



Erdmute Sommerfeld

Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung

Ein systematischer Zugang durch Elementaranalyse von Denkprozessen bei der Lösung von Ordnungsproblemen?

Friedhart Klix zum 80. Geburtstag gewidmet

Gliederung

- 1. Einleitung**
- 2. Kognitive Strukturen und Operationen**
 - 2.1 Kognitive Strukturen und Operationen: Grundbausteine der menschlichen Informationsverarbeitung
 - 2.2 Kognitive Strukturoperationen: Modellansätze aus der Literatur
 - 2.3 Kognitive Strukturoperationen: Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung
 - 2.4 Kognitive Strukturoperationen: Experimenteller Nachweis
- 3. Kognitive Ökonomie**
 - 3.1 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Prinzip der kognitiven Ökonomie in der menschlichen Informationsverarbeitung
 - 3.2 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Modellansätze aus der Literatur
 - 3.3 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Ansatz zur Bewertung kognitiver Strukturoperationen
 - 3.4 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Experimenteller Nachweis der effektiven Strukturierung neuer Information
 - 3.5 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Experimenteller Nachweis der anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen
 - 3.6 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Komplexitätsreduktion und Übung im Zusammenhang mit der synchronen Aktivität von Hirnarealen
- 4. Ein systematischer Zugang zur Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung?**
- 5. Zusammenfassung und Ausblick**
- 6. Literatur**

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):

*„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 ebensowenig eine Veränderung wie das Sonnenlicht durch die Mannigfaltigkeit der Gegenstände, die es bestrahlt.“*

¹ Überarbeitete und erweiterte Fassung des Vortrags in der Klasse für Naturwissenschaften am 20. Januar 2005

Eine systematische Elementaranalyse auf der Grundlage einer engen *Wechselbeziehung zwischen Psychologie und Mathematik* ist erforderlich, um *Basisprozesse* der menschlichen Informationsverarbeitung aufzuklären. Ihre systematische Erfassung und formale Beschreibung bilden die Grundlage für den experimentellen Nachweis kognitiver Prozesse und damit auch für die Unterscheidung und Messung geistiger Leistungen.

Die Erfolge von Physik und Chemie sind wesentlich sowohl einer systematischen Analyse als auch einer Wechselbeziehung zwischen Theorie und Experiment zu danken. Auch in Teilgebieten der Psychologie, wie z.B. in der Wahrnehmungspsychologie oder in der Gedächtnispsychologie bei der Repräsentation von Begriffen, hat eine solche Vorgehensweise bereits zur Aufklärung von fundamentalen funktionellen und strukturellen Zusammenhängen geführt.

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. Bower, 1970; Potts, 1975; Banks, 1977; Pliske & Smith, 1979; Groner, 1978; Krause, 1982, 2000; Sommerfeld, 1994a, 2008; Petrusic, 2001, Petrusic et al., 2004). Für die Lösung eines linearen Ordnungsproblems bekommen die Versuchspersonen (im Folgenden 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 Vpn 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 gegenüber, 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, 1994a) und zum anderen die Möglichkeit der experimentellen Erfassung interner (mentaler) Repräsentationen auf der Basis des Symbol-Distanz-Effektes (Pliske & Smith, 1979; Krause, 1982, 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. Neben Operationen der Ableitung von Information (Inferenz) betrifft das insbesondere Operationen der Selektion, Integration, hierarchischen Strukturierung und des Vergleichs von Informationen. Das ist folgendermaßen begründet: In einer Reihe von Experimenten mit Inferenzanforderungen vom Charakter eines Ordnungsproblems ist gezeigt worden, dass die Vpn im Allgemeinen bereits während der Lernphase inferieren. Sie speichern nicht die einzelnen Aussagen, sondern sie bringen auf der Grundlage der Inferenzen die Elemente der extern gegebenen Aussagen intern in eine lineare Ordnung, d.h. sie bauen eine Ordnungsstruktur auf. Besteht die Menge der Elemente aus Unterklassen, die für die Anforderungsbewältigung von Bedeutung sind, können sich durch hierarchische Strukturierungen Behaltens- oder Lösungsvorteile ergeben. In solchen Fällen

erzeugen die Vpn im Allgemeinen ebenfalls bereits in der Lernphase eine hierarchische Struktur. Auf Grund einer solchen "guten Vorverarbeitung" in der Lernphase kann dann in der Fragenphase statt des Inferenzprozesses ein Vergleichsprozess stattfinden, d.h. ein Vergleich der extern dargebotenen Fragen mit Teilen der intern ausgebildeten Repräsentation der Ordnungsstruktur (vgl. Krause, 1991b). Es ist das Anliegen der Untersuchungen, die Vorteile der Formalisierbarkeit und Messbarkeit zu nutzen, um auf der Grundlage der Verbindung mathematisch-psychologischer Analysen mit experimentalpsychologischen Messungen fundierte Ergebnisse für diese Problemklasse erzielen zu können. Sind die so identifizierten kognitiven Operationen anforderungsinvariant, dann sollten sie auch bei komplexeren Problemstellungen nachweisbar sein (vgl. z.B. Krause et al., 1987; Kotkamp, 1999; Krause, 2000).

Ausgehend von Ansätzen aus der Literatur wird ein *theoretischer Modellansatz* zur Systematisierung und exakten Beschreibung von kognitiven Elementarprozessen entwickelt. Dieser Ansatz basiert auf einer *Vollständigkeitsbetrachtung* unter definierten psychologischen und formalen Aspekten und einer darauf aufbauenden Systematisierung aller – unter bestimmten Bedingungen – theoretisch möglichen Elementarbestandteile kognitiver Operationen zur Ausbildung und Veränderung interner (mentaler) Repräsentationen extern gegebener Information.

Hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Informationsverarbeitungsprozess ist eine *Bewertung* der kognitiven Operationen erforderlich. Basierend auf dem Prinzip der *kognitiven Ökonomie* wird der theoretisch-formale Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Operationen durch einen Ansatz zur Bewertung solcher Operationen auf der Basis des kognitiven Aufwandes erweitert. Auf der Grundlage der *Reduktion des kognitiven Aufwandes* ist das Prinzip der kognitiven Ökonomie quantifizierbar. Die kognitive Ökonomie ist ein Wirkprinzip in der menschlichen Informationsverarbeitung und betrifft Vereinfachungsleistungen in der Verarbeitung und Speicherung von Information. Durch das Prinzip der Aufwandsreduktion werden Prozesse der Informationsverarbeitung gesteuert.

Maßstab für die psychologische Adäquatheit der inhaltlichen und formalen Modelle sind die experimentellen Ergebnisse. Zum *experimentellen Nachweis* der kognitiven Elementarprozesse sowie der Wirksamkeit des Prinzips der Aufwandsreduktion wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt. In diesem Zusammenhang ist auch untersucht worden, ob die Fähigkeit zur Reduktion des kognitiven Aufwandes in der Bewältigung elementarer Probleme in Beziehung zur Fähigkeit der Aufwandsreduktion bei der Lösung komplexerer Probleme steht.

Ein Weg, um weitere Informationen über dabei ablaufende Prozesse zu gewinnen, besteht in der Suche nach prozessbegleitenden bzw. prozesstragenden Instanzen im Gehirn mit Hilfe neurowissenschaftlicher Methoden. Unter diesem Aspekt wurde in verschiedenen Experimenten nach Unterschieden in der *synchronen Aktivität von Hirnregionen* bei elementaren Denkprozessen gefragt, für deren Realisierung unterschiedlich hoher kognitiver Aufwand erforderlich ist.

Das Anliegen der *interdisziplinär* in Wechselbeziehung zwischen *Psychologie, Mathematik* und *Neurowissenschaft* durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen besteht darin, zur Aufklärung von Basisprozessen der menschlichen Informationsverarbeitung beizutragen und damit auch neue Möglichkeiten für die Diagnostik geistiger Leistungen zu eröffnen.

2. Kognitive Strukturen und Operationen

„Der Aufbau von Strukturen innerhalb von Organismen und zwischen ihnen ist eines der Wesensmerkmale der Evolution“ (Klix, 2004, S. 28).

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.

Die Frage nach der Identifikation interner Repräsentationen sowie die Erforschung von Prozessen zu ihrer Ausbildung, Veränderung und Nutzung für die Bewältigung kognitiver Anforderungen ist in unterschiedlichen Gebieten der kognitiven Psychologie von Bedeutung, insbesondere in der Gedächtnis- und Denkpsychologie, im Bereich des Textverstehens und der Textverarbeitung sowie in Teilgebieten der Wahrnehmungspsychologie, der Entwicklungspsychologie und der Lernpsychologie und in spezifischen Richtungen der Differentiellen Psychologie und der Diagnostik.

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, 1980). Im Rahmen des Informationsverarbeitungsparadigmas (Klix, 1971; Newell & Simon, 1972) ist damit die Übertragung und Verarbeitung struktureller Information zu untersuchen.

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*. Eine externe Repräsentation ist als Träger von Information den Signalen in der klassischen Shannonschen Informationstheorie (Shannon & Weaver, 1949) vergleichbar. Unter dem Aspekt der Informationsübertragung erfüllt eine kognitive Struktur eine „Stellvertreterfunktion“ (Scheerer, 1993). Es geht im Rahmen dieses Beitrags schwerpunktmäßig darum, *was* an Information intern repräsentiert ist und *wie* die repräsentierende kognitive Struktur strukturiert ist. Eine weitere Frage ist die nach der Modalität (vgl. Kosslyn, 1975; Paivio, 1986; Engelkamp, 1991; Engelkamp & Zimmer, 2006).

Kognitive Strukturen sowie Operationen zu ihrer Erzeugung, Veränderung und Abarbeitung sind *Grundbausteine* geistiger Vorgänge (vgl. auch Klix, 1992, 1993). Wenn nun solche Strukturen und Strukturoperationen zum einen exakt beschrieben und zum anderen empirisch erfasst oder sogar gemessen werden können, ist man der Aufklärung geistiger Vorgänge und damit auch der Aufklärung interindividueller Unterschiede in der menschlichen Informationsverarbeitung einen Schritt näher gekommen. Das ist bedeutsam zur Bestimmung von qualitativen und quantitativen Unterschieden in Denkprozessen auf der Basis *mentaler* Größen, die durch Eigenschaften *interner* Repräsentationen und Prozesse charakterisiert werden. Dabei spielt auch der Gedanke der Analyse von Komponenten der „Intelligenz“ bzw. der „Performanz“ und der „Kompetenz“ sowie der „Kreativität“ eine Rolle, wie sie z.B. in Klix (1983, 1992), Weisberg (1989), Krause (2000) diskutiert werden.

Die Entwicklung *adäquater* formaler Beschreibungsmittel für kognitive Strukturen und

Operationen der menschlichen Informationsverarbeitung ist für die Denkpsychologie von entscheidender Bedeutung. Dabei wird auf eine psychologische Adäquatheit abgezielt, für die gefordert wird, dass die angenommenen Strukturen und Operationen ein theoretisch begründbares valides Modell mentaler Strukturen und Operationen sind und dass sich das Modell empirisch bewährt (vgl. auch Schefe, 1986). Im Sinne von Hörz (1998, 2007) ist damit der Übergang von den relativen Apriori der Mathematik als den möglichen formalisierbaren Strukturen zu den durch Erfahrung erkannten realisierten Möglichkeiten erforderlich. Eine adäquate Modellierung informationsverarbeitender Prozesse dient wiederum als Ausgangspunkt für die Prädiktion von Verhalten.

Als Basis für die Entwicklung eines theoretischen Ansatzes zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturoperationen wurden existierende Modellansätze der internen Repräsentation, des Erwerbs und der Transformation von Wissen sowie entsprechende Experimente daraufhin analysiert, inwieweit sie Modellannahmen und/oder experimentelle Belege für Prozesse der Informationsverarbeitung bei der Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen enthalten (vgl. Sommerfeld, 1994a, 2008). Wesentliche Aspekte dazu sind im Folgenden Kapitel zusammengefasst.

2.2 Kognitive Strukturoperationen: Modellansätze aus der Literatur

„Die Umwelt im Lebensraume so weit wie möglich berechenbar und dadurch schließlich beherrschbar zu machen in einem sehr weiten Sinne des Wortes, erweist sich als eine biologische, soziale wie individuelle Motivgrundlage intelligenten Handelns.“ (Klix, 1993, S. 387).

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. Jedoch hat neben Untersuchungen der mentalen Repräsentation von Information insbesondere die Frage nach ihrer Erzeugung und Veränderung immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dabei besitzt die Analyse flexibler Prozesse der Informationssuche, -aufnahme und -verarbeitung einen besonders hohen Stellenwert.

Theoretische Modellansätze sind somit daraufhin zu analysieren, inwieweit sie neben spezifizierten Annahmen zur Repräsentation von Wissen im Gedächtnis auch vergleichsweise detaillierte Annahmen über kognitive *Operationen* der Ausbildung und Veränderung von internen Repräsentationen enthalten. Eine weitere Frage ist die nach der *Formalisierung* solcher Operationen. Sowohl unter psychologisch-inhaltlichem Aspekt als auch unter dem Aspekt der Formalisierung wird nun auf einige weiterführende Ansätze Bezug genommen.

Umfangreiche Klassen von Modellen beziehen sich auf „Semantische Netze“ (vgl. z.B. Kintsch, 1988), „Produktionssysteme“ (vgl. z.B. Anderson, 1983, 2001, 2004), „Mentale Modelle“ (vgl. z.B. Johnson-Laird, 1983; Schnotz, 1994; Schnotz & Lowe, 2003; Goodwin & Johnson-Laird, 2005). Bei der Analyse zeigt sich, dass Grundgedanken über kognitive Operationen, auf die in diesen Ansätzen Bezug genommen wird, bereits von Selz (1913, zitiert in Dörner, 1976), formuliert worden sind. Das betrifft z.B. kognitive Prozesse der Abstraktion, Konkretisierung oder Komplexbildung. Lompscher (1972) entwickelte – angelehnt an die von Selz angenommenen Operationen – eine differenzierte Übersicht über elementare geistige Operationen. Die Übersicht beinhaltet Operationen des Ordnen und Klassifizierens, des Verallgemeinerns, des Zerlegens, des Vergleichs und der Erfassung von Eigenschaften. Die Operationen sind ebenfalls zum großen Teil Bestandteil der oben angesprochenen Modellansätze bzw. wurden dort weiter spezifiziert (vgl. auch Sommerfeld, 1994a). Aufbauend auf diesen „Lompscher-Operationen“ führte Dörner weiterführende Analysen durch. Das betraf zum einen den Versuch, geistige Prozesse in diese

Operationen zu zerlegen und zum anderen, Verschachtelungen dieser Operationen aufzuzeigen. Dabei zeigte sich, dass man mit diesen Operationen recht weit kommt, wenn man sie als elementare Teile von Denkopoperationen ansieht. Es wurde jedoch auch deutlich, dass Operationen dieser Menge zum Teil ineinander verschachtelt sind, einander voraussetzen oder sich wechselseitig enthalten.

