand für Kontroll- und Steuerprozesse im Arbeitsgedächtnis in besonders starken Synchronisationen des EEG- Signals zwischen Regionen des Frontal- und des Parietalbereiches widerspiegeln. Die mit Übung gekoppelte Aufwandsreduktion ging in der Tat einher mit einer Verringerung der interregionalen Synchronisation, d.h. mit einer Verringerung der Konnektivität. Gleichzeitig wurde eine Erhöhung der lokalen Synchronisation in parietalen Bereichen gefunden. Das könnte so interpretiert werden: Der durch Übung automatisierte Lösungsprozess findet mehr und mehr in den parietalen Bereichen statt und die Exekutive wird von ihrer Kontrollfunktion entlastet.

Die Untersuchungen machen zugleich deutlich, dass Verhaltensdaten allein für ein Verständnis von Lernprozessen nicht ausreichen. Das betrifft insbesondere die Natur von Veränderungen während des Lernens, wie etwa Klassenbildung oder ähnliche Prozeduren. Die Autoren vergleichen die Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Wiederholung auf der Verhaltensebene und die relative interregionale Kohärenzdauer in Abhängigkeit von der Anzahl der Wiederholungen auf der neuronalen Ebene und finden, dass die Reaktionszeit erwartungsgemäß monoton abfällt, während die relative interregionale Kohärenzdauer einen nicht monotonen Verlauf aufweist, der sich zunächst in einem Anstieg und dann erst in einem Absinken äußert. Danach ist der Lernprozess wesentlich komplizierter als es der monotone Reaktionszeitverlauf auf der Verhaltensebene vermuten lässt. Es macht Sinn, Funktionen zu vergleichen.

3.2 Kortikale Funktionen

Die Grundidee ist folgende: Man kann einen kognitiven Prozess oder seine Eigenschaften allgemein durch Messung einer psychophysischen Funktion erfassen. Dazu wird das Antwortverhalten in Abhängigkeit von der Variation einer unabhängigen Variablen bestimmt. Zu fragen ist, ob man eine ähnliche Funktion erhält, wenn anstelle des Antwortverhaltens die Aktivierung über einem kortikalen Areal in Abhängigkeit von der Variation der unabhängigen Variablen bestimmt wird. Von der Ähnlichkeit der „externen“ und der „internen“ Funktion wird dann auf die Ähnlichkeit der Prozesse zwischen „extern“ und „intern“ bei dem untersuchten Individuum geschlossen. So bestimmten Braver u.a. (1997) die Entscheidungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Suchschritte im Gedächtnis bei einem Gedächtnisexperiment. Wie zu erwarten war, fanden sie eine ansteigende lineare Funktion: Je größer die Suchschrittanzahl, umso länger die Entscheidungszeit. Zugleich bestimmten sie in diesem Experiment den prozentualen Zuwachs des Blutflusses mittels funktionaler Magnetresonanztomographie und konnten im dorsolateralen präfrontalen Kortex, im Broca- Areal und in den parietalen Arealen links und rechts eine ähnliche Funktion in Abhängigkeit von der Anzahl der Suchschritte im Gedächtnis zeigen. Offenbar sind die genannten kortikalen Areale bei der Gedächtnissuche beteiligt.

Ob im Rahmen des Problemlösens Planungsprozesse im rostrolateralen präfrontalen Kortex stattfinden, konnte mit dieser Methode entschieden werden. Wagner (2004) bestimmte beim Lösen eines Problems vom Typ „Turm von Hanoi“ die Entscheidungszeit in Abhängigkeit von der Weite (Schrittanzahl) des gedanklichen Vorausspiels und zugleich den Zuwachs des Blutflusses mittels

funktionaler Magnetresonanztomographie. Er fand – erwartungsgemäß – für die Entscheidungszeit im Planungsprozess einen quasilinearen positiven Anstieg mit wachsender Weite des gedanklichen Vorausspiels. Eine Funktion mit gleichem Anstieg konnte er mittels funktionaler Magnetresonanztomographie über dem rostrolateralen präfrontalen Kortex bestimmen, wohingegen die Anstiege der Funktionen in anderen kortikalen Arealen signifikant schwächer waren. Die Beantwortung solcher Fragen zur Topographie ist ohne Interdisziplinarität unmöglich.

