

Erdmute Sommerfeld

**Aufklärung von Basisprozessen menschlicher
Informationsverarbeitung
Ein systematischer Zugang durch Elementaranalyse von
Denkprozessen bei der Lösung von Ordnungsproblemen?**
Friedhart Klix zum 80. Geburtstag gewidmet¹

1. Einleitung

Um Erkenntnisse über die menschliche Informationsverarbeitung zu gewinnen, ist es erforderlich zu untersuchen, wie der Mensch Informationen aus der Umgebung aufnimmt, behält und verändert und wie er auf dieser Grundlage kognitive Anforderungen bewältigt. Die Information liegt dabei z.B. in Form eines Textes oder eines Bildes vor. Eine kognitive Anforderung kann darin bestehen, einen Text zu verstehen und zu behalten, ein Bild wahrzunehmen und zu interpretieren oder auch ein Problem zu lösen. Will man über diese Prozesse differenzierte Aussagen machen, muss man die Elementarkomponenten der menschlichen Informationsverarbeitung genauer kennen.

Welches sind die *Elementarkomponenten* menschlicher Informationsverarbeitung? Und wie sehen theoretische und experimentelle Zugänge zu ihrer Erforschung aus?

Die Frage nach den Elementarkomponenten impliziert die Suche nach elementaren Denkmustern, die bei ganz unterschiedlichen Problemlösungen und in ganz unterschiedlichen Kontexten immer wieder die menschliche Informationsverarbeitung bestimmen.

Friedhart Klix (1927–2004) widmet dieser Frage nach invarianten Eigenschaften des menschlichen Verstandes seine Aufmerksamkeit und schreibt dazu in der Einleitung zu seinem Buch „Die Natur des Verstandes“ (Klix, 1992, S. 20):

1 Überarbeitete und gekürzte Fassung des Vortrags in der Klasse für Naturwissenschaften am 20. Januar 2005. Ausführliche Fassung in Leibniz Online 2009.

„Das (Auftreten solcher ‚Grundmuster geistiger Gebilde und Vorgänge‘) wird in vielen Beispielen deutlich, und es nährt den Verdacht, dass hinter dieser Vielfalt geistiger Phänomene relativ wenige, vermutlich *einfach und klar ausdrückbare Grundgesetze* stecken, die heute noch niemand kennt, die aber ein verlockendes Ziel für eine Psychologie geistiger Prozesse im nächsten Jahrhundert werden könnten. Wer dies als Erster erahnt haben mag, war wohl Descartes, als er schrieb: ‚Das Menschliche Denkvermögen bleibt immer ein und dasselbe, wenn es sich auch den verschiedensten Gegenständen zuwendet, und es erfährt durch ihre Verschiedenartigkeit ebenso wenig eine Veränderung wie das Sonnenlicht durch die Mannigfaltigkeit der Gegenstände, die es bestrahlt.‘“

Eine systematische Elementaranalyse auf der Grundlage einer engen *Wechselbeziehung zwischen Psychologie und Mathematik* ist erforderlich, um *Basisprozesse* der menschlichen Informationsverarbeitung aufzuklären.

Im vorliegenden Beitrag wird für eine Klasse von Anforderungen aus der Denkpsychologie ein Ausschnitt eines möglichen systematischen Zugangs zur Aufklärung von Basisprozessen im Denken vorgestellt.

Die untersuchte Problemklasse ist die Klasse der linearen Ordnungsprobleme (vgl. z.B. Pliske & Smith, 1979; Groner, 1978; Krause, 1985, 2000; Sommerfeld, 1994). Für die Lösung eines linearen Ordnungsproblems bekommen die Versuchspersonen (Vpn) Aussagen der Form „ $v_i r v_j$ “ ($i, j = 1, \dots, n$) über Paare („ v_i, v_j “) von n Elementen (einer gegebenen Menge), die in einer Ordnungsrelation (d.h. in einer transitiven, irreflexiven, asymmetrischen Relation) r stehen, sukzessiv dargeboten. Die Elemente sind z.B. Begriffe oder Bilder (bzw. Bildelemente). Über der Menge der Elemente besteht eine lineare Ordnung bezüglich r . Die Versuchspersonen erhalten nur Informationen über Elemente, die in dieser Ordnung direkt benachbart sind (dargeboten in einer Zufallsreihenfolge). Sie müssen auf der Grundlage der extern gegebenen Information über die Menge von Aussagen der Form „ $v_i r v_j$ “ eine interne Repräsentation aufbauen, um in der anschließenden Phase die an sie gestellte kognitive Anforderung bewältigen zu können. Diese Anforderung besteht darin, alle möglichen Fragen der Art „ $v_k r v_l$?“ ($k, l = 1, \dots, n$) nach gegebener und daraus ableitbarer Information beantworten zu können.

Was spricht für und was gegen diese Klasse kognitiver Anforderungen als ein Paradigma zur Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung?

Ein Ordnungsproblem ist eine relativ elementare kognitive Anforderung. Somit ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse entsprechend eingeschränkt. Dem Nachteil einer eingeschränkten Generalisierbarkeit steht der Vorteil ge-

genüber, dass entscheidende Grundlagen dafür gegeben sind, *präzisierte* Aussagen zu erhalten. Das betrifft zum einen die relativ gute Formalisierbarkeit dieser Klasse kognitiver Anforderungen (vgl. Groner, 1978; Sommerfeld, 1994) und zum anderen die Möglichkeit der experimentellen Erfassung interner (mentaler) Repräsentationen auf der Basis des Symbol-Distanz-Effektes (Pliske & Smith, 1979; Krause, 1985). Wie sich außerdem in zahlreichen experimentellen Untersuchungen gezeigt hat, ist der Prozess zur Bewältigung von Ordnungsproblemen durch Operationen gekennzeichnet, die auch in komplexeren Situationen für die menschliche Informationsverarbeitung charakteristisch sind.