Daraus ergibt sich verstärkt die Forderung nach der Suche von *Grundbausteinen* von Operationen menschlicher Informationsverarbeitung. Ein Zugang zur Identifizierung solcher Basisoperationen besteht in einer *Systematisierung* und *Formalisierung* aller – unter bestimmten Bedingungen - theoretisch möglichen Grundbausteine kognitiver Operationen zur Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen, so dass eine Systematik entsteht, in die alle psychologisch relevanten kognitiven Strukturoperationen eingeordnet werden können. Neben Strukturoperationen in den angesprochenen Übersichten von Selz und Lompscher betrifft das Operationen zum Erwerb und zur Verarbeitung von Wissen, enthalten z.B. in den Modellansätzen zu „Semantischen Netzen“, „Produktionssystemen“ oder zu „Mentalen Modellen“.

Ein geeigneter Bezugspunkt sind kognitive Strukturoperationen, wie sie in der am weitesten entwickelten Theorie zur Repräsentation und zum Erwerb von Regelwissen (auf der Basis von Produktionssystemen) von Anderson verwendet werden. Die in diesem theoretischen Ansatz enthaltenen Operationen der Generalisierung, Diskrimination oder Komposition sind klar definiert und liefern wichtige Hinweise für eine Systematisierung.

Wegweisend für die Entwicklung einer Systematik sind die kognitiven Operationen und Prozeduren im Modellansatz zur menschlichen Wissensrepräsentation und –verarbeitung von Klix (1988, 1990, 1992, 1993). Unter einer kognitiven Operation versteht Klix „... eine elementare Wirkungseinheit, die, angewandt auf eine kognitive Struktur, deren Änderung bewirkt“. Die Kenntnisse über die kognitiven Operationen, die Klix unterscheidet, 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. Für jede der sechs kognitiven Operationen „Aktivation und Inhibition (als Prozesse der Selektion), Substitution, Transition, Projektion und Inversion“ zeigt er die Wirksamkeit in diesen Gebieten auf. Verbunden mit diesen Operationen sind kognitive (Basis-) Prozeduren, die „... als Standardleistungen mit ihren Resultaten einen Gutteil menschlichen geistigen Alltags ausmachen“. Unter einer kognitiven Prozedur versteht Klix „... eine Folge von Operationen, die, miteinander verkettet, zusammenhängende Zustandsänderungen bewirken ...“. und benennt dazu die vier Klassen: „Vergleichsprozeden (insbesondere als Grundlage für die Urteilsbildung), Verkettungsprozeden (insbesondere als eine Grundlage für die Strategiebildung), Verdichtungsprozeden (insbesondere Verdichtung von Merkmalen als Grundlage für die Klassenbildung), Verkürzungsprozeden (insbesondere Verkürzung von Folgen von Operationen als Grundlage für die Effektivierung von Rechenprozessen bis hin zur Reduktion des kognitiven Aufwandes bei komplexen Problemlösungen).

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.

Als erstes stellt sich damit 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 die Änderung der *Information* und die Änderung der *Struktur* psychologisch relevante Kriterien für eine Vollständigkeitsbetrachtung und Systematisierung von kognitiven Strukturoperationen dar.

Betrachtet man die analysierten Modellansätze zur Repräsentation und zur Verarbeitung von Wissen unter diesem Aspekt, so zeigt sich, dass schwerpunktmäßig Annahmen über Prozesse der Informationsverarbeitung eine Rolle spielen, die zur Vergrößerung oder Verringerung des Wissens und zu damit im Zusammenhang stehenden Vergrößerungen oder Verkleinerungen der kognitiven Struktur führen. Das sind in der überwiegenden Mehrzahl solche Prozesse, bei denen sich mit dem „Wissensumfang“ auch die dieses Wissen repräsentierende (tragende) Struktur (z.B. semantisches Netz, Schema, Produktionssystem) in die gleiche Richtung verändert: bei Wissenszuwachs vergrößert sich die repräsentierende Struktur, wie z.B. bei Inferenzprozessen, wird dagegen das Wissen verringert, verkleinert sich auch die repräsentierende Struktur, wie z.B. bei Selektionsprozessen. Diese Prozesse treten oft auch kombiniert auf (z.B. bei hierarchischen Strukturbildungen). Es gibt jedoch auch Fälle, in denen die Veränderungen von Struktur und Information gegenläufig sind, z.B. bei der Erzeugung und Beseitigung von Widersprüchen oder Redundanzen.

Eine Voraussetzung dafür, diese Möglichkeiten prinzipiell erfassen und exakt beschreiben zu können, besteht darin, sowohl die Änderungen der repräsentierten Information als auch der (diese Information repräsentierenden) Struktur *formal* zu beschreiben sowie diese Änderungen *systematisch* zu variieren und zu kombinieren. Eine solche – auf formaler Basis durchgeführte – *Vollständigkeitsbetrachtung* dient sowohl der exakten Beschreibung und Systematisierung von psychologisch relevanten kognitiven Operationen, wie sie in den Modellansätzen beschrieben sind, als auch einer Differenzierung der Operationen. Darüber hinaus werden in einer solchen Systematik auch nicht so häufig erwartete bzw. auftretende Operationen erfasst. Das ist bei der Analyse konkreter Problemstellungen als Grundlage für die Aufstellung und Prüfung von Hypothesen von Bedeutung.

Zur *formalen Beschreibung* der Änderungen der strukturellen Information und der (diese Information tragenden) kognitiven Struktur sind sowohl eine geeignete „*Struktur*“-*Theorie* als auch eine geeignete „*Informations*“-*Theorie* erforderlich.

Analysiert man die existierenden Ansätze nach der verwendeten Strukturtheorie, sind dabei im Wesentlichen Ansätze auf der Basis der Graphentheorie, der Verbandstheorie und der Prädikatenlogik zu unterscheiden. Insbesondere die *Graphentheorie* (vgl. z.B. Harary, 1969, 1994; Sachs, 1970) hat in der Psychologie als Strukturtheorie eine Tradition für die Beschreibung struktureller Beziehungen. Auch für die formale Beschreibung von kognitiven Strukturoperationen enthält sie eine Vielzahl von dafür potentiell anwendbaren Graphtransformationen (vgl. z.B. Klix & Krause, 1969; Sydow, 1980; Nenniger, 1980; Sommerfeld, 1990, Sommerfeld & Sobik, 1986, 1994)

Die Rolle der *Informationstheorie* in der Psychologie wird bereits in Arbeiten wie Attneave (1959), Sanders (1971), Mittenecker & Raab (1973) sowie in Klix (1971, 1980), Feger, 1972 und Sydow & Petzold (1981) charakterisiert. Ausgangspunkt dafür ist die klassische Shannonsche Informationstheorie (Shannon & Weaver, 1949). Dort wird von drei Ebenen der Analyse von Kommunikationsproblemen ausgegangen. In einer Ebene wird danach gefragt, wie genau die Zeichen der Kommunikation übertragen werden können. Diese Ebene betrifft das technische Problem. Eine zweite Ebene betrifft das semantische Problem. Hier wird danach gefragt, wie genau die übertragenen Zeichen der gewünschten Bedeutung entsprechen. In einer weiteren Ebene wird die Frage gestellt, wie effektiv die empfangene Nachricht das Verhalten in der gewünschten Weise beeinflusst (das Effektivitätsproblem). In unseren Untersuchungen ist das Effektivitätsproblem von besonderem Interesse. Für die Wahrnehmung perzeptiver Muster wurde - anknüpfend an den Ansatz von MacKay (1950) – die strukturelle Informationstheorie von Leeuwenberg (1968) und Buffart und Leeuwenberg (1983) entwickelt.

Durch die informationstheoretischen Arbeiten von Shannon und Weaver (und Weiterentwicklungen) sowie die Untersuchungen von Leeuwenberg und Buffart (und

Weiterentwicklungen) sind zwei wesentliche Richtungen zur Beschreibung von Information gekennzeichnet. Jedoch ist das Informationsmaß von Shannon nicht dazu geeignet, strukturelle Information zu messen. Das von Leeuwenberg entwickelte „structural information load“ ist ein Komplexitätsmaß, das insbesondere für vergleichbare Informationen, repräsentiert in perzeptiven Mustern, ein geeignetes Maß zur Bewertung darstellt. Im Rahmen der Untersuchungen zur Ausbildung und Veränderung kognitiver Strukturen in der Denkpsychologie ist es jedoch erforderlich, qualitative und quantitative Unterschiede zwischen extern gegebener und intern abgebildeter Information sowie zwischen unterschiedlichen internen Abbildungen adäquat zu beschreiben.

Ausgehend vom Grundgedanken der Strukturellen Informationstheorie von Leeuwenberg (1968) wurde ein Ansatz zur Bestimmung des *strukturellen Informationsgehaltes* entwickelt, der von der Interpretation der gegebenen Struktur abhängt und Aussagen über das Vorhandensein spezifischer Relationen zwischen den Elementen der Struktur macht (Sommerfeld & Sobik, 1994; Sommerfeld, 1994a). Im Gegensatz zu Shannons Informationsmaß und Leeuwenbergs „information load“ ist der strukturelle Informationsgehalt keine Zahl, sondern wird durch eine Menge von Interpretationen charakterisiert. Solche Interpretationen können z.B. Sätze einer natürlichen Sprache oder auch eingeschränkte relationale Aussagen sein. Dabei besteht eine partielle Ordnung zwischen unterschiedlichen strukturellen Informationen. Diese partielle Ordnung basiert auf der Mengeninklusionsrelation zwischen Mengen von Interpretationen. Das ermöglicht die Charakterisierung vergleichbarer und unvergleichbarer Informationen. So ist es möglich, bestimmte strukturelle Informationen zu vergleichen, jedoch können nicht beliebige Informationen bezüglich ihres strukturellen Informationsgehaltes verglichen werden. Es kann charakterisiert werden, welchen Teil einer (extern gegebenen) Information eine Person intern abbildet, ob dabei mehr oder weniger Kontext berücksichtigt wird, ob bestimmte Merkmale oder Relationen hervorgehoben oder unterdrückt werden. Im Falle vergleichbarer Informationen können quantitative Unterschiede auf der Grundlage der Mächtigkeiten der Mengen von Interpretationen bestimmt werden. In diesem Zusammenhang ist formalisierbar, in welcher Beziehung der Informationsgehalt der intern abgebildeten Information zu dem der Ausgangsinformation steht. Die formale Beschreibung des Modellansatzes sowie Beispiele zur Bestimmung des strukturellen Informationsgehaltes sind in Sommerfeld & Sobik (1994; Sommerfeld, 1994a, 2008) enthalten.

Basierend auf diesem Ansatz wurde ein Modellansatz zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturoperationen entwickelt.

2.3 Kognitive Strukturoperationen: Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung

Eine präzisierte inhaltlich bedeutsame *Systematik von Basiselementen* eines Gegenstandsbereiches bildet die Grundlage einer jeden Theorieentwicklung. Die Basiselemente sollten für die zu betrachtende Ebene der menschlichen Informationsverarbeitung den Charakter von Elementaroperationen haben, aus denen sich alle weiteren Operationen des Gegenstandsbereiches kombinieren bzw. herleiten lassen. Der Stellenwert, den kognitive Strukturoperationen zur Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen (als Träger struktureller Information) in der Menge kognitiver Operationen haben, wird bereits durch die in Posner (1976) gemachten Analysen zu Denkopoperationen unterstrichen. Sie folgen dem Gedanken, dass eine Denkopoperation eine innere Transformation von Information von einer Form in eine andere ist und dass sie die bereits bestehenden Gedächtnisstrukturen nicht auslöscht, sondern neue Strukturen schafft (vgl. Abb. 1).

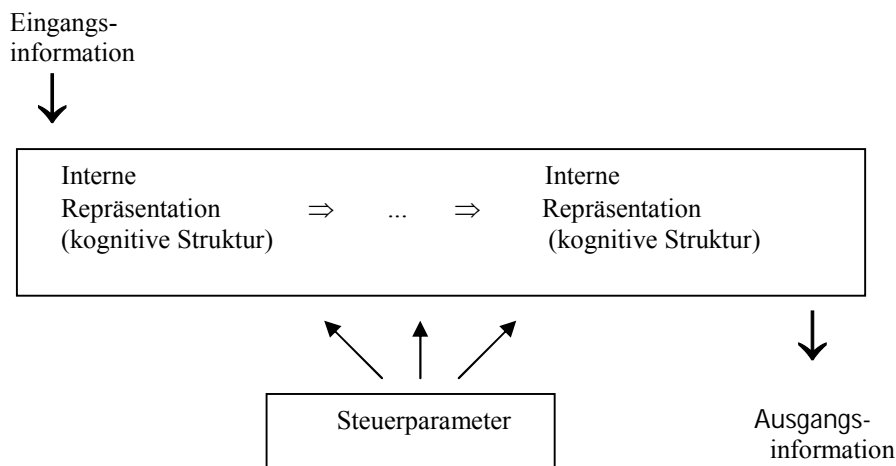


Abb. 1: Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen

Für die Entwicklung des Ansatzes zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Operationen dienten Übersichten über kognitive Operationen als Grundlage - aus den im Kapitel 2.2 genannten Arbeiten sowie aus Mehlhorn & Mehlhorn (1985), Hacker (1986), Sommerfeld (1994a). Die Grundbausteine für die Systematik sind elementare kognitive Operationen bei der Ausbildung und Veränderung interner Repräsentationen auf der Basis extern gegebener struktureller Information. Zur Definition der Grundbausteine wurden *Vollständigkeitsbetrachtungen* unter dem Aspekt der Veränderung der *Information* und der Veränderung der *Struktur* durchgeführt. Für die Systematisierung von Änderungen der strukturellen Information wurde der Ansatz zur Bestimmung des strukturellen Informationsgehaltes von Sommerfeld und Sobik (1994) zu Grunde gelegt.