3.3 Kortikale Räume

Im Kapitel „An den Grenzen des menschlichen Verstandes“ seines Buches „Die Natur des Verstandes“ befasst sich Klix (1992) mit Weisheiten wie z.B.: „Soweit das Auge blickt, der Verstand kann weiter sehen.“ Er interpretiert den Verstehensprozess. Wir wollen das hier nicht ausführen, aber klar ist, dass wir uns damit in einer Domäne der Geisteswissenschaften befinden. Andererseits besteht kein Zweifel darüber, dass dieser Sprachverstehensprozess vom Gehirn geleistet werden muss. Zu dessen Aufklärung sind die Naturwissenschaften gefordert. Es ist die Brücke zwischen Geist und Materie, die es zu betreten gilt. Von einer Klärung des Prozesses sind wir noch weit entfernt, jedoch lassen sich *erste tastende* Schritte unter dem Stichwort „decoding mental states“ in der Literatur beobachten. Vorzugsweise für Wahrnehmungsprozesse (Chadwick u.a., 2010, Rissman u.a., 2010) ist es gelungen, aus den gemessenen Aktivationsmustern vorherzusagen, welche Szenen einer vorher gesehenen Alltagssituation eine Versuchsperson gerade erinnert. Eine dabei bevorzugte Datenanalyse orientiert auf die Erfassung eines Aktivationsmusters als Vektor im n-dimensionalen Raum. Die eindeutige Zuordnung eines Aktivationsmusters zur Szene erfolgt durch einen Lernprozess, indem vermittelt eines adaptiven Klassifikators eine Hyperebene in den n-dimensionalen Raum gelegt wird. Mit dieser – von der Klassifikation (Unger, Wysotzki, 1980) her längst bekannten – Methode gelingt auch die Unterscheidung einzelner Begriffe innerhalb einer abstrakten Kategorie (Vindiola und Wolmetz, 2010). An der Dekodierung von Aktivationsmustern bei der Satzverarbeitung wird intensiv geforscht (Haynes und Rees, 2006; Haynes, 2009a). Allerdings erklärt eine solche Dekodierung oder Zuordnung noch nicht, wie aus einem Aktivationsmuster ein bewusster Gedanke entsteht, jedoch dürften die Befunde von Haynes (2009b) aus Wahrnehmungsuntersuchungen die Richtung für Satzverstehen andeuten, die eingeschlagen wird, wenn er schreibt: „In bisherigen Untersuchungen haben wir zeigen können, dass bei Bewusstwerdung eines Reizes eine erhöhte Konnektivität zwischen frühen und späten visuellen Arealen zu beobachten ist. Solche Konnektivitätsanalysen geben Aufschluss darüber, wie entfernte Gehirnareale bei Bewusstsein ... miteinander kooperieren.“ Noch ist es ein Wechsel auf die Zukunft. Man wird sehen.