2. Kognitive Strukturen und Operationen

2.1 Kognitive Strukturen und Operationen: Grundbausteine der menschlichen Informationsverarbeitung

Eine Voraussetzung dafür, dass der Mensch mit Hilfe extern gegebener Information eine kognitive Anforderung bewältigen kann, besteht darin, dass er eine auf dieser Information basierende interne Repräsentation aufbaut bzw. eine vorhandene interne Wissensrepräsentation entsprechend modifiziert. Offensichtlich spielen dabei solche internen Repräsentationen eine Rolle, die nicht nur Information über Elemente und ihre Merkmale repräsentieren, sondern Information, die insbesondere durch Beziehungen zwischen ihren Elementen gekennzeichnet ist – z.B. durch grammatikalische Relationen zwischen den Worten eines Textes, durch räumliche Relationen zwischen den Teilen eines Bildes oder auch durch Beziehungen zwischen Personen. Eine solche Information wird als strukturierte oder *strukturelle Information* bezeichnet (vgl. auch Klix, 1971). Strukturelle Information kann sowohl extern als auch intern repräsentiert (getragen) werden. Träger struktureller Information ist extern z.B. ein Text oder ein Bild und intern eine *kognitive Struktur*.

Kognitive Strukturen sowie Operationen zu ihrer Erzeugung, Veränderung und Abarbeitung sind *Grundbausteine* geistiger Vorgänge (vgl. auch Klix, 1992, 1993). Die Entwicklung adäquater formaler Beschreibungsmittel für kognitive Strukturen und Operationen der menschlichen Informationsverarbeitung ist für die Denkpsychologie von entscheidender Bedeutung.

Während es für die modelltheoretische Beschreibung von kognitiven Strukturen eine Reihe von Ansätzen gibt, stehen systematische Elementaranalysen zu *Vollständigkeitsbetrachtungen* in Verbindung mit der *formalen Erfassung von Operationen* der Ausbildung und Veränderung kognitiver

Strukturen noch am Anfang (vgl. Sommerfeld, 1994, 2009; Anderson, 2004, Goodwin & Johnson-Laird, 2005).

Wegweisend für die Entwicklung einer Systematik sind die kognitiven Operationen und Prozeduren im Modellansatz zur menschlichen Wissensrepräsentation und -verarbeitung von Klix (1992, 1993). Die Kenntnisse darüber stammen aus fünf verschiedenen Gebieten psychologisch relevanten Geschehens: aus der Evolution der Lernprozesse (vgl. dazu auch Klix & Lanius, 1999; Klix, 2004), aus perzeptiven Vorgängen, aus dynamischen Strukturbildungen begrifflichen Wissens, aus der Behandlung konstruktiver Denkprozesse und aus Analysen kognitiver Komponenten in Technologien. Die Menge der Operationen ist hier empirisch begründet. Im Gegensatz dazu ist es unser Anliegen, kognitive Operationen von einer theoretisch-systematischen Betrachtung her zu definieren.

2.2 Kognitive Strukturoperationen: Modellansatz zur Systematisierung und Formalisierung

Für die Entwicklung des Ansatzes zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Operationen dienten Übersichten über kognitive Operationen aus den in Sommerfeld (1994, 2009) diskutierten Arbeiten als Grundlage. Die Grundbausteine für die Systematik sind elementare kognitive Operationen bei der Ausbildung und Veränderung interner Repräsentationen auf der Basis extern gegebener struktureller Information.

Als erstes stellt sich die Frage nach den *Kriterien* für die *Systematisierung*. Da sich bei der Anwendung kognitiver Operationen zur Ausbildung und Veränderung kognitiver Strukturen sowohl die repräsentierte *Information* als auch die diese Information repräsentierende (tragende) kognitive *Struktur* ändern können, stellen diese Änderungen psychologisch relevante Kriterien für eine Systematik dar. Unter diesem Aspekt wurden Vollständigkeitsbetrachtungen durchgeführt. Für die Systematisierung von Änderungen der strukturellen Information ist – ausgehend vom Grundgedanken der Strukturellen Informationstheorie von Leeuwenberg (1968) – ein Ansatz zur Bestimmung des strukturellen Informationsgehaltes entwickelt worden, der Aussagen über das Vorhandensein spezifischer Relationen zwischen den Elementen einer Struktur macht. Die formale Beschreibung des Modellansatzes ist in Sommerfeld & Sobik (1994), Sommerfeld (1994, 2008) enthalten. In der Abbildung 1 ist die auf dieser Grundlage entwickelte Systematik elementarer kognitiver Operationen in einer Übersicht dargestellt.

Struktur / Struktureller Informationsgehalt	keine Änderung	Vergrößerung	Verkleinerung	Vergrößerung in Verbindung mit Verkleinerung
keine Änderung	isomorphe Abbildung	Hinzufügen von Redundanz	Entfernen von Redundanz	Hinzufügen in Verbindung mit dem Entfernen von Redundanz
Vergrößerung	–	Inferenz, Integration, Elaboration	Entfernen von Widersprüchen	Inferenz, Integration, Elaboration in Verbindung mit dem Entfernen von Widersprüchen
Verkleinerung	–	Hinzufügen von Widersprüchen	Selektion, Reduktion	Selektion, Reduktion in Verbindung mit dem Hinzufügen von Widersprüchen
Vergrößerung und Verkleinerung	–	Inferenz, Integration, Elaboration in Verbindung mit dem Hinzufügen von Widersprüchen	Selektion, Reduktion in Verbindung mit dem Entfernen von Widersprüchen	hierarchische Strukturbildung, Bildung eines mentalen Modells

Abb. 1: Kombination von Struktur- und Informationsänderungen bei kognitiven Strukturtransformationen (basierend auf Sommerfeld, 1994)

Zur *Formalisierung* der systematisierten kognitiven Strukturoperationen wurde – anknüpfend an Arbeiten von Klix & Krause (1969), Sydow (1980) – die Graphentheorie gewählt (Sommerfeld & Sobik, 1994, Sommerfeld, 1994, 2008).