In der Abbildung 2 ist die auf dieser Grundlage entwickelte Systematik elementarer kognitiver Operationen in einer Übersicht dargestellt. Die Diagonale der Matrix in der Abbildung enthält Operationen, bei denen sich Struktur und Information in die gleiche Richtung verändern. Das sind (mit Ausnahme der isomorphen Abbildung) Operationen, die in der menschlichen Informationsverarbeitung häufig auftreten, wie z.B. Prozesse der Selektion, der Ableitung von Information (Inferenz) sowie der integrativen Strukturbildung oder der hierarchischen Strukturierung auf der Basis von Klassenbildungsprozessen.

Unter dem Aspekt der Vollständigkeit beziehen wir in die systematische Analyse auch gegenläufige Veränderungen mit ein. Sie stellen eine Grundlage dar für die exakte Beschreibung des Hinzufügens bzw. des Entfernens von Widersprüchen und Redundanzen, aber auch spezifischer Abstraktions- und Generalisierungsprozesse. Die detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Klassen von kognitiven Strukturtransformationen wird in Sommerfeld (1994a) gegeben.

Ein wesentliches Ziel der Systematisierung besteht darin, kognitive Operationen aus Modellansätzen unter dem Gesichtspunkt von Struktur- und Informationsveränderungen zu beschreiben und zu klassifizieren. Dabei zeigt sich, dass relevante kognitive Operationen sich zwar relativ gut in die Klassen dieser Systematik einordnen lassen, die Zuordnung jedoch in manchen Fällen nicht eindeutig gemacht werden kann, weil eine Reihe von Operationen nicht exakt beschrieben bzw. nicht definiert ist. Darüber hinaus existieren zuweilen auch unterschiedliche Bezeichnungen für den gleichen Typ von Operationen sowie auch gleiche Bezeichnungen für unterschiedliche Typen von Operationen.

Ein Zugang zu einer eindeutigen Charakterisierung der Operationen in Form einer eindeutigen Zuordnung zu Klassen von Kombinationen bestimmter Informations- und Strukturänderungen besteht darin, dass *alle Operationen* auf der Basis *ein und derselben Menge von strukturellen Elementaroperationen* (gekennzeichnet durch damit verbundene Informations- und Strukturänderungen) *exakt* beschrieben werden. Als Voraussetzung dafür ist es erforderlich, sowohl

Informationsveränderungen als auch Strukturveränderungen formal beschreiben zu können.

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 in Verbindung mit 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. 2: Kombination von Struktur- und Informationsänderungen bei kognitiven Strukturtransformationen (basierend auf Sommerfeld, 1994a)

Zur *Formalisierung* der systematisierten kognitiven Strukturoperationen wurde - anknüpfend an Arbeiten von Klix & Krause (1969), Sydow (1980), Sydow & Petzold, (1981), Nenniger (1980), Sommerfeld & Sobik (1986) - die *Graphentheorie* gewählt (Sommerfeld & Sobik, 1994, Sommerfeld, 1994a, 2008). Dabei wurden in analoger Weise zu den kognitiven Strukturtransformationen Graphtransformationen danach systematisiert, welche Struktur- und Informationsveränderungen sie bewirken. Das ist - mit Bezug zu Abbildung 2 - zusammenfassend in der Abbildung 3 dargestellt.

Struktur struktureller Informationsgehalt	keine Änderung	Vergrößerung	Verkleinerung	Vergrößerung in Verbindung mit Verkleinerung
keine Änderung	isomorphe Abbildung	Hinzufügen isomorpher Untergraphen	Entfernen isomorpher Untergraphen	Hinzufügen in Verbindung mit dem Entfernen isomorpher Untergraphen
Vergrößerung	-----	Hüllenbildung, Produktbildung	Entfernen spezifischer Teilgraphen	Hüllenbildung, Produktbildung, in Verbindung mit dem Entfernen spezifischer Teilgraphen
Verkleinerung	-----	Hinzufügen spezifischer Teilgraphen	Graph- -vergrößerungen, -kondensationen, Erzeugung kritischer Graphen	Graph- -vergrößerungen, -kondensationen, Erzeugung kritischer Graphen, in Verbindung mit dem Hinzufügen spezifischer Teilgraphen
Vergrößerung in Verbindung mit Verkleinerung	-----	Hüllenbildung, Produktbildung, in Verbindung mit dem Hinzufügen spezifischer Teilgraphen	Graph- -vergrößerungen, -kondensationen, Erzeugung kritischer Graphen, in Verbindung mit dem Entfernen spezifischer Teilgraphen	Kombinationen von Graph- -vergrößerungen, -kondensationen und -verbindungen

Abb. 3: Kombination von Struktur- und Informationsänderungen bei Graphtransformationen (basierend auf Sommerfeld, 1994a)

Damit ist es möglich, *kognitiven Strukturtransformationen* zu ihrer formalen Beschreibung entsprechende *Graphtransformationen* zuzuordnen. Die kognitiven Strukturoperationen aus Modellansätzen der internen Repräsentation, des Erwerbs und der Transformation von Wissen können auf der Basis der durch sie bewirkten Änderungen des strukturellen Informationsgehaltes (der repräsentierten Information) und der (diese Information repräsentierenden) Struktur klassifiziert und in diese Systematiken eingeordnet werden (Überblick in Abb. 4).

Struktur struktureller Informationsgehalt	keine Änderung	Vergrößerung	Verkleinerung	Vergrößerung in Verbindung mit Verkleinerung
keine Änderung	isomorphe Abbildung	spezielle Formen der Zerlegung	spezielle Formen der Verkettung	spezielle Formen der Zerlegung und Verkettung
Vergrößerung	-----	Inferenz, Integration, Elaboration, Verdichtung(+), Verkürzung(+), Transition(+), Komposition(+), Projektion, Entfaltung, Substitution, Symbolisierung, Erweiterung		
Verkleinerung	-----		Selektion (z.B. Aktivierung, Inhibition), Reduktion, Elimination Auslassung, Diskrimination	
Vergrößerung in Verbindung mit Verkleinerung	-----			hierarchische Strukturbildung, Verdichtung(-), Verkürzung(-), Transition(-), Komposition(-), Idealisierung, Typisierung, Generalisierung, Abstraktion, Bildung eines - mentalen Modells - Situationsmodells - internen Textmodells

Abb. 4: Einordnung kognitiver Operationen und Prozeduren aus psychologischen Modellansätzen und Experimenten in die Systematik kognitiver Strukturtransformationen (basierend auf Sommerfeld, 1994a)
 Operationen, bei denen die Ausgangsinformation intern mitgespeichert bzw. nicht mitgespeichert wird, sind durch (+) bzw. (-) gekennzeichnet.

Mit dem entwickelten Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturtransformationen wird eine Systematisierung und Präzisierung von Parametern menschlicher Informationsverarbeitung erzielt. Neuronale Netze (vgl. dazu z.B. Dörner, 2004; Krause, 2004a,b) werden damit nicht beschrieben. Prozesse, in denen Zufallsgrößen eine dominierende Rolle spielen, sowie Prozesse mit kontinuierlich variierenden Größen sind mit diesem Ansatz nicht formal erfassbar.

Aussagen über die *psychologische Relevanz* des Modellansatzes erhält man durch den experimentellen Nachweis von Teilmengen kognitiver Operationen der theoretischen Systematik. Mit Bezug dazu bildet die Systematik eine Grundlage für präzisierte Hypothesen über Prozesse bei der Bewältigung definierter kognitiver Anforderungen.

2.4 Kognitive Strukturoperationen: Experimenteller Nachweis

Der *Nachweis der psychologischen Relevanz* des gewählten Ansatzes zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturtransformationen wurde zum einen durch Einordnung psychologisch relevanter Operationen von Modellansätzen und experimentellen Ergebnissen aus der Literatur in die Systematik erbracht (vgl. Abb. 4). Zum anderen ist die Anwendung des Ansatzes auf konkrete Problemstellungen erforderlich. Eine solche Anwendung besteht in der modelltheoretischen und experimentellen Analyse der jeweiligen Problemstellung – verbunden mit dem Vergleich modelltheoretischer und experimenteller Ergebnisse. Dabei sind die experimentellen Ergebnisse Maßstab für die psychologische Adäquatheit der betrachteten inhaltlichen und formalen Modelle.

In Wechselbeziehung zwischen Modell und Experiment wurden Untersuchungen zu unterschiedlichen *Ordnungsproblemen* durchgeführt. Dabei bezog sich die Variation auf verschiedene Kriterien. So ist im Wesentlichen zwischen einrelationalen und mehrrelationalen Ordnungsproblemen unterschieden worden sowie zwischen begrifflichem und bildhaftem Material und bekanntem und unbekanntem Material (vgl. z.B. Krause et al., 1987; Sommerfeld, 1994a, Krause, 2000). Im Rahmen dieses Beitrags nehmen wir Bezug zu den Untersuchungen einrelationaler linearer Ordnungsprobleme, wie sie im Kapitel 1 charakterisiert wurden (für die formale Definition eines Ordnungsproblems, die Instruktion und den detaillierten Versuchsablauf siehe Sommerfeld, 1994a).

Basierend auf dem theoretischen Ansatz zur Systematisierung kognitiver Strukturtransformationen (Übersicht in Abb. 2) und ihrer Formalisierung auf der Basis von Graphtransformationen (Übersicht in Abb. 3) wurde für lineare Ordnungsprobleme eine Systematik von theoretischen Strukturtransformationen erstellt. Diese Systematik bildet eine Grundlage für präzisierte Hypothesen, da ganz bestimmten Strukturtransformationen ganz bestimmte Reaktionszeitfunktionen zuordenbar sind. Würde z.B. eine Versuchsperson die Menge der extern gegebenen Aussagen intern isomorph abbilden, so müsste die Reaktionszeit mit der Anzahl der Inferenzschritte zunehmen. Wird jedoch – wie bereits vielfach experimentell nachgewiesen – zur Anforderungsbewältigung intern eine (behaltensgünstigere) integrierte kognitive Ordnungsstruktur ausgebildet, so ist zu erwarten, dass der Symbol-Distanz-Effekt auftritt (vgl. z.B. Pliske & Smith, 1979; Leth-Steensen & Marley, 2000). Das bedeutet, dass die Reaktionszeit mit zunehmender Distanz der Elemente in der linearen Ordnung abnehmen müsste. Sind über der kognitiven Struktur Klassen ausgebildet und werden sie zur Anforderungsbewältigung genutzt, so muss für den Fall, dass die Elemente in der Frage unterschiedlichen Klassen angehören, die Reaktionszeit von der Distanz zwischen den Elementen unabhängig sein.

Der *experimentelle Beleg* der kognitiven Strukturtransformationen wurde auf der Basis eines von Krause (1985) entwickelten Verfahrens zur Bestimmung von Klassengrenzen erbracht, das auf der

Nutzung der beschriebenen funktionalen Abhängigkeiten basiert. Dieses Verfahren zur Identifizierung interner Repräsentationen hat den Vorteil, dass es weder von den Absolutwerten der Reaktionszeit noch von subjektiven Urteilen der Versuchspersonen abhängig ist. Durch Anwendung dieser Methode konnte ein psychologisch relevanter Teil der mit dem Modellansatz theoretisch bestimmten kognitiven Strukturtransformationen experimentell nachgewiesen werden (vgl. Krause et al., 1987; Sommerfeld, 1994a,b; Krause, 2000). Es betrifft Varianten der *Inferenz* und der *Selektion* von Information sowie die *integrative* und die *hierarchische* Strukturbildung (siehe Diagonale der Matrix in Abb. 2).

Mit der Frage nach den kognitiven Operationen ist die Frage verbunden, durch welche Prinzipien die Anwendung der Operationen *gesteuert* wird. Dabei sind insbesondere *generelle Wirkprinzipien* von Bedeutung (Klix, 1992), d.h., Prinzipien, die bereichsübergreifend wirken.

Neben Kriterien wie „Erzielung einer hohen Lösungsgüte“ und „Verringerung von Unbestimmtheit“ spielen Prinzipien der *kognitiven Ökonomie* eine besondere Rolle. Die Wirksamkeit kognitiver Ökonomieprinzipien spiegelt sich auch in einer Reihe von Modellansätzen zu „Semantischen Netzen“, „Produktionssystemen“ und „Mentalen Modellen“ wider und wurde in unterschiedlichen Experimenten nachgewiesen. Auf das Prinzip der kognitiven Ökonomie wird im Folgenden Bezug genommen.

3. Kognitive Ökonomie

„Die höhere Qualität einer Denkleistung stellt sich dar in der größeren Einfachheit und Effektivität des Lösungsgewinns (Klix, 1993, S. 385).“

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

Kognitive Ökonomie äußert sich in der Reduktion der Komplexität von kognitiven Strukturen und Prozessen. Prinzipien der kognitiven Ökonomie sind auf der Basis von Prinzipien der *Reduktion des kognitiven Aufwandes* zum Behalten und zur Verarbeitung von Information quantifizierbar.

In der Wirksamkeit kognitiver Ökonomieprinzipien setzt sich das Prinzip der *Einfachheit* durch. Einfache, gut strukturierte (jedoch die lösungsrelevante Information berücksichtigende) interne Repräsentationen und einfache, klar definierte (Teil-) Prozesse zu ihrer Erzeugung und anforderungsabhängigen Nutzung bilden wesentliche *Grundlagen*, um den Denkprozess effizient zu gestalten und/oder um ein klares Denkresultat zu erzielen.

Dabei kann die Schaffung solcher Grundlagen - im Sinne einer Vorbereitung des eigentlichen Lösungsprozesses - unter Umständen durchaus mit erheblichem Aufwand verbunden sein, z.B. für die Suche und Strukturierung von Information oder auch für Übungsprozesse.

Vereinfachungsprinzipien in der menschlichen Informationsverarbeitung betreffen z.B. die Ausnutzung von Regularitäten, Klasseneigenschaften und Symmetrien zur Bildung, Repräsentation und Verarbeitung von Strukturen und zur Bildung von Makrooperationen sowie Prinzipien der Selektion und Integration von Information (Klix, 1992, 1993, 2004; Krause, 1991a, 1994, 2000). Diese Prinzipien wurden in unterschiedlichen Bereichen der Psychologie experimentell nachgewiesen. Klix hebt in seinen Analysen geistiger Leistungen aus evolutionspsychologischer Sicht 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 (Besonderheiten dazu vgl. z.B. Klix, 1993, S. 275, Fußnote 2). Als experimentelle Psychologie von Ordnungsbildungen im psychischen Geschehen ist die Gestaltpsychologie von Bedeutung (zur Gestaltpsychologie als experimentelle Wahrnehmungs- und Denkpsychologie und zu ihren Wegbereitern siehe z.B. Sprung, L., 2004; Sprung, H., 2006).