Zum Schluss ein Wort zur Ausbildung: Zweifelsfrei muss, wer auf diesem interdisziplinären Gebiet tätig werden will, von den Disziplinen Mathematik, Physik, Neurowissenschaften, Psychologie und schließlich auch Biochemie, Molekularbiologie bzw. Bioinformatik, die wir in diesem Beitrag nicht behandelt haben, Kenntnis haben. An der Universität Saarbrücken hatte sich bereits eine solche Ausbildungsrichtung Kognitionswissenschaft etabliert. Eine Ende der neunziger Jahre geplante Nebenfachausbildung Kognitionswissenschaft an der Universität Jena wurde vom Thüringer Kulturministerium abgelehnt. In der Zwischenzeit ist an der Universität Oldenburg eine Ausbildungsrichtung Kognitionswissenschaft eingerichtet worden. Diese Entwicklung lässt hoffen. Jedoch ist die Ausbildung auf diesem Gebiet nur eine erste Voraussetzung. Durch langjähriges Arbeiten in der scientific community muss – gleichsam wie in einem Schmelztiegel – eine Denkweise entstehen, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede aller Denkweisen in sich vereint und sich am Forschungsgegenstand und nicht an der durch die Disziplin diktierten Art zu fragen orientiert, die eben inter- und transdisziplinär ist.

Literatur

- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 87, 551-553
- Braver, T.S.; Cohen, J.D.; Nystrom, L.E.; Jonides, J.; Smith, E.E. & Noll, D.C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *NeuroImage*, 5, 49-62
- Brendenkamp, J.; Klein, K.-M.; von Hayn, S. & Vaterrodt, B. (1988). Gedächtnispsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. *Sprache und Kognition*, 69-83
- Brendenkamp, J. (1990). Kognitionspsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. In: H. Feger (Ed.), *Wissenschaft und Verantwortung*. Göttingen: Hogrefe
- Brendenkamp, J. (1992). Die Zeitquantenhypothese und experimentelle Daten aus Untersuchungen an einem Rechenkünstler. Vortragsmanuskript (unveröffentlicht)
- Brendenkamp, J. (2010). Kognitionspsychologische Untersuchungen eines Rechenkünstlers. Vortragmanuskript anlässlich der Naupoldsmühler Gespräche. (unveröffentlicht)
- Chadwick, M.J.; Hassabis, D.; Weiskopf, N. & Maguire, E.A. (2010). Decoding Individual Episodic Memory Traces in the Human Hippocampus. *Current Biology*, 20(6), 544-547
- Cavanagh, J.P. (1972). Relation between the immediate memory span and the memory search rate. *Psychological Review*, 79, 525-530
- Chase, W.G. & Simon, H.A. (1973). The mind's eye in chess. In: W.G. Chase (Ed.), *Visual information processing*. (pp. 215-281). New York: Academic Press
- De Groot, A.D. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague: Mouton
- De Groot, A.D. (1966). Perception and memory versus thought: Some old ideas and recent findings. In: B. Kleinmuntz (Ed.), *Problem solving*. (pp. 19-55). New York: Wiley
- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer
- Dörner, D. (1989). *Die Logik des Mißlingens*. Hamburg: Rowohlt
- Dörner, D. (2002). *Die Mechanik des Seelenwagens*. Bern: Huber
- Engel, A.K.; Roelfsema, P.R.; Fries, P.; Brecht, M. & Singer, W. (1997). Role of the temporal domain for response selection and perceptual binding. *CerebralCortex*, 7, 571-582
- Engel, A.K.; Brecht, M.; Fries, P. & Singer, W. (1998). Zeitliche Bindung und der Aufbau visueller Objektrepräsentationen. In: Kotkamp, U. & Krause, W. (Hrsg.), *Intelligente Informationsverarbeitung*. Wiesbaden: Universitätsverlag, 193-200
- Fechner, G.T. (1860). *Elemente der Psychophysik*, 2 Bände. Leipzig: Breitkopf und Härtel
- 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. (1997). Is there a Way from Behavior to Nonlinear Brain Dynamics? *International Journal of Psychophysiology*, 26, 381-393