Aussagen über die *psychologische Relevanz* des Modellansatzes erhält man durch den experimentellen Nachweis von Teilmengen der kognitiven Operationen der theoretischen Systematik. Im Sinne von Hörz (2007, S. 45-51 und 88-99) ist damit der Übergang von den relativen Apriori der Mathematik als den möglichen formalisierbaren Strukturen zu den durch Erfahrung erkannten und bestimmten realisierten Möglichkeiten erforderlich.

2.3 Kognitive Strukturoperationen: Experimenteller Nachweis

Der Nachweis der psychologischen Relevanz des gewählten Ansatzes wurde zum einen durch die Einordnung psychologisch relevanter Operationen von Modellansätzen und experimentellen Ergebnissen aus der Literatur in die Systematik erbracht (vgl. Sommerfeld, 1994, 2009). Zum anderen ist die Anwendung des Ansatzes auf konkrete Problemstellungen notwendig. In Wechselbeziehung zwischen Modell und Experiment wurden dazu Untersuchungen mit *Ordnungsproblemen* durchgeführt (für die formale Definition eines Ordnungsproblems, die Instruktion und den detaillierten Versuchsablauf siehe Sommerfeld, 1994). Der experimentelle Beleg wurde auf der Basis eines von Krause (1985) entwickelten Verfahrens erbracht, das auf der Nutzung von Reaktionszeitfunktionen basiert. Damit konnte ein psychologisch relevanter Teil der theoretisch bestimmten kognitiven Strukturtransformationen experimentell nachgewiesen werden (vgl. Krause et al., 1986; Sommerfeld, 1994, Krause, 2000). Das betrifft Prozesse der *Inferenz* und der *Selektion* von Information sowie die *integrative* und die *hierarchische* Strukturbildung (siehe Diagonale der Matrix in Abb. 1).

Mit der Suche nach den kognitiven Operationen ist die Frage verbunden, durch welche Prinzipien die Anwendung der Operationen *gesteuert* wird. Neben Kriterien wie „Erzielung einer hohen Lösungsgüte“ und „Verringerung von Unbestimmtheit“ spielen Prinzipien der *kognitiven Ökonomie* eine besondere Rolle.

3. Kognitive Ökonomie

3.1 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Prinzip der kognitiven Ökonomie in der menschlichen Informationsverarbeitung

Kognitive Ökonomie äußert sich in der Reduktion von Komplexität. Prinzipien der kognitiven Ökonomie sind auf der Basis von Prinzipien der *Reduktion des kognitiven Aufwandes* quantifizierbar.

Vereinfachungsprinzipien betreffen z.B. die Ausnutzung von Regularitätä-

ten, Klasseneigenschaften und Symmetrien zur Bildung, Repräsentation und Verarbeitung von Strukturen und Prozessen sowie Prinzipien der Selektion und Integration von Information (Klix, 1992, 1993, 2004; Krause, 1994, 2000). In seinen Analysen geistiger Leistungen aus evolutionspsychologischer Sicht hebt Klix hervor, dass kein Verstoß dagegen gefunden wurde, dass die wirkungsvollere Lösung immer auch die einfachere war. So setzte sich z.B. bei der Schrift nach einem langen historischen Prozess das Alphabet als einfachste Lösung durch (Klix, 2003, S. 275). Kernpunkt der Untersuchungen von Krause ist die Annahme, dass Ordnungsbildung als aufwandsreduzierende Strukturierung und Umstrukturierung von Wissen und Prozeduren eine Basiskomponente des Denkens darstellt. So konnte in unterschiedlichen Bereichen der Psychologie das Prinzip der aufwandsarmen Strukturierung nachgewiesen werden. Bei der Analyse von Modellansätzen der internen Repräsentation, des Erwerbs, der Transformation und der Nutzung von Wissen zeigt sich, dass die Reduktion des kognitiven Aufwandes eine zentrale Bedeutung als Steuer- und Bewertungskriterium in der menschlichen Informationsverarbeitung hat (ausführlich in Sommerfeld, 1994, 2009).

Die Erfassung und Differenzierung solcher Parameter der kognitiven Ökonomie erfordert eine systematische Analyse und formale Spezifizierung von *Komponenten* des kognitiven Aufwandes.

3.2 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Ansatz zur Bewertung kognitiver Strukturoperationen

Soll eine kognitive Anforderung auf der Grundlage einer extern gegebenen Information bewältigt werden, müssen geeignete interne Repräsentationen erzeugt bzw. eine vorhandene interne Repräsentation entsprechend modifiziert werden, die dann eine Grundlage für die Anforderungsbewältigung bildet. Diese Prozesse können mit unterschiedlich hohem kognitivem Aufwand realisiert werden. Auch der Aufwand, um eine solche Repräsentation im Gedächtnis zu behalten, kann unterschiedlich hoch sein. Die sich daraus ergebenden Aufwandsparameter sind der *Erzeugungs- und Transformationsaufwand*, der *Strukturnutzungsaufwand* und der *Behaltensaufwand*. Wir haben den kognitiven Aufwand als Funktion dieser drei Komponenten untersucht (vgl. Krause et al., 1986; Sommerfeld, 1994; Krause, 2000). Anknüpfend an Ansätze aus der Literatur wurden Struktur- und Prozessparameter analysiert, von denen anzunehmen ist, dass sie die genannten Aufwandskomponenten maßgeblich determinieren. Mit Bezug dazu wurde der Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturoperationen durch einen An-

satz zur Bewertung der Effizienz solcher Operationen auf der Basis des kognitiven Aufwandes erweitert. Im Rahmen dieses Beitrags beziehen wir uns nur auf den Behaltensaufwand und den Strukturnutzungsaufwand.