Beispiele für die Einfachheit und Klarheit von (u.U. durchaus mit viel Zeit und Denkaufwand erzielten) Denkresultaten findet man in Gesetzen und Theorien, z.B. in den Keplerschen Gesetzen (vgl. auch Klix, 1993) oder in Einsteins (Spezieller und Allgemeiner) Relativitätstheorie. Im Prozess der Herausbildung solcher Denkresultate spielt häufig die Unvereinbarkeit von existierenden (Teil-)Theorien oder Gesetzen eine Rolle und zweifellos auch die Überzeugung von der Einfachheit (von Gesetzmäßigkeiten), wie das z.B. bei Einstein der Fall war. Zu beachten ist dabei jedoch eine – Einstein zugeschriebene – Maxime: „*Man sollte alles so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher*“ (Greene, 2004, S. 62). So ist das Prinzip der Einfachheit insbesondere auch bei der Anwendung der Mathematik zur exakten Beschreibung von Theorien und Gesetzmäßigkeiten, aber auch bereits zur exakten Beschreibung von Hypothesen, bedeutsam (vgl. auch Hörz & Schimming, 2009). „*Oberstes heuristisches Prinzip für die Aufdeckung von Naturgesetzen in einem durch Experimente neu erschlossenen Gebiet ist für Werner Heisenberg (1901-1976) die mathematische Einfachheit*“ (Hörz, 2007, S. 47). Gustav Theodor Fechner (1801-1887), der Begründer der Psychophysik, schreibt nachdem er die entscheidende Idee zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs von Leib und Seele entwickelt hatte, in sein Tagebuch: „*Nun aber, wie werde ich mit meinem bischen Mathematik dieß neue große Gebiet beherrschen können? Beherrschen gewiß nicht; aber doch vielleicht beginnen. Die Grundprincipien scheinen doch mittels sehr einfacher Vorkenntnisse der höhern Rechnungsarten sich darstellen und entwickeln zu lassen, wenigstens so weit, dass die Basis wirklich gelegt ist*“ (Meischner-Metge, 2004, S. 410).

In unseren Untersuchungen fragen wir nach einfach(st)en, die lösungsrelevante Information repräsentierenden, kognitiven Strukturen sowie nach einfach(st)en Prozessen zur Erzeugung und Nutzung kognitiver Strukturen. Mit Bezug zu unserem mathematisch-psychologischen Ansatz der Ausbildung, Transformation und anforderungsabhängigen Nutzung kognitiver Strukturen untersuchen wir damit, ob sich Strategien auf der Grundlage der Wirksamkeit ganz bestimmter kognitiver Ökonomieprinzipien voneinander unterscheiden und bezüglich ihrer Effizienz im Informationsverarbeitungsprozess *bewerten* lassen.

Um zur Beantwortung dieser Frage beizutragen, ist eine modelltheoretische und experimentelle Analyse von Repräsentations- und Prozessparametern durchgeführt worden. Als Ausgangspunkt wurde die Frage gestellt, inwieweit in Ansätzen, in denen Annahmen zum Erwerb, zur Veränderung und zur Nutzung von Wissen gemacht werden, auch Annahmen über kognitive Ökonomieprinzipien, die diese Prozesse steuern, enthalten sind (vgl. Sommerfeld, 1994a, 2008). Im Rahmen dieses Beitrags soll im Folgenden auf ausgewählte Arbeiten kurz eingegangen werden.

3.2 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Modellansätze aus der Literatur

Bereits einer Reihe von frühen Modellansätzen zur Erkennung perceptiver Muster (z.B. Simon & Kotovsky, 1963; Restle, 1970) liegen Minimalitätsberechnungen für die Beschreibung eines Musters zu Grunde, von denen angenommen wird, dass sie ein ökonomisches Verhalten des Menschen maßgeblich beeinflussen. So geht z.B. Leeuwenberg (1968) davon aus, dass das menschliche Codierungssystem im Allgemeinen die jeweils kürzeste Beschreibung eines Musters verwendet. Im Rahmen von theoretischen und experimentellen Untersuchungen hat er ein Komplexitätsmaß entwickelt, das auf dem Beschreibungsaufwand von Repräsentationen einer in einem Muster repräsentierten Information basiert (vgl. auch Buffart & Leeuwenberg, 1983). Das Komplexitätsmaß wird auf der Grundlage der *minimalen Anzahl* unabhängiger Eigenschaften berechnet, die für die vollständige Musterbeschreibung erforderlich sind. Beim Vergleich der theoretischen Berechnungen mit experimentellen Ergebnissen zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung.

In seiner Theorie zur Repräsentation und zum Erwerb von Regelwissen nimmt Anderson (1983, 2001, 2004) Optimierungsprozesse an, durch die eine anforderungs- bzw. lernabhängige Veränderung der internen Repräsentation so vorgenommen wird, dass die zu behaltende Wissensstruktur nicht mehr so umfangreich ist (*Komplexitätsreduktion der Wissensstruktur*). Dadurch wird der kognitive *Behaltensaufwand* verringert. Es werden jedoch auch Prozesse der Diskrimination angenommen, die bewirken, dass die Wissensstruktur weiter spezifiziert und – wenn notwendig – sogar vergrößert wird, um den anschließenden Prozess der Nutzung (Anwendung) dieser Wissensstruktur zu vereinfachen (*Reduktion der Schwierigkeit oder Kompliziertheit des Prozesses*). Damit kann zu einer Verringerung von *Prozessaufwand* beigetragen werden.

Für die Charakterisierung von interindividuellen Unterschieden in Intelligenz und Begabung schreibt Klix der Wechselbeziehung zwischen Wissensbesitz und darauf arbeitenden Prozeduren eine hohe Bedeutung zu (Klix, 1983, 1993). Bezogen auf die individuelle Denkleistung schreibt er „*Uns scheint, dass das im Kleinen, Individuellen ganz ähnlich ist wie im gesellschaftlichen Großen. ... Die Frage muss gestellt werden: Wenn mehrere Lösungen vorliegen, welche ist dann die intelligenter?*“ (Klix, 1993, S. 385). Als Bewertungskriterium für unterschiedliche Lösungsprozesse spielt dabei der *kognitive Aufwand* eine entscheidende Rolle: „*Bei zwei Lösungsprozessen ist derjenige der intelligenter, bei dem die Lösungsfindung mit geringerem kognitiven Aufwand erzielt wird. Von zwei Personen X und Y ... ist diejenige als intelligenter einzuschätzen, die mit geringerem Aufwand vergleichbar schwierige Lösungen findet und die – Verdichtungs- und Verkürzungsprozesse ausnutzend – dabei auch früher zur Lösung gelangt. Eben diese effizienter denkende Person X kann nämlich (das gleiche Prinzip weiter gedacht) mit dem Aufwand von Person Y Probleme größerer Schwierigkeit bewältigen. Im Hintergrund stehen dabei Unterschiede in der Mächtigkeit kognitiver Informationsverarbeitungsprozesse sowie in der Flexibilität, neues Wissen zu generieren. ... Aufwandssenkung entsteht durch problemgemäßes Klassifizieren, durch Verdichtungen oder Verkürzungen im Prozessaufwand.*“ Experimentelle Belege dazu wurden in unterschiedlichen Untersuchungen erbracht (vgl. z.B. Klix, 1983, 1992, 1993).

Kernpunkt der Untersuchungen von Krause (1991b, 1994, 2000) ist die Annahme, dass alle mentalen Prozesse auf *informationeller Strukturbildung* basieren und dass *Ordnungsbildung* als aufwandsreduzierende Strukturierung und Umstrukturierung von Wissen und Prozeduren eine Basiskomponente des Denkens darstellt. Es wird angenommen, dass die *Fähigkeit* zur aufwandsreduzierenden Strukturierung und Umstrukturierung von Wissen ein bereichsübergreifendes Prinzip ist und ein entscheidendes Kriterium zur Differenzierung kognitiver Leistungen darstellt. Dabei steht hier nicht die Frage nach der Strukturierung bereichsspezifischen Wissens im Vordergrund, sondern neben der Frage nach der anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen insbesondere die Frage nach der effektiven Strukturierung neuer Information und damit nach der Fähigkeit des Menschen, sich in unbekanntem Situationen zurecht zu finden. Auf der Basis der Kombination modelltheoretischer und experimenteller Untersuchungen konnte für verschiedene elementare Problemlöseanforderungen das Prinzip der aufwandsarmen Strukturierung als bereichsübergreifend nachgewiesen werden (Krause et al., 1986; Krause, 1991a,b, 2000; Sommerfeld, 1994a; Kotkamp, 1999). Auf einen Teil der experimentellen Ergebnisse wird in den Kapiteln 3.4 und 3.5 noch Bezug genommen.

Hacker (1983) ist der Frage nachgegangen, wie mentale Repräsentationen Handlungen steuern und welche Eigenschaften spezifisch für die Handlungsregulation sind. In diesem Kontext konnte für Spitzenleistungen bei bestimmten Berufsgruppen experimentell das häufige Auftreten von Mischstrategien aus Regelanwendung und Auswendiglernen nachgewiesen werden, die durch eine *geringe Beanspruchung des Gedächtnisses* und/oder durch einen *geringen Aufwand an Transformationsleistungen* gekennzeichnet sind (Hacker, 1992).

Insgesamt zeigt die durchgeführte Literaturanalyse (vgl. Sommerfeld, 1994a, 2008), dass die

Reduktion des kognitiven Aufwandes eine zentrale Bedeutung als Steuer- und Bewertungskriterium in der menschlichen Informationsverarbeitung hat und in unterschiedlichen Bereichen der Psychologie experimentell nachgewiesen wurde. Die Aufwandsreduktion kann sowohl auf Eigenschaften des *Prozesses* selbst bezogen sein als auch auf Eigenschaften des Resultates eines solchen Prozesses, d.h. einer durch diesen Prozess erzeugten internen *Repräsentation*. Um solche Kriterien zu bestimmen, ist es erforderlich, Struktur- und Prozesseigenschaften zu analysieren, die zur anforderungsabhängigen Ausbildung, Transformation und Nutzung kognitiver Strukturen in Beziehung stehen. Damit wird menschliche Informationsverarbeitung als ein Prozess der Ausbildung, Transformation und Nutzung kognitiver Strukturen untersucht, der durch bestimmte Größen gesteuert wird.

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

3.3 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Ansatz zur Bewertung kognitiver Strukturoperationen

Soll eine kognitive Anforderung auf der Grundlage einer extern gegebenen Information bewältigt werden, müssen eine geeignete interne Repräsentation erzeugt bzw. eine vorhandene interne Repräsentation entsprechend modifiziert werden, die dann eine Grundlage für die Anforderungsbewältigung bildet. Damit sind zwei wesentliche Komponenten des Prozesses gekennzeichnet, der erforderlich ist, um eine kognitive Anforderung gezielt bewältigen zu können: der Prozess der Erzeugung und Transformation einer internen Repräsentation und der Prozess zur Nutzung dieser internen Repräsentation für die Anforderungsbewältigung. Diese Prozesse, die im Allgemeinen miteinander in Wechselbeziehung stehen, 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 Aufwandparameter sind der *Erzeugungs- und Transformationsaufwand*, der *Strukturnutzungsaufwand* und der *Behaltensaufwand* (vgl. Abbildung 5). Wir haben den kognitiven Aufwand als Funktion dieser drei Komponenten untersucht (vgl. Krause et al., 1986; Sommerfeld, 1994a, 2008; Krause, 2000).

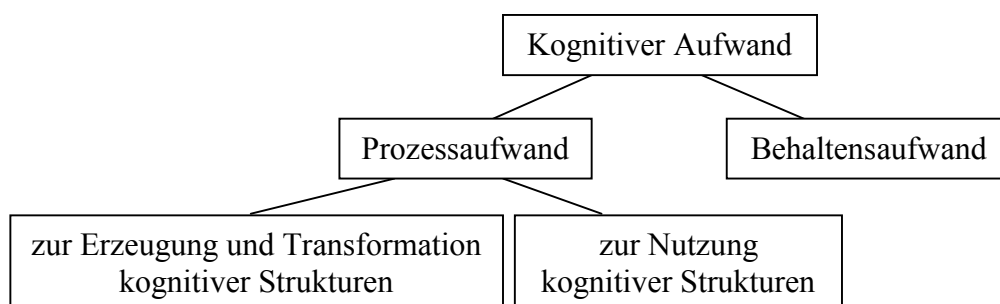


Abb. 5: Kognitiver Aufwand

Eine wichtige Frage, die sich mit einer solchen Betrachtungsweise verbindet, ist die nach Parametern für die Charakterisierung der einzelnen Komponenten, sowie nach der Art des Zusammenwirkens solcher Parameter. Unter dem Gesichtspunkt geistiger Belastung sind theoretische Berechnungen von Interesse, die (zumindest lokale) Minima einer Aufwandsfunktion bestimmen. Auf einige dafür relevante Parameter wird im Rahmen dieses Beitrags Bezug genommen. Spezielle Parameterkonfigurationen sind am Experiment überprüft worden.

In verschiedenen Ansätzen aus der Literatur spiegelt sich wider, dass für den Aufwand zum *Behalten* einer strukturellen Information *Struktureigenschaften* wie „Komplexität“, „Umfang“,

„Einfachheit“ oder „Regularität“ von Bedeutung sind. Für die Analyse von Komponenten des Prozessaufwandes sind wir von der Annahme ausgegangen, dass Prozesse der Ausbildung, Transformation und anforderungsabhängigen Nutzung interner Repräsentationen auf der Grundlage der Abarbeitung von Entscheidungsstrukturen beschrieben werden können. So ist die Abarbeitung von Entscheidungsstrukturen unterschiedlicher Komplexität in kognitiven Prozessen bereits in früheren Untersuchungen mehrfach nachgewiesen worden (vgl. z.B. Klix & Rautenstrauch-Goede, 1968; Sydow, 1970a,b; Krause, 1970, 2000; Groner, 1978). Der kognitive Aufwand für die Realisierung solcher *Prozesse* scheint wesentlich durch die „Kompliziertheit“ („Schwierigkeit“) der Abarbeitung einer Entscheidungsstruktur determiniert zu sein. Sowohl der Begriff „Komplexität“ einer Struktur als auch der Begriff „Kompliziertheit“ der Abarbeitung einer Entscheidungsstruktur sind in der Literatur nicht einheitlich charakterisiert bzw. definiert (Shimizu, 1989; Halford et al., 1998; Mayr & Kliegl, 1993; Barch et al., 1997; Köhler et al., 2002).