- Haynes, J.-D. (2009a). Decoding of conscious and unconscious mental states. Forschungsprojekt Max-Planck-Institut Human Cognitive and Brain Sciences Leipzig
- Haynes, J.-D. (2009b). Dynamic changes in brain connectivity in consciousness and attention. Forschungsprojekt Max-Planck-Institut Human Cognitive and Brain Sciences Leipzig
- Haynes, J.-D. & Rees, D. (2006). Decoding mental states from brain activity in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 523-534
- Heinrich, F. (1997). Mündliche Mitteilung
- Heinrich, F. (2004). *Strategische Flexibilität beim Lösen mathematischer Probleme*. Hamburg: Kovac
- Hesse, F.W. (1991). *Analoges Problemlösen*. Weinheim: Psychologie Verlags Union
- Hörz, H. (2008). Determinismus und Stochastik. Ist die Kluft zwischen den zwei Wissenschaftskulturen zu überwinden? LIFIS ONLINE [23.10.08], http://www.leibniz-institut.de/cms/pdf_pub/hörz_23_10_08.pdf
- Jordan, J. & Wüstenberg, T. (2010). The Neural Network of Spatial Cognition and its Modulation by Biological and Environmental Factors. *Journal of Individual Differences*, 31, 83-90
- Kämpf, U. & Strobel, R. (1998). „Automatic“ position evaluation in „controlled“ change detection: Data-driven vs. concept-guided encoding and retrieval strategy components in chess players with varying degrees of expertise. *Zeitschrift für Psychologie*, 206, 23-46
- Kandel, E. et al. (1981). Ionic Mechanisms and Behavioral Functions of Presynaptic Facilitation and Presynaptic Inhibition in Aplysia. In: D. Ottoson (Ed.), *Sensory Physiology 1*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Kandel, E. (2006). *Auf der Suche nach dem Gedächtnis*. München: Siedler Verlag
- Klix, F. (1971). *Information und Verhalten*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften
- Klix, F. (1992). *Die Natur des Verstandes*. Göttingen: Hogrefe
- Klix, F. (2004). Information in Evolution und Geschichte. In: B. Krause und W. Krause (Hrsg.), *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften*. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät. 12. Berlin: trafo, 27-48
- Klix, F. & Krause, B. (1969). Zur Definition des Begriffes „Struktur“, seinen Eigenschaften und Darstellungsmöglichkeiten in der Experimentalpsychologie. *Zeitschrift für Psychologie*, 176, 22-54
- Köhler, M. (2008). Nanotechnologie – Realität und Visionen. LIFIS ONLINE [01.02.08], http://www.leibniz-institut.de/archiv/köhler_01_02_08.pdf
- Krause, W. (1970). Untersuchungen zur Komponentenanalyse in einfachen Problemlöseprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, 177, 199-249
- Krause, W. (2000). *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen: Hogrefe
- Krause, W. (2006). Außergewöhnliche menschliche Informationsverarbeitung – Extremgruppenvergleiche. <http://www.leibniz-sozietat.de/journal>, Nr.2/2006