In Anknüpfung an Leeuwenberg (1968) wird im Modellansatz der (minimale) Behaltensaufwand einer Struktur auf die minimale Anzahl von Elemente- und Klassenmerkmalen zurückgeführt, die zur Beschreibung dieser Struktur notwendig ist. Eine solche minimale (im Sinne des Behaltensaufwandes minimisierte) Beschreibung basiert im Allgemeinen maßgeblich auf der Ausnutzung von Regularitäten, Klasseneigenschaften und Symmetrien.

Für die Analyse der Komponenten des Strukturnutzungsaufwandes sind wir von der Annahme ausgegangen, dass Prozesse der Nutzung interner Repräsentationen auf der Grundlage der – in kognitiven Prozessen mehrfach nachgewiesenen – Abarbeitung von Entscheidungsstrukturen beschrieben werden können. Basierend darauf wird der (minimale) Aufwand zur Bewältigung einer bestimmten kognitiven Anforderung bei Nutzung einer spezifischen kognitiven Struktur auf der Grundlage eines Weges mit minimaler Bewichtung durch eine mit Operationszeiten bewichtete Entscheidungsstruktur bestimmt (zur Formalisierung, Spezifizierung und Verknüpfung der Parameter siehe Sommerfeld, 1994 und 2009).

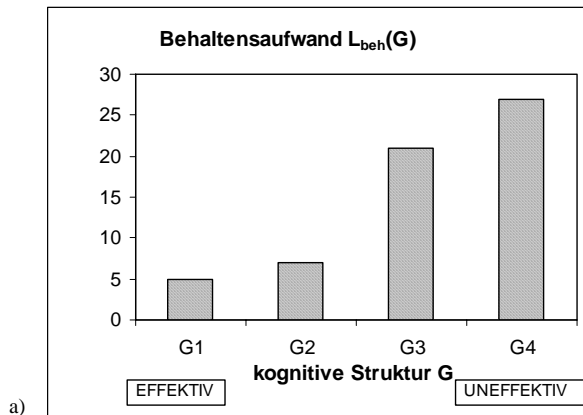
Es stellt sich nun die Frage, ob durch das Modell als *effektiv* charakterisierte kognitive Strukturen von den Vpn bevorzugt ausgebildet und bei Anforderungen aus unterschiedlichen Bereichen zur Lösungsfindung genutzt werden. Um einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage zu leisten, wurden auf der Grundlage des Modellansatzes Rangreihen kognitiver Strukturbildungen bezüglich ihrer Effektivität für die Bewältigung konkreter Anforderungen berechnet und im Experiment die für die Anforderung genutzten kognitiven Strukturen bestimmt. Unter diesem Gesichtspunkt haben wir einerseits Ordnungsprobleme mit *unbekannter* Information (bezüglich der Ordnungsrelation über der Menge der Elemente) und andererseits Ordnungsprobleme mit *wissensgestützter* Information verwendet. Für diese Problemklassen wurde untersucht, ob bzw. unter welchen Bedingungen das *Prinzip der Aufwandsreduktion* in der Lösungsfindung *verhaltenswirksam* wird.

3.3 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Experimenteller Nachweis

Für Probleme mit unbekannter Information stellt sich die Frage nach einer *effektiven Strukturierung neuer Information*. Um solche Probleme zu lösen, müssen sich die Vpn in einer für sie unbekanntem Situation zurechtfinden. Bei Ordnungsproblemen dieser Problemklasse ist eine relativ umfangreiche Menge von Aussagen möglichst geeignet im Gedächtnis zu strukturieren. Für un-

verschiedene Strukturierungen bestehen dabei im Allgemeinen relativ große Unterschiede im Behaltensaufwand.

Effektive Strukturierung neuer Information
Modell



Experiment

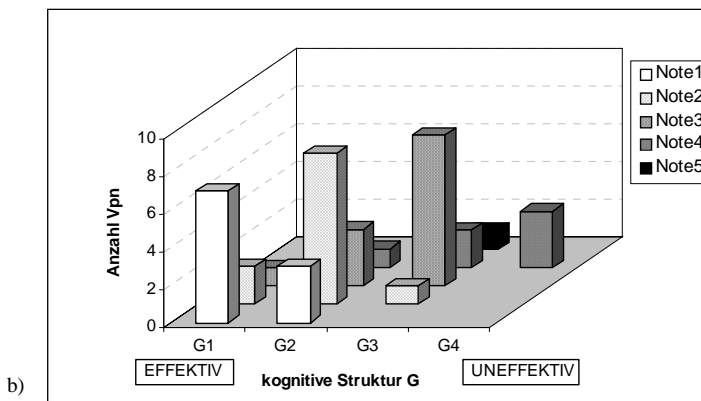


Abb. 2: Lösen eines Ordnungsproblems auf der Grundlage neuer Information: Modellwerte für den Behaltensaufwand und experimentelle Ergebnisse (basierend auf Krause et al., 1986; Sommerfeld, 1994; Krause, 2000).

- a) Modellwerte: Kognitiver Aufwand $L_{beh}(G) = nmerk(G)$ für das Behalten unterschiedlicher hierarchischer Strukturen $G=G1, G2, G3$, bzw. $G4$ ($nmerk(G)$: Merkmalsanzahl)
- b) Experimentelle Ergebnisse: Vpn gegliedert nach ihrer Leistungsfähigkeit beim Lösen komplexer fachspezifischer Probleme (Parameter: Zensuren für das Lösen der Probleme)

Um die Fähigkeit zur Verringerung der Komplexität untersuchen zu können, wurde ein Ordnungsproblem gewählt, dessen Lösung auf der Basis verschiedener hierarchischer Strukturierungen eine Komplexitätsreduktion unterschiedlichen Grades erlaubt. Problemstellung, Modelle und Aufwandsberechnungen sowie Experimente und Ergebnisse dazu sind in Krause et al. (1986), Sommerfeld (1994) und Krause (2000) detailliert beschrieben.

In der Abbildung 2 sind die *Ergebnisse* in der Übersicht dargestellt. Es zeigt sich, dass *leistungsstarke* Vpn bevorzugt kognitive Strukturen ausbilden, die entsprechend dem zugrunde gelegten Modellansatz durch einen *geringen kognitiven Aufwand* gekennzeichnet sind.