Anknüpfend an Ansätze aus der Literatur werden Struktur- und Prozessparameter analysiert, von denen anzunehmen ist, dass sie die genannten Aufwandskomponenten maßgeblich determinieren. Basierend darauf wurde der im Kapitel 2.2 charakterisierte Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturoperationen erweitert durch einen Modellansatz zur Bewertung der Effizienz solcher Operationen auf der Basis des kognitiven Aufwandes. Das Ziel der Untersuchungen besteht dabei darin, *theoretisch ausgezeichnete* Vorgehensweisen (Normative) zu bestimmen und Abweichungen zwischen diesen und experimentell nachgewiesenen Vorgehensweisen zu ermitteln.

3.3.1 Behaltensaufwand

Wenn wir - mit Bezug zu Leeuwenberg (1968) - von der Annahme ausgehen, dass der Behaltensaufwand einer Struktur dem Beschreibungsaufwand für diese Struktur proportional ist, so kann diese Komponente des kognitiven Aufwandes im wesentlichen durch die Komplexität der entsprechenden kognitiven Struktur charakterisiert werden. Damit ist es möglich, Kriterien für den Behaltensaufwand auf der Basis von Struktureigenschaften zu bestimmen.

In einer kognitiven Struktur, die wir unter dem Aspekt des Behaltensaufwandes betrachten, repräsentieren die Kantenmarkierungen des repräsentierenden Graphen G Eigenschaften von Beziehungen (Relationen) zwischen den einzelnen Teilen (Elementen) einer internen Repräsentation und die Knotenmarkierungen Eigenschaften (Merkmale) dieser Elemente. Neben solchen einzelnen Komponenten wie „Elemente“, „Merkmale“, „Relationen“ usw. sind auch Kombinationen dieser Komponenten von besonderem Interesse, da auf ihrer Grundlage komplexere Eigenschaften wie z.B. „Komplexitätsgrad“, „Regularitätsgrad“ usw. beschrieben werden können. Anknüpfend an Leeuwenberg (1968) wird im Modellansatz in Krause et al. (1986, 1989) und Sommerfeld (1991, 1994a) der (minimale) Behaltensaufwand $L_{beh}(G)$ für eine Struktur G auf die *minimale Anzahl* $n_{merk}(G)$ von (durch Knotenmarkierungen der erzeugten Struktur G repräsentierten) Elemente- und Klassenmerkmalen zurückgeführt, die zur Beschreibung dieser Struktur notwendig ist:

$$L_{beh}(G) = n_{merk}(G)$$

Eine solche minimale Beschreibung basiert im Allgemeinen maßgeblich auf der Ausnutzung von Regularitäten, Klasseneigenschaften und Symmetrien. Die Reduktion der Komplexität der zu behaltenden Struktur ist insbesondere unter dem Aspekt von Bedeutung, umfangreiche Mengen an lösungsrelevanter Information so zu transformieren, dass sie in einer „komprimierten“ Form im Gedächtnis gespeichert werden können, ohne dass Informationen verloren gehen, die für die Problemlösung erforderlich sind.

Neben dem Behaltensaufwand sind die *Prozesskomponenten* „Erzeugungs- und Transformationsaufwand“ und „Strukturnutzungsaufwand“ fundamentale Komponenten des kognitiven Aufwandes.

3.3.2 Prozessaufwand

Obwohl in der Realität Erzeugung und Transformation einer internen Repräsentation in Wechselwirkung mit der Nutzung dieser Repräsentation zur Anforderungsbewältigung stehen, ist es zur Erzielung präziser experimenteller Ergebnisse methodisch vorteilhaft, den Gesamtprozess zum einen unter dem Aspekt der Erzeugung und Transformation und zum anderen unter dem Aspekt der Nutzung einer internen Repräsentation zu untersuchen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird auf den Prozessaufwand zur Nutzung ausgebildeter kognitiver Strukturen (*Strukturnutzungsaufwand*) eingegangen. Wie oben angesprochen, wird als Ausgangspunkt für die Modellbetrachtungen angenommen, dass Prozesse der Nutzung interner Repräsentationen auf der Grundlage der Abarbeitung von Entscheidungsbäumen beschrieben werden können. Die Knoten eines solchen Entscheidungsbaumes repräsentieren interne Wissenszustände und die Kanten Übergänge zwischen diesen Wissenszuständen. Die Kantenmarkierungen des beschreibenden Graphen enthalten die für den jeweiligen Übergang angewendeten Operationen und deren Eigenschaften (z.B. Bewichtigungen). Ein ganz bestimmter Strukturnutzungsprozess wird dann durch einen ganz bestimmten Weg in einer Entscheidungsstruktur charakterisiert (abgebildet). Das bedeutet, dass neben der Komplexität einer solchen Entscheidungsstruktur insbesondere die Kompliziertheit der Abarbeitung dieser Struktur Einfluss auf den kognitiven Aufwand hat. Damit ist auch die Annahme verbunden, dass die Kompliziertheit der „Realisierung“ eines solchen Weges wesentlich von der Kompliziertheit der dabei anzuwendenden Operationen abhängt. In den Modellansatz geht die Annahme ein, dass der Aufwand zur Nutzung einer kognitiven Struktur eine monoton wachsende Funktion der Anzahl aller zur Bewältigung dieser Anforderung notwendigen Anwendungen von Operationen und ihrer Kompliziertheit ist. Dabei wird weiterhin angenommen, dass die Kompliziertheit einer Operation dem Zeitverbrauch ihrer Anwendung proportional ist. Wenn die Nutzung einer kognitiven Struktur G zur Bewältigung einer kognitiven Anforderung A die Anwendung der Operationen $o_1(G,A), \dots, o_m(G,A)$ mit einem jeweiligen Zeitaufwand $e_1(G,A), \dots, e_m(G,A)$ (Elementarzeiten) erfordert, ist damit der kognitive Strukturnutzungsaufwand $L_{nutz}(G,A)$ eine Funktion der Anzahlen $n_1(G,A), \dots, n_m(G,A)$ der Anwendungen der Operationen $o_1(G,A), \dots, o_m(G,A)$ und der entsprechenden Elementarzeiten $e_1(G,A), \dots, e_m(G,A)$, d.h.

$$L_{nutz}(G,A) = f_{nutz}((n_1(G,A), e_1(G,A)), \dots, (n_m(G,A), e_m(G,A))).$$

Dabei stellt sich die Frage nach der Verknüpfung der Anwendungshäufigkeiten $n(o_i)$ mit den Elementarzeiten e_i sowie nach dem Zusammenwirken der Komponenten $(n(o_i), e_i)$. Das beinhaltet auch die Frage, ob eine sequentielle oder (teilweise) parallele Verarbeitung erfolgt. Obwohl z.B. bereits Sternberg (1969) und Jacobs und Levi-Schoen (1988) in vergleichbaren experimentellen Situationen eine sequentielle Verarbeitung nachweisen konnten, ist diese Frage generell nicht geklärt. In dem entwickelten Modellansatz (Sommerfeld, 1994a) wird erst einmal vorausgesetzt, dass die Operationen sequentiell und im Falle unterschiedlicher Operationen unabhängig voneinander ausgeführt werden, für die wiederholte Ausführung von Operationen wird eine Abhängigkeit von der Anzahl der Wiederholungen angenommen. Als eine mögliche Realisierung dieses Konzeptes wird der Fall betrachtet, dass sich der Aufwand für die Anwendung einer bestimmten Operation o_i multiplikativ aus ihrer Elementarzeit e_i und einer in Abhängigkeit von der konkret vorliegenden Anzahl $n(o_i)$ von Anwendungen monoton wachsenden Funktion

zusammensetzt. Auf der Basis dieses Ansatzes wird der (minimale) Aufwand zur Bewältigung einer kognitiven Anforderung A bei Nutzung einer kognitiven Struktur G auf der Grundlage eines Weges mit minimaler Bewichtung durch eine mit Operationszeiten bewichtete Entscheidungsstruktur bestimmt.

Ein Grundgedanke der Berechnung des Strukturnutzungsaufwandes bei der Lösung von Ordnungsproblemen besteht dabei in folgendem. Da die kognitive Anforderung A bei einem Ordnungsproblem aus einer (großen) Menge von Elementaranforderungen besteht (Beantwortung von unterschiedlichen Typen von Fragen nach einer Ordnungsrelation zwischen zwei Elementen), sind unterschiedliche kognitive Strukturierungen daraufhin zu untersuchen, inwieweit eine große Teilmenge der Gesamtmenge der Elementaranforderungen mit geringem kognitiven Aufwand bewältigt werden kann. Für eine andere, kleinere Teilmenge (im Extremfall für eine einzelne Elementaranforderung) kann dabei die entsprechende Repräsentation durchaus ungünstig sein.

Es stellt sich nun die Frage, ob durch das Modell als *effektiv* charakterisierte kognitive Strukturen auch von den Vpn bevorzugt ausgebildet und bei Anforderungen aus unterschiedlichen Bereichen zur Lösungsfindung genutzt werden. Damit ist nach experimentellen Belegen dafür zu suchen, dass die *Reduktion des kognitiven Aufwandes* ein wirksames und bereichsübergreifendes Prinzip in der menschlichen Informationsverarbeitung ist.

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 (Krause u.a., 1989; Sommerfeld, 1994a; Kotkamp, 1999; Krause, 2000).

Da es bisher keine befriedigenden Aussagen über den funktionalen Zusammenhang der verschiedenen Aufwandskomponenten gibt, man also nicht weiß, wie z.B. Behaltens- und Strukturnutzungsaufwand in einer Maßzahl zusammenzufassen sind, haben wir Problemstellungen untersucht, bei denen die Komponenten relativ isoliert voneinander betrachtet werden können. Dazu wurden in den Experimenten Probleme zu Grunde gelegt, bei denen für die Differenzierung unterschiedlicher kognitiver Strukturierungen im Wesentlichen nur eine Komponente wirksam wird. Das ist der Fall, wenn der kognitive Aufwand für die andere Komponente sehr gering und/oder für unterschiedliche kognitive Strukturen relativ wenig verschieden voneinander ist. Die Berechnung der Rangreihe basiert dann im Modell nur auf einer Komponente, d.h. bei der Nutzung kognitiver Strukturen entweder auf dem Behaltensaufwand oder auf dem Strukturnutzungsaufwand. 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* für die Lösungsfindung *verhaltenswirksam* wird.

Damit wird zum einen die Frage nach einer *effektiven Strukturierung neuer Information* gestellt und zum anderen die Frage nach einer *anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen*. Auf Ausschnitte der experimentellen Untersuchungen und Ergebnisse wird in den folgenden beiden Kapiteln eingegangen.

3.4 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Experimenteller Nachweis der effektiven Strukturierung neuer Information

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 *unbekannten*

Situation zurechtfinden. Bei Ordnungsproblemen dieser Problemklasse ist eine relativ umfangreiche Menge von Aussagen zu verstehen und möglichst geeignet im Gedächtnis zu strukturieren. Dieser Problemtyp ist dadurch gekennzeichnet, dass es für unterschiedliche Strukturierungen im Allgemeinen große Unterschiede im *Behaltensaufwand* gibt. Obwohl für die Problemlösung neben dem temporären Behalten der Information im Arbeitsgedächtnis (Baddely & Hitch, 1974; Miyake & Shah, 1999; Baddeley, 2003) die Verarbeitung der Information sowie die Koordination dieser Komponenten erforderlich sind, wird bei dieser Problemklasse der kognitive Aufwand für den Lösungsprozess entscheidend durch die Behaltenskomponente bestimmt. Strukturen mit geringem Behaltensaufwand sind weniger komplex und bilden eine wesentliche Grundlage für die Effizienz der Anforderungsbewältigung.

Um die Fähigkeit zur Verringerung der Komplexität untersuchen zu können, wurde ein Ordnungsproblem mit unbekannter Information 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 (1994a) und Krause (2000) detailliert beschrieben.

Betrachtet man die *Ergebnisse* unter dem Aspekt, ob das Prinzip der Aufwandsreduktion verhaltenswirksam ist, so zeigt sich hier, dass zwar 25 von den 40 untersuchten Vpn behaltensgünstige, d.h. effiziente interne Repräsentationen (der extern gegebenen Information) ausbilden und zur Anforderungsbewältigung nutzen, die restlichen 15 Vpn jedoch Repräsentationen nutzen, die einen relativ hohen Behaltensaufwand erfordern. Damit stellt sich ausgehend von diesem Ergebnis die Frage, ob die Vpn mit den behaltensgünstigen internen Repräsentationen durch weitere Eigenschaften ausgezeichnet sind, die für das Erbringen intelligenter Leistungen vorteilhaft sind. Um zur Beantwortung dieser Frage beizutragen, wurde bei jeder Versuchsperson der Behaltensaufwand als ein Maß für die Effektivität der zur Lösung genutzten kognitiven Struktur mit der Güte der Leistung bei der Lösung *komplexer fachspezifischer Probleme* verglichen. Die Versuchspersonen waren Konstruktionsstudenten bzw. Mathematikstudenten und hatten dazu komplexe Probleme aus der Konstruktion bzw. aus der Mathematik zu lösen. Die Güte der komplexen Problemlöseleistung wurde für die Konstruktionsstudenten über die Benotung des Entwurfs eines Justiertisches bestimmt und für die Mathematikstudenten aus dem Durchschnitt der Noten der Prüfungsfächer Analysis, lineare Algebra, Stochastik und Informatik berechnet.

In der Abbildung 6 sind die *Ergebnisse* in einer Übersicht dargestellt. Sie zeigen, dass *leistungsstarke* Vpn bevorzugt kognitive Strukturen ausbilden, die entsprechend dem zugrunde gelegten Modellansatz durch einen *geringen kognitiven Aufwand* gekennzeichnet sind. Mit den Untersuchungen und den dabei erzielten Resultaten konnte experimentell belegt werden, dass zwischen der Nutzung aufwandsreduzierender kognitiver Strukturen bei der Lösung eines Ordnungsproblems mit unbekannter Information und den Zensuren beim Lösen (fachspezifischer) komplexer Probleme ein hoher korrelativer Zusammenhang besteht.