- 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: U. Lindemann (Ed.), *Human Behaviour in Design*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 63-71
- Krause, W. & Seidel, G. (2004). Biologische Grundlagen des Verstandes. In: B. Krause & W. Krause (Hg.), *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften*. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät, 12. Berlin: trafo, 189-214
- 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
- Lehmann, D. & Michel, M. (2010). EEG – defined functional microstates as basic building blocks of mental processes. *Clinical Neurophysiology*, Nov.3, in press. doi: 10.1016/j.clinph.2010.11.003
- Lüer, G.H. (1987). *Allgemeine Experimentelle Psychologie*. Stuttgart: Fischer
- Lüer, G. & Laß, U.H. (1997). *Erinnern und Behalten*. Göttingen: Vandenhoeck & Rupprecht
- Malsburg, C. von der (1981). The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Göttingen. Max-Planck-Istitut für Biophysikalische Chemie. Reprinted (1994). In: Domany, E.; van Hemmen, J.L. & Schulten, K. (Eds.), *Models of Neural Networks II*. Berlin: Springer, 95-119
- Mesarovic, M.D. (1964). Toward a formal theory of problem solving. In: V. Sass & W. Wilkinson (Eds.), *Computer augmentation of human reasoning*. Washington
- Puffe, M. (1990). Quantized speed-capacity relations in short term memory. In: H.-G. Geissler (Ed.), *Psychophysical Explorations of Mental Structures*. (pp. 290-302) Göttingen: Hogrefe
- Rissman, J.; Greely, H. T. & Wagner, A.D. (2010). Detecting individual memories through the neural decoding of memory states and past experience. *Psychological and Cognitive Sciences*, 107, 9849-9854. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1001028107>
- Schack, B. (1997). Adaptive Verfahren zur Spektralanalyse instationärer Mehrdimensionaler Biologischer Signale. *Habilitationsschrift*, Technische Universität Ilmenau
- Schack, B. (1999). Dynamic Topographic Spectral Analysis of Cognitive Processes. In: Ch. Uhl (Ed.), *Analysis of Neurophysiological Brain Functioning*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Seidel, G. (2004). *Ordnung und Multimodalität im Denken mathematisch Hochbegabter: sequentielle und topologische Eigenschaften kognitiver Mikrozustände*. Berlin: WVB
- Singer, W. & Gray, C.M. (1995). Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 555-586

- Sommerfeld, E. (1979). Zur Analyse und Synthese von Problemlösungsprozessen bei einer Klasse von Zerlegungsproblemen. Dissertation, Akademie der Wissenschaften der DDR, Berlin
- Sommerfeld, E. (1991). Inferenzprozesse und kognitiver Aufwand. In: W. Krause, E. Sommerfeld & M. Ziebler (Eds.), *Inferenz- und Interpretationsprozesse*. 127-172. Jena: Universitätverlag
- Sommerfeld, E. (1994). *Kognitive Strukturen*. Münster: Waxmann
- Sommerfeld, E.; Krause, W.; Schack, B.; Markert, C.; Pies, R. & Tietze, H. (1999). Die Messung von Übungs- und Trainingserfolg auf der Grundlage von EEG-Parametern. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 13, 60-73
- Sprung, L. & Sprung, H. (2010). *Eine kurze Geschichte der Psychologie und ihrer Methoden*. München, Wien: Profil-Verlag
- Sydow, H. (1970). Zur metrischen Erfassung von subjektiven Problemzuständen und zu deren Veränderung im Denkprozeß II. *Zeitschrift für Psychologie*, 178, 1-50
- Tietze, H. (1996). Prozessanalyse von Vergleichsprozessen mittels Segmentierung. Diplomarbeit, Institut für Psychologie der Universität Jena
- Timpe, K.-P. (1968). Ansätze zur Modellierung eingeübter sensomotorischer Prozesse (Das Regelverhalten des Menschen). In: Klix, F. (Hrsg.), *Kybernetische Analysen geistiger Prozesse*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 106-136
- Unger, S. & Wysotzki, F. (1980). *Lernfähige Klassifizierungsprozesse*. Berlin: Akademie-Verlag
- Vindiola, M. & Wolmetz, M. (2010). Mental encoding and neural decoding of abstract cognitive categories: A commentary and simulation. *Neuroimage*, 23
- Wagner, G. (2004). Spezifische Rolle des dorsolateralen und des rostralateralen präfrontalen Kortex beim Planen: eine fMRT-Untersuchung mit dem Tower-of-London Paradigma. *Dissertationsschrift*, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften
- Waldmann, M. & Weinert, F.E. (1990). *Intelligenz und Denken*. Göttingen: Hogrefe
- Wangermann, G. (2008). Zwei Wissenschaftskulturen? – Ein Exkurs in eigener Sache. LIFIS ONLINE [15.09.08], http://www.leibniz-institut.de/archiv/wangermann_15_09_08.pdf

[18.04.11]

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Werner Krause
Anna-Siemsen-Str. 40
D – 07745 Jena
urwe.krause@t-online.de