Der experimentelle Beleg dafür, dass *gute Problemlöser* in unbekanntem Situationen mit aufwandsarmen kognitiven Strukturen arbeiten, ist für eine diagnostische Fragestellung interessant, da die Ausbildung und Nutzung effizienter kognitiver Strukturen in unbekanntem Situationen von der Fähigkeit einer Person zur Reduktion kognitiver Komplexität zeugen. Die Fähigkeit zur Komplexitätsreduktion in der menschlichen Informationsverarbeitung ist ein Charakteristikum intelligenten Verhaltens (Klix, 1993) und stellt ein wesentliches Merkmal der Kompetenz dar (Krause, 2000). In Untersuchungen zu Invarianzleistungen beim Denken in komplexen und elementaren Problemlöseprozessen konnte Kotkamp (1999) weitere Ergebnisse zu einem solchen *bereichsübergreifenden, personenspezifischen* Wirkprinzip im Denken erzielen: Wer beim elementaren Problemlösen vereinfacht, vereinfacht auch beim komplexen Problemlösen.

Die Frage nach einer anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen stellt sich, wenn man untersucht, ob bzw. unter welchen Bedingungen das Prinzip der Aufwandsreduktion bei der Nutzung von Wissensstrukturen aus dem Langzeitgedächtnis für die Lösungsfindung verhaltenswirksam wird.

Im Rahmen der Frage nach Kriterien für eine anforderungsabhängige Umstrukturierung von Wissen untersuchten wir Probleme mit Elementen aus der Konstruktionswissenschaft. Problemstellungen, Modelle und Aufwandsberechnungen sowie Experimente dazu sind in Krause et al. (1989), Sommerfeld (1994) und Krause (2000) beschrieben. Der geringe Behaltensaufwand konnte als nahezu konstant angenommen werden. Relativ große Unterschiede gab es jedoch im Strukturnutzungsaufwand. Um zu untersuchen, ob die Vpn ihre (in der Vorlesung gelehrt und für Konstruktionsprobleme vorteilhaft) Wissensstrukturen stereotyp beibehalten oder anforderungsabhängig umstrukturieren, wurde das zu lösende Problem nicht als Konstruktionsproblem,

sondern als ein – für Konstrukteure nicht typisches – Ordnungsproblem behandelt. Die *Resultate* der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass zur Bewältigung der charakterisierten Anforderung von den meisten Vpn nicht die in der Vorlesung gelehrtens Wissensstrukturen genutzt werden. Vielmehr werden ausgebildete Wissensstrukturen anforderungsabhängig so *umstrukturiert*, dass durch Nutzung dieser kognitiven Strukturen der Lösungsprozess *vereinfacht* wird. Ein entsprechendes Ergebnis wurde auch bei Experten mit mehr als zehnjähriger Berufserfahrung gefunden (Kotkamp, 1999).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der experimentellen Versuchsserien sowohl mit wissensgestützter als auch mit unbekannter Information, dass das *Prinzip der Aufwandsreduktion verhaltenswirksam* ist. Bereits durch das relativ einfache Modell als effektiv charakterisierte kognitive Strukturen werden von den Versuchspersonen bevorzugt ausgebildet und zur Anforderungsbewältigung genutzt. Das betrifft zum einen die anforderungsabhängige *Umstrukturierung von Fachwissen*, die von fast allen Versuchspersonen durchgeführt wird. Das betrifft zum anderen die *effiziente Strukturierung neuer Information* insbesondere durch leistungsstarke Personen, womit neue Möglichkeiten für eine Diagnostik geistiger Leistungen auf der Basis bewerteter kognitiver Strukturoperationen eröffnet werden.

Verhaltensdaten allein sind jedoch nicht ausreichend für ein Verständnis der dabei ablaufenden Prozesse. Das bezieht sich hier insbesondere auf die Frage, welche Änderungen von Prozessen im Gehirn mit Änderungen im kognitiven Aufwand einher gehen. Eine Elementaranalyse auf der Basis einer Verbindung von Verhaltensdaten mit neuropsychologischen Maßen kann zur Beantwortung der Frage beitragen.

3.4 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Komplexitätsreduktion und Übung im Zusammenhang mit der synchronen Aktivität von Hirnarealen

Da kognitive Prozesse auf einer parallelen und verteilten Informationsverarbeitung basieren, gewinnt der Aspekt einer *funktionalen Kopplung* verschiedener Instanzen im Gehirn für die Elementaranalyse von Denkprozessen mehr und mehr an Bedeutung. Die Frage nach einem Mechanismus, der das Zusammenwirken verschiedener Hirnregionen in der Informationsverarbeitung kennzeichnet, wurde zuerst in der Wahrnehmungsforschung gestellt. Mit dem Modell eines zeitlichen Integrationsmechanismus, wonach im Kortex verteilte Neuronen durch eine Synchronisation ihrer Entladungen zu As-

semblies zusammengeschlossen werden, legte von der Malsburg (1994) den Grundstein für zahlreiche Experimente, deren Resultate dieses Modell – als Lösung des sogenannten „Bindungsproblems“ – stützen (vgl. z.B. Singer & Gray, 1995). Der Neurowissenschaftler Eric Kandel weist in seinen Ausführungen über das menschliche Denken und die kognitiven Neurowissenschaften darauf hin, dass selbst die einfachsten kognitiven Aufgaben die Koordination mehrerer Gehirnregionen erfordern (vgl. z.B. Kandel, 2006).

Wir fragen nach Unterschieden in der synchronen Aktivität von Hirnarealen bei elementaren Denkprozessen zu Lösung von Ordnungsproblemen, für deren Realisierung unterschiedlich hoher kognitiver Aufwand erforderlich ist.