Effektive Strukturierung neuer Information

Modell

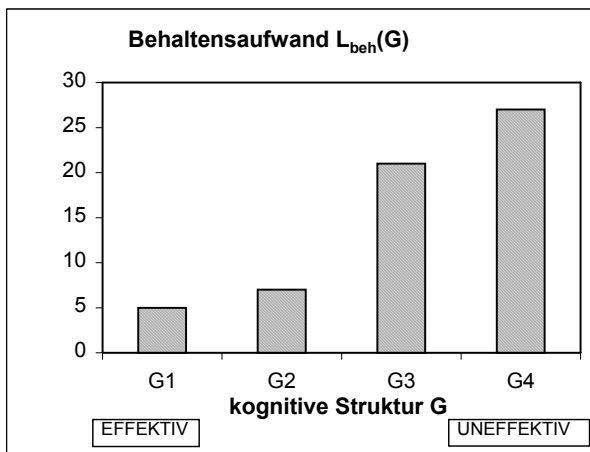


Abb. 6a)

Experiment

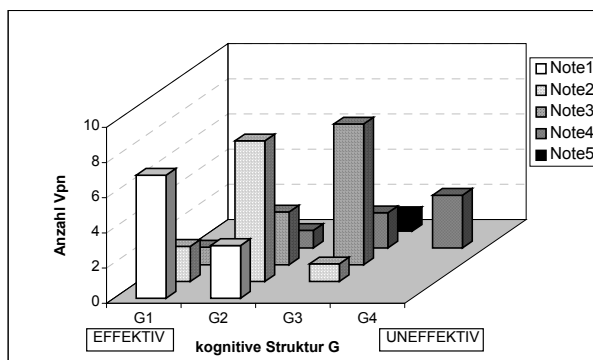


Abb. 6b)

Abb. 6: Lösen eines Ordnungsproblems auf der Grundlage **neuer** Information: Modellwerte für den Behaltensaufwand und experimentelle Ergebnisse (basierend auf Krause et al., 1986; Sommerfeld, 1994a; Krause, 2000).

- Modellwerte: Kognitiver Aufwand $L_{beh}(G) = n_{merk}(G)$ für das Behalten unterschiedlicher hierarchischer Strukturen $G=G_1, G_2, G_3$, bzw. G_4 ($n_{merk}(G)$: Merkmalsanzahl)
- Experimentelle Ergebnisse: Anzahl von Vpn, bei denen die Nutzung dieser kognitiven Strukturen experimentell nachgewiesen wurde. Die Vpn sind nach ihrer Leistungsfähigkeit beim Lösen komplexer fachspezifischer Probleme gegliedert (Parameter: Zensuren für das Lösen der Probleme)

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 (1998, 1999) weitere Ergebnisse zu einem solchen *bereichsübergreifenden, personenspezifischen* Wirkprinzip im Denken erzielen: Wer beim elementaren Problemlösen vereinfacht, vereinfacht auch beim komplexen Problemlösen.

3.5 Reduktion des kognitiven Aufwandes: Experimenteller Nachweis der anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen

Die Frage nach einer *anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen* stellt sich, wenn man

Probleme mit *wissensgestützter* Information danach untersucht, ob bzw. unter welchen Bedingungen das *Prinzip der Aufwandsreduktion* bei der Nutzung von Wissensstrukturen aus dem Langzeitgedächtnis für die Lösungsfindung verhaltenswirksam wird. Für diese Klasse von Problemstellungen bedeutet das, experimentell zu prüfen, ob bzw. unter welchen Bedingungen Langzeitwissen in Abhängigkeit von der kognitiven Anforderung umstrukturiert wird, wenn dadurch der Lösungsprozess vereinfacht werden kann. Bei Problemen mit wissensgestützter Information ist der Behaltensaufwand im Allgemeinen gegenüber Problemen mit unbekannter Information sehr gering, da zur Anforderungsbewältigung weitgehend auf bekannte Information, z.B. auf Alltagswissen oder Fachwissen, zurück gegriffen werden kann.

Im Rahmen der Frage nach Kriterien für eine anforderungsabhängige Umstrukturierung von Wissen untersuchten wir Probleme mit Elementen aus der Konstruktionswissenschaft (entworfen von G. Höhne und H. Sperlich, TU Ilmenau). Dabei handelte es sich um konstruktive Elemente zur Aufnahme von Kräften nach dem physikalisch-technischen Prinzip der Berührungsfläche. Um zu experimentell zu prüfen, ob die Vpn ihre (in der Vorlesung gelehrt und für Konstruktionsprobleme vorteilhaften) Wissensstrukturen stereotyp beibehalten oder anforderungsabhängig umstrukturieren, wurde das zu lösende Problem nicht als Konstruktionsproblem, sondern als ein – für Konstrukteure nicht typisches – Ordnungsproblem behandelt, wobei konstruktive Elemente bezüglich der Ordnungsrelation „belastbarer als“ zu vergleichen waren. Problemstellungen, Modelle und Aufwandsberechnungen sowie Experimente dazu sind in Krause et al. (1989, 1994), Sommerfeld (1994a) und Krause (2000) beschrieben. In den Experimenten wurde geprüft, ob Konstruktionsstudenten und junge Konstrukteure der Technischen Universität Ilmenau in der Vorlesung gelehrt hierarchische Strukturierungen von Mengen konstruktiver Gebilde bei unterschiedlichen Anforderungen gleichermaßen nutzen oder ob sie umstrukturieren und bei der Anforderungsbewältigung andere hierarchische Strukturierungen zu Grunde legen.

Anforderungsabhängige Umstrukturierung von Wissen

Abb. 7a, **Modell**

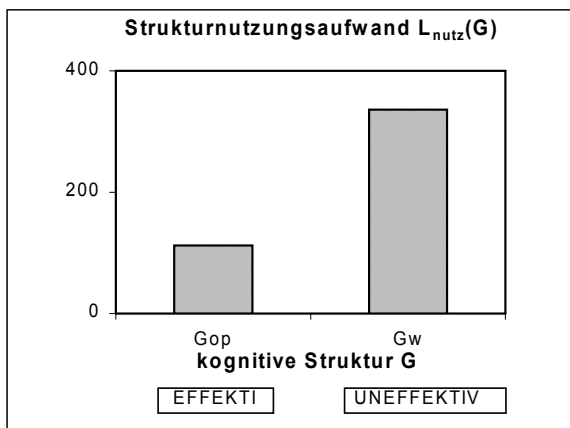


Abb. 7b, **Experiment**

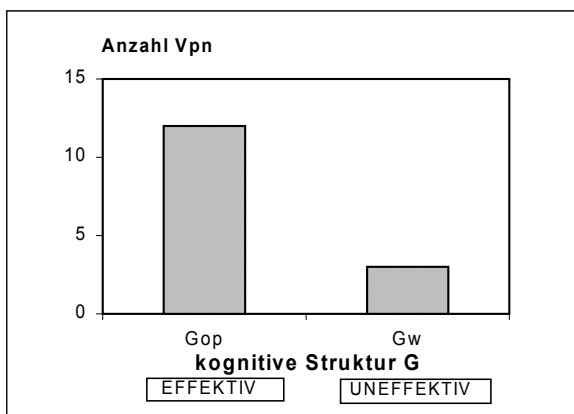


Abb. 7: Lösen eines Ordnungsproblems auf der Grundlage **bekannter** Information (zweidimensionale Darbietung):
 Modellwerte für den Prozessaufwand (Strukturnutzungsaufwand) und experimentelle Ergebnisse (basierend auf Krause et al., 1994, Sommerfeld, 1994a; Krause, 2000)

a) Modellwerte: Kognitiver Aufwand $L^*_{\text{nutz}}(G, OP) = n_{\text{umc}}(G, OP)$ zur Lösung des Ordnungsproblems OP auf Basis der kognitiven Struktur G, mit $G = G_w$: in der Vorlesung gelehrt Wissensstruktur $G = G_{op}$: für die Lösung des Ordnungsproblems effektivere kognitive Struktur.

Im verwendeten Versuchsmaterial basieren Unterschiede im kognitiven Aufwand im Wesentlichen auf Umcodierungsoperationen vom Zweidimensionalen ins Dreidimensionale. $L^*_{\text{nutz}}(G, OP) = n_{\text{umc}}(G, OP)$ ist der Teil des Strukturnutzungsaufwandes $L_{\text{nutz}}(G, OP)$, der (entsprechend dem Modell) die Anzahl notwendiger Anwendungen der Umcodierungsoperation $n_{\text{umc}}(G, OP)$ bezeichnet.

b) Experimentelle Ergebnisse: Anzahl von Vpn (Studenten der Konstruktionswissenschaft), bei denen die Nutzung der kognitiven Struktur G_{op} bzw. der kognitiven Struktur G_w bei der Lösung des Ordnungsproblems experimentell nachgewiesen wurde

Die (für die Lösung des Ordnungsproblems ineffektive) Struktur G_w wird in der Vorlesung gelehrt und für die Lösung konstruktiver Probleme erfolgreich angewandt.

Bei den verwendeten Problemen konnte der geringe Behaltensaufwand als nahezu konstant angenommen werden. Relativ große Unterschiede gab es jedoch im Prozessaufwand zur Nutzung der kognitiven Strukturen (Strukturnutzungsaufwand), so dass für die Differenzierung unterschiedlicher kognitiver Strukturierungen nach ihrer Effizienz für den Lösungsprozess diese Aufwandskomponente zugrunde gelegt wurde. Dazu wurden in einem Experiment die konstruktiven Elemente in zweidimensionaler Form dargestellt und in einem weiteren Experiment in dreidimensionaler Form.

Die *Resultate* der experimentellen Untersuchungen zeigen sowohl für die zweidimensionale als auch für die dreidimensionale Darbietung der konstruktiven Elemente, dass zur Bewältigung der charakterisierten Anforderung von den meisten Vpn *nicht* die in der Vorlesung gelehrteten Wissensstrukturen genutzt werden. Vielmehr werden ausgebildete Wissensstrukturen *anforderungsabhängig* so *umstrukturiert*, dass durch Nutzung dieser kognitiven Strukturen der Lösungsprozess *vereinfacht* wird. In der Abbildung 7 sind die experimentellen Ergebnisse in Verbindung mit spezifischen Modellwerten für die bei der zweidimensionalen Darbietung der Muster untersuchte Stichprobe von 15 Vpn dargestellt.

Ein entsprechendes Ergebnis wurde auch bei Experten mit mehr als zehnjähriger Berufserfahrung gefunden (Kotkamp, 1999). Auf der Grundlage weiterer Experimente wurde der Frage nachgegangen, ob vorwiegend perzeptive oder funktionale Merkmale für die anforderungsabhängige Umstrukturierung von Wissen verantwortlich sind (vgl. Krause et al., 1994, Krause, 2000). Die dabei erzielten Ergebnisse sprechen gegen die Nutzung perzeptiv auffälliger Merkmale, die nicht funktionell begründet sind.

Durch diese Experimente mit *wissensgestütztem* Material konnte belegt werden, dass hier das Prinzip der kognitiven Ökonomie in Form der *Aufwandsreduktion* zur Nutzung kognitiver Strukturen verhaltenswirksam und einem physikalisch-technischen Prinzip übergeordnet ist, wenn dabei nicht gegen physikalische Prinzipien verstoßen wird.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der experimentellen Versuchsserien sowohl mit unbekannter als auch mit wissensgestützter Information, dass das *Prinzip der Aufwandsreduktion* bei der Bewältigung unterschiedlicher Klassen kognitiver Anforderungen *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* - vor allem 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 betrifft hier insbesondere die Frage, welche Änderungen von Prozessen im Gehirn mit Änderungen im kognitiven Aufwand einher gehen. Eine Elementaranalyse auf der Basis einer Verbindung der Verhaltensdaten mit neuropsychologischen Maßen kann zur Beantwortung der Frage beitragen (vgl. auch Krause & Sommerfeld, 2000). Die Suche nach prozessbegleitenden bzw. prozesstragenden Instanzen bildet eine Grundlage dafür, Unterschiede in der Aktivität spezifischer Hirnareale als Indikatoren für Unterschiede im kognitiven Aufwand zu ermitteln.

3.6 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 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). Mit dem Synchronisationsprinzip ist ein Mechanismus charakterisiert, durch den in der Menge aktivierter Neuronen diejenigen gekennzeichnet werden, die auf ein und dasselbe Objekt reagieren. Es konnte belegt werden, dass die beobachteten Phänomene der Synchronisation auch funktionell relevant sind. So wurde z.B. an Katzen gezeigt, dass die zeitliche Korrelation zwischen der Aktivität von Neuronen in der Sehrinde mit der Wahrnehmungsleistung korreliert. Auf der Grundlage des EEG konnten beim Menschen ähnliche Synchronisationen festgestellt werden (z.B. Singer & Gray, 1995). Der Neurowissenschaftler Eric Kandel betont in seinen Ausführungen über das menschliche Denken und die kognitiven Neurowissenschaften (vgl. z.B. Kandel, 1995, 2006), dass selbst die einfachsten kognitiven Aufgaben die Koordination mehrerer Gehirnregionen erfordern.

Wir fragen nach Unterschieden in der synchronen Aktivität von Hirnarealen bei elementaren Denkprozessen, für deren Realisierung unterschiedlich hoher kognitiver Aufwand erforderlich ist. Bei unseren Untersuchungen legen wir Probleme aus der oben beschriebenen und experimentell untersuchten Problemklasse mit unbekannter Information zu Grunde. Das bedeutet, dass kurzzeitig Information über eine geordnete Menge von Elementen im Gedächtnis behalten werden muss, während der Lösungsprozess durchgeführt wird. Eine unterschiedliche Anzahl zu behaltender Elemente führt zu einer unterschiedlich hohen Belastung des Arbeitsgedächtnisses, so dass unterschiedlich hoher Aufwand erforderlich ist, um während des Lösungsprozesses die Information im Gedächtnis zu behalten. Damit variiert der insgesamt erforderliche kognitive Aufwand zur Anforderungsbewältigung, der neben dem Behaltensaufwand auch kognitiven Aufwand zur Verarbeitung der Information und zur Steuerung der Koordination von Behalten und Verarbeitung erfordert, ebenfalls mit der Anzahl der zu behaltenden Elemente. Für diesen Problemtyp stellen wir die Frage nach einem Zusammenhang zwischen Differenzen im kognitiven Aufwand und Differenzen in der synchronen Aktivität spezifischer Hirnareale.

Ein möglicher Weg, um zur Beantwortung dieser Frage beizutragen, besteht darin, Aktivationen in aufgabenrelevanten kortikalen Subsystemen zu bestimmen und nach synchronen Aktivitäten solcher Subsysteme zu suchen.

Analysiert man dazu entsprechende Untersuchungen aus der Literatur, so zeigt sich, dass auf der Grundlage der bildgebenden Verfahren PET (Positronen-Emissions-Tomographie) und fMRI (funktionale Kernspin-Tomographie) für unterschiedliche kognitive Anforderungen bei Erhöhung des kognitiven Aufwandes für das temporäre Behalten und Verarbeiten von Information im Arbeitsgedächtnis verstärkte Aktivierungen im Frontalbereich nachgewiesen werden konnten (z.B. Posner & Raichle, 1994; D'Esposito et al., 1995; Casey et al., 1996; Frith & Dolan, 1996; Smith & Jonides, 1997; Rougier et al., 2005; Marshuetz & Smith, 2006; Jonides et al., 2007). So fanden z.B. Braver et al. (1997) einen linearen Anstieg der fMRI-Aktivität in spezifischen frontalen Hirnregionen bei wachsender Arbeitsgedächtnisbelastung. Ein analoger monotoner funktionaler Zusammenhang zeigte sich dabei auch für den linken und rechten Parietalbereich. Auch Ergebnisse von Cohen et al. (1997) sprechen dafür, dass frontale *und* posteriore – speziell parietale - Bereiche

zusammen eine Rolle beim aktiven Behalten und „Zur-Verfügung-Stellen“ von Information im Arbeitsgedächtnis spielen. Weitere Ergebnisse dazu findet man bei Smith & Jonides (1999), Logie et al. (2003), 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, die auf der Basis der EEG-Spektralanalyse berechnet werden kann (vgl. z.B. Rappelsberger & Petsche, 1988; Schack et al., 1995, 1999; Goertz, 1997). Dabei informiert die Kohärenz als das normierte Kreuzleistungsspektrum über den Grad des frequenzbezogenen Zusammenhangs zweier elektrischer Signale, die von unterschiedlichen Positionen der Schädeloberfläche (mit Hilfe dort angebrachter Elektroden) abgeleitet werden.

Literaturanalysen belegen, dass bei starker Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch kurzzeitig zu behaltende Information hohe Kohärenzen zwischen frontalen und posterioren Hirnarealen ermittelt wurden.

Dabei geht aus unterschiedlichen Untersuchungen hervor, dass für das aktive Behalten von Information dabei das *Theta-Frequenzband* (ca. 4-7,5 Hz) von besonderer Bedeutung ist (vgl. z.B. Petsche & Ettliger, 1998; Sarnthein et al., 1998; Tesche & Karhu, 2000; Simmel et al., 2001; Dörfler et al., 2001, Kopp et al., 2001, 2004; Jensen & Tesche, 2002; Busaki, 2002; Sauseng et al., 2005). Das steht in Beziehung zur Theorie von Lisman und Idiart (1995), worin die Theta-Aktivität im Hippokampus der kurzzeitigen Speicherung von Information zugeordnet wird.

Muss eine extern gegebene Information nicht nur kurzzeitig behalten werden, sondern sind - wie bei der von uns untersuchten kognitiven Anforderung - während des Behaltens zusätzliche Prozesse zur Verarbeitung der Information sowie Prozesse der Koordination von Behalten und Verarbeitung erforderlich, so sprechen Befunde aus der Literatur dafür, dass Änderungen im dafür aufgewendeten kognitiven Aufwand mit Änderungen in der Kohärenz zwischen spezifischen frontalen und parietalen Hirnarealen im *Beta-Frequenzband* (ca. 13-30 Hz) einhergehen (vgl. z.B. Petsche, 1995, 1996, 1997; Krause et al., 1997; Petsche & Ettliger, 1998). Von besonderem Interesse mit Bezug zur untersuchten Fragestellung sind dabei die Ergebnisse, die dafür sprechen, dass das *Beta1-Frequenzband* (ca. 13-20 Hz) sensitiv für Vergleichsprozesse ist (vgl. Weiss & Rappelsberger, 1996; Petsche & Ettliger, 1998; Krause et al., 1998; Sommerfeld & Krause, 1998a; Schack et al., 1999; Sommerfeld et al., 1999a,b; Krause, 2000; Sommerfeld, 2001; Simmel et al., 2001; Köhler et al., 2002).

An dieser Stelle haben 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 angeknüpft. Auf ausgewählte Experimente und dabei erzielte Resultate soll im Folgenden eingegangen werden.

3.6.1 Synchrone Aktivität von Hirnarealen als Funktion der Komplexität der Anforderung

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), die zwischen 4 und 10 variiert wurde. 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. Da die Höhe der Kohärenz eines Kanalpaars vom Abstand der dazugehörigen Elektroden abhängt (Nunez et al., 1997), wurden Verteilungen der auftretenden Kohärenzwerte analysiert und Schwellen bestimmt, die für das entsprechende Elektrodenpaar zwischen den Versuchsbedingungen relativ große Unterschiede in der Dauer der Kohärenz über dieser Schwelle signalisierten (Sommerfeld et al., 1999a; Kopp et al. 2001). Für die Kohärenz zwischen den oben genannten (nicht benachbarten) frontalen und parietalen Elektrodenpositionen (interregionale Kohärenz) ergab sich dabei eine Schwelle zwischen 0,6 und 0,7, während der Wert für benachbarte Elektrodenpositionen (lokale Kohärenz) etwa bei 0,8 lag. Damit wurde als Schwelle für die interregionale Kohärenzdauer 0,65 und für die lokale Kohärenzdauer 0,8 verwendet.

Die *Ergebnisse* für die untersuchte Stichprobe von 16 Vpn zeigen (vgl. Köhler et al., 2002; Sommerfeld, 2008), dass es bei *wachsender Anzahl der Elemente* für ganz bestimmte fronto-parietale Elektrodenpaare schwerpunktmäßig zentral und linkshemisphärisch zu einer signifikanten *Zunahme der synchronen Aktivität* (gemessen auf der Basis der EEG-Kohärenzdauer im Beta1-Frequenzband) kommt. Diese Resultate stehen in Beziehung zu den Experimenten von Dörfler et al. (2001) zum Memorieren von Elementen in einer linearen Ordnung. Dabei konnte gezeigt werden, dass es mit zunehmender Anzahl der im Gedächtnis zu behaltenden Elemente linkshemisphärisch zu einer Zunahme der fronto-parietalen Kohärenzdauer im Beta1- und im Theta-Frequenzband kommt.

Mit Bezug zur Reduktion des kognitiven Aufwandes durch Komplexitätsreduktion sprechen die erzielten Ergebnisse dafür, dass reduzierter kognitiver Aufwand zum temporären Behalten von Information (und damit reduzierter Aufwand zur Koordinierung von Behalten und Verarbeitung) durch eine verkürzte Dauer starker synchroner Aktivität spezifischer frontaler und parietaler Hirnregionen angezeigt wird. 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. Sommerfeld & Krause, 1998b; Sommerfeld et al., 1999a,b; Simmel et al., 2001; Sommerfeld, 2001, 2009).

3.6.2 Synchrone Aktivität von Hirnarealen als Funktion der Übung

Ein Ziel von Übung und Training ist es, den für einen schon funktionierenden Lösungsprozess erforderlichen kognitiven Aufwand zu verringern. Bei Problemen mit umfangreicher unbekannter Information kann eine Aufwandsreduktion durch Übung schon dadurch erreicht werden, dass die zur Lösung erforderliche Information umso besser eingepägt wird, je häufiger sie in das Arbeitsgedächtnis aufgenommen wird. Diese Annahme spielt bereits in der Theorie der Textrepräsentation von Kintsch und van Dijk (1978) und van Dijk und Kintsch (1983) eine Rolle. Somit kann ein Übungs- bzw. Trainingsprozess schrittweise dazu führen, dass immer weniger kognitiver Aufwand für das Behalten, die Verarbeitung und damit auch für die Koordination von Behalten und Verarbeitung erforderlich ist. Bereits in frühen Modellen zum Erwerb kognitiver Fertigkeiten, spielt der Aspekt des Übergangs von kontrollierter Verarbeitung zu automatisierter Verarbeitung eine entscheidende Rolle (Schneider & Shiffrin, 1977; Anderson, 1982). Im Modell von Ackerman (1987) wird angenommen, dass auf eine Stufe des Wissenserwerbs und eine Stufe der Zusammenfassung von Wissens-elementen zu übergeordneten Einheiten eine dritte Stufe („Automatisierung“) folgt, die sich qualitativ nicht von der vorhergehenden Stufe unterscheidet, jedoch durch eine erhöhte (als optimal angenommene) Verarbeitungsgeschwindigkeit mit fein

abgestimmten und automatisch ablaufenden Prozessen gekennzeichnet ist. Der Gedanke der Verringerung kontrollierter (Teil-)Prozesse zugunsten automatisierter (Teil-)Prozesse ist eine plausible Interpretation des Resultates eines Lernprozesses - im Allgemeinen gekennzeichnet durch eine geringere Lösungszeit als ohne Übung oder Training. Die Frage ist jedoch, welche Eigenschaften der mentalen Repräsentation und des Lösungsprozesses sich nach Übung bzw. Training so verändert haben, dass man von einem Übergang von einer kontrollierten zu einer - zumindest teilweise - automatisierten Verarbeitung sprechen kann.

Mit unserem Modell zum kognitiven Aufwand wird eine Aufwandsreduktion durch Übung (noch) nicht erfasst. Eine Möglichkeit, diesen Ansatz für Übungsprozesse zu erweitern, bestände darin, durch Übung verursachte Veränderungen in Rehearsal- und Prüfooperationen (z.B. Verringerung der Anzahl) modellmäßig zu berücksichtigen. Dafür liegen jedoch in der Literatur bisher keine befriedigenden Aussagen vor. Vorerst unterstellen wir (und dabei müssen wir erst einmal die Stringenz unserer Definition des kognitiven Aufwandes aufweichen), dass die mit zunehmender Übung zu messende Abnahme der Lösungszeit mit einer Reduktion des kognitiven Aufwandes einher geht, wohl wissend, dass eine übungsabhängige Reaktionszeitverkürzung verschiedene Ursachen haben kann (z.B. „Anwärmeeffekt“, Verringerung der Informationsaufnahme, Veränderung der Erwartung usw.). Bei einer Reihe einfacher Anforderungen kann man mit Hilfe von Methoden der mentalen Chronometrie sowie der unabhängigen Manipulation unterschiedlicher am Lösungsprozess beteiligter Operationen einzelne Teilprozesse aus dem Gesamtprozess isolieren (Sternberg, 1969). Damit kann der Zeitaufwand für diese Teilprozesse direkt bestimmt werden. Auf diese Weise ist es möglich, Operationen auch dann aus dem Prozess herauszulösen, wenn sie zur Lösungsfindung teilweise parallel ausgeführt werden. Unter dem Aspekt der sequentiellen bzw. koordinativen Komplexität (Mayr et al., 1996) kann weiterhin der Zeitaufwand identifiziert werden, der hinzukommt, wenn Operationen nicht einzeln sondern koordiniert miteinander auszuführen sind (vgl. z.B. Hagendorf & Sa, 1996), oder wenn zwischen mehreren Aufgaben zu wechseln ist (vgl. z.B. Rogers & Monsell, 1995; Kluwe, 1997). Bereits in etwas komplexeren und länger andauernden Lösungsprozessen, z.B. bei Ordnungsproblemen, sind solche unabhängigen Manipulationen von einzelnen Operationen erschwert. Die Zerlegung eines Prozesses in seine Bestandteile ist im Allgemeinen nicht vollständig möglich. Somit ist es in solchen Fällen allein auf der Grundlage einer Zeitverkürzung nicht entscheidbar, ob Prozesse der exekutiven Kontrolle durch Übung bzw. Training vereinfacht wurden oder ob dies z.B. auch Prozesse der Informationsaufnahme betrifft.

Die Suche nach prozessbegleitenden bzw. prozesstragenden synchronen Aktivitäten von Hirnregionen bildet eine Grundlage dafür, interne (mentale) Indikatoren für den kognitiven Aufwand zu ermitteln, der für den Lösungsprozess vor und nach Übung bzw. Training aufgewendet wird. Um jene Areale zu bestimmen, die für die Reduktion des kognitiven Aufwandes durch Übung mit verantwortlich sein könnten, messen wir - wie bei der Variation der Anzahl der zu behaltenden Elemente - die Reaktionszeit und die EEG-Kohärenzdauer als Funktionen der Übung.

Die *Ergebnisse* zeigen, dass die *synchrone Aktivität frontaler und parietaler* Hirnareale (gemessen durch die fronto-parietale Kohärenzdauer) insgesamt mit zunehmender Übung abnimmt, es jedoch (im Gegensatz zur kontinuierlichen Abnahme der Reaktionszeit) einen *zwischenzeitlichen signifikanten Anstieg* (schwerpunktmäßig rechtshemisphärisch) gibt (mittlere untere Graphik in Abb. 8). Eine solche Form wurde auch schon während des übungsabhängigen Vergleichs von Garner-Mustern gefunden (Sommerfeld & Krause, 1998a; Sommerfeld et al., 1999a).

Das zwischenzeitliche Anwachsen dieser Kohärenzdauer trotz sinkender Reaktionszeit kann unterschiedliche Ursachen haben und auf der Grundlage dieses Experimentes nicht geklärt werden. So könnte es z.B. das Vergessen relevanter Teile der Information anzeigen, was eine Reaktivierung und Aufrechterhaltung im Arbeitsgedächtnis erforderlich macht und kognitiven Aufwand erfordert. Es könnte jedoch auch sein, dass die Versuchsperson aktiv ihre Lösungsstrategie ändert und dafür

zusätzlicher Aufwand notwendig ist. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um spezifischere Information über damit verbundene Prozesse zu erhalten. So analysiert z.B. Simmel die Kombination unterschiedlicher Verhaltens- und Synchronisationsparameter. Dabei konnte sie bisher für eine Stichprobe von 12 Vpn zeigen, dass ein zwischenzeitlicher rechtshemisphärischer fronto-parietaler *Anstieg* der Dauer starker synchroner Aktivität von einem signifikanten *Abfall* der Fehleranzahl gefolgt wird (vgl. z.B. Simmel et al., 2001).