Analysiert man mit Bezug dazu entsprechende Untersuchungen auf der Grundlage von bildgebenden Verfahren, wie der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und der funktionalen Kernspin-Tomographie (fMRT), so sprechen die Ergebnisse dafür, dass frontale und posteriore – speziell parietale – Bereiche des Gehirns zusammen eine Rolle beim aktiven Behalten und beim „Zur-Verfügung-Stellen“ von Information im Arbeitsgedächtnis spielen (vgl. z.B. Braver et al., 1997; Champod & Petrides, 2007). Vor diesem Hintergrund ist es interessant, unter dem Aspekt einer funktionalen Kopplung die Frage nach dem *Zusammenwirken* frontaler Hirnregionen (als Instanzen für die exekutive Kontrolle) mit posterioren Regionen (als Instanzen für die Speicherung und Verarbeitung von Information) bei der Bewältigung kognitiver Anforderungen unterschiedlicher Komplexität zu stellen.

Aussagen zur *synchronen* Aktivität von Hirnarealen können mit Hilfe der EEG-Kohärenz gemacht werden (vgl. z.B. Rappelsberger & Petsche, 1988; Schack et al., 1999). Literaturanalysen belegen, dass bei starker Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch kurzzeitig zu behaltende Information hohe Kohärenzen zwischen frontalen und posterioren Hirnarealen ermittelt wurden. Von besonderem Interesse mit Bezug zur untersuchten Fragestellung sind dabei die Ergebnisse, die zeigen, dass das Beta1-Frequenzband (ca. 13–20 Hz) sensitiv für Vergleichsprozesse ist, wie sie bei der Lösung von Ordnungsproblemen eine Rolle spielen (vgl. z.B. Weiss & Rappelsberger, 1996; Petsche & Ettliger, 1998; Krause et al., 1998). An dieser Stelle knüpfen unsere Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Differenzen im kognitiven Aufwand und Differenzen in der synchronen Aktivität spezifischer Hirnareale bei der Lösung von Ordnungsproblemen mit unbekannter Information an. Auf ausgewählte Experimente und dabei erzielte Resultate soll im Folgenden kurz Bezug genommen werden.

Es wurde die *synchrone Aktivität von Hirnarealen* in Abhängigkeit von der *Komplexität der Anforderung* untersucht (Köhler et al., 2002). Unabhängige Variable war die Anzahl der Elemente der linearen Ordnung (als Operationalisierung der Komplexität). Als abhängige Variable wurde (neben der Reaktionszeit) als Messgröße für starke Synchronisationen die EEG-Kohärenzdauer zwischen frontalen und parietalen Elektrodenpositionen im Beta1-Frequenzband bestimmt. Zur Kohärenzberechnung wurde das Verfahren von Schack eingesetzt (Schack et al., 1999). Die Kohärenzdauer ist das gesamte Zeitintervall hoher Kohärenz (über einer definierten Schwelle) innerhalb des Reaktionszeit-Intervalls. Problemstellungen, Experimente sowie die Ergebnisse und ihre Diskussion sind in Köhler et al. (2002) und Sommerfeld (2008) beschrieben. Die *Ergebnisse* für eine Untersuchungsstichprobe von 16 Vpn zeigen, dass es bei *wachsender Elementanzahl* für ganz bestimmte frontoparietale Elektrodenpaare schwerpunktmäßig zentral und linkshemisphärisch zu einer signifikanten *Zunahme der synchronen Aktivität* (gemessen auf der Basis der EEG-Kohärenzdauer) kommt. Folgt man dem Modell eines zeitlichen Integrationsmechanismus nach von der Malsburg (1994), spricht das für eine *Verringerung der funktionalen Kopplung* zwischen spezifischen *frontalen und parietalen Instanzen im Gehirn* bei einer *Reduktion von kognitivem Aufwand*, der zur Lösungsfindung auf Grund einer Verringerung der Komplexität der Anforderung erforderlich ist.

Im Zusammenhang mit diesen Experimenten haben wir uns weiterhin mit der Frage der Änderung synchroner Aktivität von Hirnarealen in Abhängigkeit von der *Übung* befasst (vgl. z.B. Sommerfeld et al., 1999; Simmel et al., 2001; Sommerfeld, 2001, 2008). Die *Ergebnisse* zeigen, dass die *synchrone Aktivität frontaler und parietaler Hirnareale* (gemessen durch die *interregionale* fronto-parietale EEG-Kohärenzdauer) insgesamt mit zunehmender Übung abnimmt, es jedoch – im Gegensatz zur kontinuierlichen Abnahme der Reaktionszeit – einen *zwischenzeitlichen signifikanten Anstieg* gibt (mittlere untere Graphik in Abb. 3).

Neben der Untersuchung interregionaler fronto-parietaler Synchronizität haben wir bisher bei einer Untersuchungsstichprobe von sechs Vpn auch nach *lokalen* synchronen Aktivitäten sowohl *innerhalb des Frontalbereiches* als auch *innerhalb des Parietalbereiches* gefragt. Die entsprechenden Graphiken in der Abbildung 3 zeigen, dass die Dauer hoher synchroner Aktivität innerhalb des Frontalbereiches analog zur Reaktionszeit mit wachsender Übung sinkt, während sie jedoch im Parietalbereich davon unabhängig ist (zur Dis-

kussion der Ergebnisse und zu Aspekten weiterführender Untersuchungen vgl. Sommerfeld, 2009).

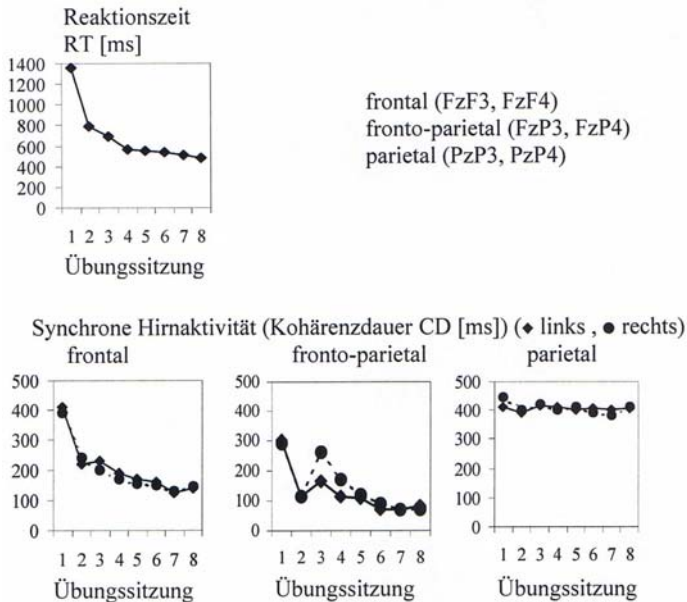


Abb. 3: Reaktionszeit RT [ms] und synchrone Hirnaktivität (gemessen als EEG-Kohärenzdauer CD [ms]) an links- und rechtshemisphärischen frontalen, fronto-parietalen und parietalen Positionen im Beta1-Frequenzband von 13-20 Hz) als Funktionen der Übung (Sommerfeld, 2001)

Insgesamt kann als ein wesentliches Ergebnis der auf der Basis einer Verbindung von Verhaltensdaten mit neuropsychologischen Maßen durchgeführten Untersuchungen festgehalten werden: Basierend auf gleichsinnigen und unterschiedlichen Verläufen der Reaktionszeit und der synchronen Aktivität von Instanzen im Gehirn – gemessen auf der Basis der EEG-Kohärenz – konnten in den Experimenten Differenzen in der *synchronen Aktivität spezifischer Hirnregionen* als *Indikatoren* von Differenzen im *kognitiven Aufwand* und von Unterschieden im Grad der *Übung* aufgedeckt werden.

Einen Zugang zu einer weiterführenden Prozessanalyse bietet die Untersuchung von Mikrozuständen in Form von zeitlich stabilen Kohärenzmustern (vgl. Krause & Seidel, 2004).

4. Ein systematischer Zugang zur Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung?

Wird mit der durchgeführten Elementaranalyse von Denkprozessen bei der Lösung von Ordnungsproblemen ein systematischer Zugang zur Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung aufgezeigt?

Mit dem *theoretischen Ansatz* zur Systematisierung, Formalisierung und Bewertung kognitiver Strukturoperationen konnte auf der Grundlage von *Vollständigkeitsbetrachtungen* in Wechselbeziehung zwischen mathematischem Modell und Experiment eine *Systematisierung und Präzisierung von Basisprozessen* der menschlichen Informationsverarbeitung für eine Klasse elementarer kognitiver Anforderungen erzielt werden. Entscheidende Voraussetzungen für die präzisen Aussagen sind die relativ gute Formalisierbarkeit dieser Anforderungsklasse sowie die Möglichkeit der experimentellen Erfassung interner (mentaler) Repräsentationen.

Dem Vorteil der Formalisierbarkeit und des experimentellen Nachweises steht der Nachteil einer eingeschränkten Generalisierbarkeit der Ergebnisse gegenüber. Jedoch konnten in den durchgeführten Experimenten solche *kognitiven Operationen experimentell nachgewiesen* werden, die auch für die menschliche Informationsverarbeitung in komplexeren Situationen charakteristisch sind. In diesem Zusammenhang wurden experimentelle Belege dafür erbracht, dass die *Fähigkeit zur Reduktion des kognitiven Aufwandes* ein bereichsübergreifendes, personenspezifisches Prinzip im Denken ist.

Die darüber hinaus gewonnenen Resultate zur *synchronen Aktivität von Hirnarealen* in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität und von der Übung zeigen den potentiellen Nutzen auf, den eine Verbindung neuropsychologischer Maße mit Verhaltensdaten für die Identifizierung der bei solchen Prozessen beteiligten kortikalen Areale und ihrer Wechselwirkungen hat.

Insgesamt liefern die *interdisziplinär* in Wechselbeziehung zwischen *Psychologie, Mathematik* und *Neurowissenschaft* durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen und die dabei gewonnenen Resultate differenzierte Erkenntnisse über Grundbausteine von Denkprozessen. Wenn mit der konzeptionellen Basis und der Interpretation der Resultate sorgfältig umgegangen wird, trägt der systematische Untersuchungsansatz zum besseren Verständnis der menschlichen Informationsverarbeitung bei und eröffnet neue Möglichkeiten für die Diagnostik geistiger Leistungen.

Damit kann ein Schritt in die Richtung des Vorgehens von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) getan werden:

„Man muss vom Einfachen ausgehen, um zum Verständnis des Komplizierten zu gelangen, und man muss das Komplizierte auf das Einfache zurückführen. Die obersten Begriffe sind die einfachsten. Aber diese gilt es zu finden. Sie sind dann wie die Buchstaben des Alphabets. Sie sind das Gedankenalphabet.“(Johannsen, 1971, S. 49).

Literatur

- Anderson, J.R. (2004) An integrated theory of the mind. *Psychological Review* 111, 1036-1060.
- 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.
- Chamod, A.S. & Petrides, M. (2007) Dissociable roles of the posterior parietal and the prefrontal cortex in manipulation and monitoring processes. *PNAS*, 104, 14837-14842.
- Groner, R. (1978) *Hypothesen im Denkprozess*. Bern: Huber.
- Goodwin, G.P. & Johnson-Laird, P.N. (2005) Reasoning about relations. *Psychological Review*, 112, 468-493.
- Hörz, H. (2007) *Wahrheit, Glaube und Hoffnung. Philosophie als Brücke zwischen Wissenschaft und Weltanschauung*. Berlin: trafo verlag.
- Johannsen, C. (1971) *Leibniz*. Berlin: Union Verlag.
- Kandel, E.R. (2006) *Auf der Suche nach dem Gedächtnis*. München: Siedler Verlag.
- Klix, F. (1971) *Information und Verhalten*. Berlin: DVW.
- Klix, F. (1992) *Die Natur des Verstandes*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Klix, F. (1993) *Erwachendes Denken*. Heidelberg: Spektrum.
- Klix, F. (2004) Information in Evolution und Geschichte. In: Krause, B. & Krause, W. (Hrsg.) *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften. Festschrift für Friedhart Klix zum 75. Geburtstag. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät*, 12, 27-41.
- Klix, F. & Krause, B. (1969) Zur Definition des Begriffs "Struktur", seinen Eigenschaften und Darstellungsmöglichkeiten in der Experimentalpsychologie. *Zeitschrift für Psychologie*, 176, 22-54.
- Klix, F. & Lanius, K. (1999) *Wege und Irrwege der Menschenartigen*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Köhler, M., Buchta, K., Schleif, F.-M. & Sommerfeld, E. (2002) Complexity and difficulty in memory based comparison. In: Da Silva, J.A., Matsushima, E.H. & Ribeiro-Filho, N.P. (Eds.) *Fechner Day 2002: In a New Continent, for a New Psychophysics*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: The International Society for Psychophysics, 433-439.
- Kotkamp, U. (1999) *Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen*. Lengerich: Pabst.

- Krause, W. (1985) Komponentenanalyse des Symbol-Distanz-Effektes mit Hilfe von Augenbewegungsmessungen. *Zeitschrift für Psychologie*, 3, 259-272.
- Krause, W. (1994) Ordnungsbildung als Invarianzleistung mentaler Repräsentationen: Zur aufwandsreduzierenden Strukturierung von Wissen und Prozeduren. *Zeitschrift für Psychologie*, 202, 1-19.
- Krause, W. (2000) *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- 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. (2004) Biologische Grundlagen des Verstandes. Höhere Ordnung – kürzere Zeiten: allgemeinspsychologische 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*, 12, 189-214.
- Krause, W., Seifert, R. & Sommerfeld, E. (1986) Effective cognitive structures in simple problem solving. In: Klix, F. & Hagendorf, H. (Eds.) *Human Memory and Cognitive Capabilities. Mechanisms and Performances*. Amsterdam: North Holland, 1001-1016.
- Krause, W., Sommerfeld, E., Höhne, G. & Sperlich, H. (1989) Aufwandsminimierende Umstrukturierung von Wissensstrukturen der Konstruktion im menschlichen Gedächtnis. *Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Ilmenau*, 89, 51-54.
- Leeuwenberg, E. (Ed.) (1968) *Structural Information of Visual Patterns*. Paris: Mouton & Co.
- Malsburg, C. von der (1994) The Correlation Theory of Brain Function. In: Domany, E., van Hemmen, J.L. & Schulten, K. (Eds.) *Models of Neural Networks II*. Berlin, Heidelberg: Springer, 95-119.
- Petsche, H. & Ettliger, S.C. (1998) EEG aspects of cognitive processes: A contribution to the Proteus-like nature of consciousness. *International Journal of Psychophysiology*, 33, 199-212.
- Pliske, R.M. & Smith, K.M. (1979) Semantic categorization in a linear order problem. *Memory and Cognition*, 7, 297-302.
- Rappelsberger, P. & Petsche, H. (1988) Probability mapping: power and coherence analyses of cognitive processes. *Brain Topography* 1, 46-54.
- Schack, B., Griebach, G. & Krause, W. (1999) The sensitivity of instantaneous coherence for considering elementary comparison processing. Part I: The relationship between mental activities and instantaneous EEG coherence. *International Journal of Psychophysiology*, 31, 219-240.
- Simmel, A., Doerfler, T., Schleif, F.-M. & Sommerfeld, E. (2001) An analysis of connections between internal and external learning process indicators using EEG coherence duration. In: Sommerfeld, E., Kompass, R. & Lachmann, Th. (Eds.) *Fechner Day 2001: The 200th Birthday of Gustav Theodor Fechner. Proceedings*

- of the Seventeenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics.* Lengerich, Berlin: Pabst Science Publishers, 602-607.
- Singer, W. & Gray, C.M. (1995) Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 555-586.
- Sommerfeld, E. (1994) *Kognitive Strukturen*. Münster, New York: Waxmann.
- Sommerfeld, E. (2001) Comparison processes in memory: Performance measures and synchronous brain activity. In: Sommerfeld, E., Kompass, R. & Lachmann, Th. (Eds.) *Fechner Day 2001: The 200th Birthday of Gustav Theodor Fechner. Proceedings of the Seventeenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*. Lengerich, Berlin: Pabst Science Publishers, 81-86.
- Sommerfeld, E. (2008) Memory Psychophysics – an interdisciplinary approach. In: Plath, J.P. & Haß, E.-Ch. (Eds.) *Vernetzte Wissenschaften – Crosslinks in Natural and Social Sciences*. Berlin: Logos, 205-241.
- Sommerfeld, E. (2009) Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung. Ein systematischer Zugang durch Elementaranalyse von Denkprozessen bei der Lösung von Ordnungsproblemen? *Leibniz Online*, 2009, www.leibniz-sozietat.de/journal.
- Sommerfeld, E., Krause, W., Schack, B., Markert, C., Pies, R. & Tietze, H. (1999) Zur Messung von Übungs- und Trainingserfolg auf der Grundlage von EEG-Parametern. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 13 (1/2), 60-73.
- Sommerfeld, E. & Sobik, F. (1994) Operations on cognitive structures – their modeling on the basis of graph theory. In: Albert, D. (Ed.) *Knowledge Structures*. Berlin, Heidelberg: Springer, 146-190.
- Sydow, H. (1980) Mathematische Modellierung der Strukturrepräsentation und der Strukturerkennung in Denkprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, 2, 166-197.
- Weiss, S. & Rappelsberger, P. (1996) EEG coherence within the 13-18 Hz band as a correlate of a distinct lexical organisation of concrete and abstract nouns in humans. *Neuroscience Letters*, 209, 17-20.