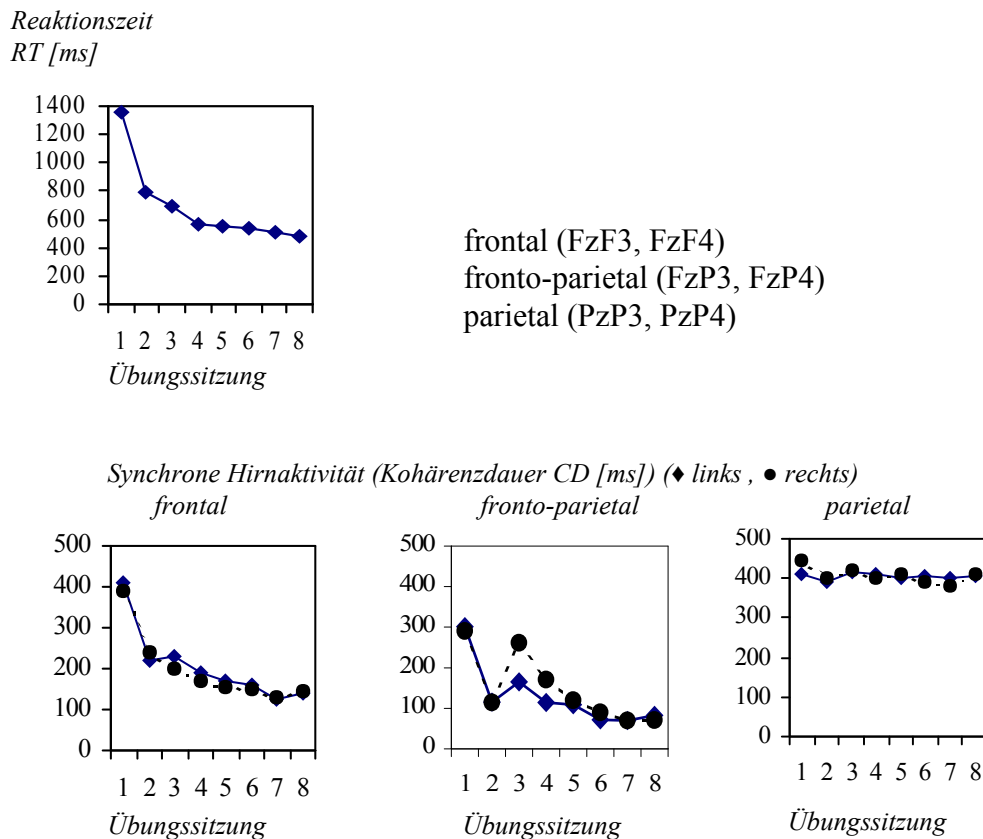


Abb. 8: Reaktionszeit RT [ms] und **synchrone Hirnaktivität** (gemessen als EEG-Kohärenzdauer CD [ms] an links- und rechtshemisphärischen frontalen, fronto-parietalen und parietalen Positionen im Beta1-Frequenzband von 13-20 Hz) als Funktionen der **Übung** (Sommerfeld, 2001)

Das kann dafür sprechen, dass kognitiver Aufwand, der aufgewendet wird, um Voraussetzungen für eine bessere Behaltens- oder Verarbeitungsstrategie zu schaffen, sich danach in einer besseren Bewältigung der kognitiven Anforderung "auszahlt".

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 8 zeigen, dass die Kohärenzdauer innerhalb des Frontalbereiches analog zur Reaktionszeit mit wachsender Übung sinkt, während die Kohärenzdauer im Parietalbereich davon unabhängig ist. Pro Zeiteinheit erhöht sich damit sogar trotz Übung die Dauer starker Synchronisation in parietalen Bereichen. Das könnte bedeuten, dass der mit zunehmender Übung teilweise automatisierte Lösungsprozess mehr und mehr in parietalen Hirnregionen stattfindet, während gleichzeitig die Exekutive von ihrer Steuerfunktion entlastet wird.

Es muss jedoch immer folgendes bedacht werden: Auch wenn Verhaltensdaten und Messwerte der Hirnaktivität ein analoges Verhalten zeigen, garantieren diese funktionalen Ähnlichkeiten nicht, dass sie die gleichen Mechanismen repräsentieren (Uttal, 2001). Einen Zugang zur Prozessanalyse bietet die Untersuchung von Mikrozuständen in Form von zeitlich stabilen Aktivationsmustern auf

der Basis der Segmentierung des EEG (eingeführt von Lehmann et al., 1987) bzw. auf EEG-Kohärenzbasis (Schack et al., 1999; Krause & Seidel, 2004; Krause, 2006). Weitere Erkenntnisse könnte die Einbeziehung der neuronalen Analyseebene bringen – analog zur Untersuchung von spezifischen Gedächtnisprozessen, wo bereits experimentell belegt wurde, wie große Neuronenpopulationen im Verband agieren, wenn das Gehirn aus Erlebnissen Gedächtnisinhalte macht (Lin et al., 2006, Tsien, 2007).

In diesem Kapitel wurde die Frage gestellt, welche Änderungen der synchronen Aktivität von Instanzen im Gehirn mit Änderungen im kognitiven Aufwand einher gehen, der für unterschiedlich komplexe Anforderungen bzw. bei unterschiedlich hohem Übungsgrad zur Anforderungsbewältigung erforderlich ist. Als ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen kann 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* aufgedeckt werden.

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

Wird mit der 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 präzisierten 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. Im Zusammenhang damit wurden experimentelle Belege dafür erbracht, dass das Prinzip der Reduktion des kognitiven Aufwandes bereichsübergreifend verhaltenswirksam 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. Damit kann ein Schritt im Sinne 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).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wird ein *theoretisch-formaler Ansatz* zur Systematisierung und exakten Beschreibung von Elementarprozessen und Ökonomieprinzipien in der menschlichen Informationsverarbeitung für eine Klasse von Anforderungen vorgestellt. Dabei werden die im Ansatz enthaltenen Strukturen speziell als informationelle Strukturen angenommen. Ihnen können extern Texte oder Bilder und intern kognitive Strukturen zugeordnet werden. Zur exakten Beschreibung der Elementarprozesse bei der Ausbildung und Veränderung der kognitiven Strukturen wurde die Graphentheorie verwendet, da sie eine Reihe von formalen Beschreibungsmitteln für Operationen über Strukturen zur Verfügung stellt. Mit dem Ansatz wird eine Systematisierung und Präzisierung von Parametern der menschlichen Informationsverarbeitung erzielt. Neuronale Netze werden damit nicht beschrieben. Prozesse, in denen Zufallsgrößen eine dominierende Rolle spielen, sowie Prozesse mit kontinuierlich variierenden Größen sind mit dem Ansatz nicht formal erfassbar.

Basierend auf diesem Ansatz wurde für psychologisch relevante kognitive Prozesse der *experimentelle Nachweis* erbracht. Das betrifft Prozesse der Selektion, Inferenz, Integration und hierarchischen Strukturierung von Information. Sowohl die effiziente Strukturierung neuer Information als auch die anforderungsabhängige Umstrukturierung von Wissen konnten nach dem Prinzip der Reduktion des kognitiven Aufwandes experimentell belegt werden. Um einen Schritt zur Verringerung der Lücke zwischen elementaren und komplexen Problemlösungen zu tun, ist untersucht worden, ob die *Fähigkeit zur Reduktion des kognitiven Aufwandes* bei der Bewältigung elementarer Probleme in Beziehung zur Fähigkeit der Aufwandsreduktion bei der Lösung komplexerer Probleme steht. Dabei konnten experimentelle Belege dafür erbracht werden, dass die Fähigkeit zur Aufwandsreduktion ein bereichsübergreifendes, personenspezifisches Prinzip im Denken ist.

Weiterhin wurde die Frage gestellt, welche Änderungen der *synchronen Aktivität von Instanzen im Gehirn* mit Änderungen im *kognitiven Aufwand* einher gehen. Dazu wurde die synchrone Aktivität von Hirnarealen (gemessen auf der Basis der EEG-Kohärenz) in Abhängigkeit von der Komplexität der Anforderung und von der Übung untersucht. Mit Bezug dazu konnten in den Experimenten Differenzen in der synchronen Aktivität spezifischer Hirnareale als Indikatoren von Differenzen im kognitiven Aufwand und von der Übung aufgedeckt werden.

Unter der Voraussetzung, dass die Grenzen beachtet werden, in denen die theoretischen und experimentellen Untersuchungen und Resultate gelten, wird mit der *interdisziplinär* in Wechselbeziehung zwischen Psychologie, Mathematik und Neurowissenschaft durchgeführten Elementaranalyse ein systematischer Zugang zur Aufklärung von Basisprozessen bei der menschlichen Informationsverarbeitung aufgezeigt. Mit dem entwickelten Ansatz können psychologisch relevante Prozesse und Steuerparameter bei der Ausbildung, Transformation und anforderungsabhängigen Nutzung mentaler Repräsentationen adäquat beschrieben werden. Es ist experimentell belegt worden, dass solche mentalen Parameter genutzt werden können, um intelligente von weniger intelligenten Leistungen zu unterscheiden. Die durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen und die dabei gewonnenen Resultate eröffnen damit neue Möglichkeiten für die Diagnostik geistiger Leistungen. Das Augenmerk der *weiteren Untersuchungen* ist auf Beziehungen zwischen Modellen der Informationsverarbeitung und Modellen zu Oszillationen im Gehirn gerichtet, sowie auf eine Kombination solcher Modelle mit den experimentellen Variationen und Resultaten.

6. Literatur

- Ackerman, P.L. (1987) Individual differences in skill learning: An integration of psychometric and information processing perspectives. *Psychological Bulletin*, 102, 3-27.
- Anderson, J.R. (1982) *Acquisition of Cognitive Skills*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J.R. (1983) *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J.R. (2001) *Kognitive Psychologie*. Heidelberg: Spektrum.
- Anderson, J.R. (2004) An integrated theory of the mind. *Psychological Review* 111, 1036-1060.
- Attneave, F. (1959) *Applications of Information Theory in Psychology*. New York: Holt and Company.
- Baddely, A.D. (2003) Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience* 4, 829-839.
- Baddely, A.D. & Hitch, G. (1974) Working memory. In: Bower, G.A. (Ed.) *Recent Advances in Learning and Motivation*, vol. 8. New York: Academic Press, 47-90.
- Banks, W.P. (1977) Encoding and processing of symbolic information in comparative judgements. In: Bower, G.H. (Ed.) *The Psychology of Learning and Motivation*, vol. 11. New York: Academic Press, 101-106.
- Barch, D.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Forman, S.D., Noll, D.C. & Cohen, J.D. (1997) Dissociating working memory from task difficulty in human prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, 35 (10), 1373-1380.
- Bower, G.H. (1970) Analysis of mnemonic device. *American Scientist* 58, 496-510.
- 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.
- Buffart, H. & Leeuwenberg, E. (1983) Structural Information Theory. In: Geißler, H.-G., Buffart, H., Leeuwenberg, E. & Sarris, V. (Eds.) *Modern Issues in Perception*. Berlin, Amsterdam: DVW, North Holland.
- Busaki, G. (2002) Theta oscillations in the hippocampus. *Neuron*, 33, 325-340.
- Casey, B.J., Cohen, J.D., Trainor, R.J., Nah, G.E., Nystrom, L.E., Orendi, J.L., Schubert, A.B. & Noll, D.C. (1996) A functional MRI study of hierarchical cortical activation as a function of task complexity. *NeuroImage*, 3, 536.
- Champos, A.S. & Petrides, M. (2007) Dissociable roles of the posterior parietal and the prefrontal cortex in manipulation and monitoring processes. *PNAS*, 104, 14837-14842.
- Cohen, J.D., Perlstein, W.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Noll, D.C., Jonides, J. & Smith, E.E. (1997) Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386, 604-608.
- D'Esposito, M., Detre, J.A., Alsop, D.C., Shin, R.K., Atlas, S. & Grossman, M. (1995) The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, 378, 279-281.
- Dijk, T.A. van & Kintsch, W. (1983) *Strategies of Discourse Comprehension*. New York: Academic Press.
- Dörfler, T., Simmel, A., Schleif, F.-M. & Sommerfeld, E. (2001) Complexity-dependent synchronization of brain subsystems during memorization. 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, 343-348.
- Dörner, D. (Hrsg.) (1976) *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Dörner, D. (2004) Das Markierungsproblem oder wie können begriffliche Relationen subsymbolisch realisiert werden? 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, 169-188.
- 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.
- 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.
- Engelkamp, J. (1991) *Das menschliche Gedächtnis*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Engelkamp, J. & Zimmer, H.D (2006) *Lehrbuch der kognitiven Psychologie*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Feger, H. (1972) *Skalierte Informationsmenge und Eindrucksurteil*. Bern: Huber.
- Frith, Ch. & Dolan, R. (1996) The role of the prefrontal cortex in higher cognitive functions. *Cognitive Brain Research*, 5, 175-181.
- Goertz, R. (1997) *Ereigniskorrelierte Kohärenz im EEG als Methode zur Untersuchung transientser funktionaler Kopplung*. Berlin: Logos-Verlag.
- Goodwin, G.P. & Johnson-Laird, P.N. (2005) Reasoning about relations. *Psychological Review*, 112, 468-493.
- Green, B. (2004) *Der Stoff, aus dem der Kosmos ist*. München: Siedler-Verlag.
- Groner, R. (1978) *Hypothesen im Denkprozess*. Bern: Huber.
- Halford, G.S., Wilson, W.H. & Phillips, S. (1998) Processing capacity defined by relational complexity: implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 803-864.
- Hacker, W. (1983) Ziele – eine vergessene psychologische Schlüsselvariable? Zur antriebsregulatorischen Potenz von Tätigkeitsinhalten. *Psychologie für die Praxis*, 2, 5-26.
- Hacker, W. (1986) *Arbeitspsychologie*. Bern: Huber.

- Hacker, W. (1992) *Expertenkönnen. Erkennen und Vermitteln*. Stuttgart: Verlag für Angewandte Psychologie.
- Hagendorf, H. & Sa, B. (1996) Coordination processes of mental transformations of patterns: Practice and transfer effects. *European Journal of Cognitive Psychology*, 8, 295-317.
- Harary, F. (1969) *Graph Theory*. Reading, MA: Addison-Wesley. New edition (1994): Perseus Books.
- Hörz, H. (1998) Mathematische Ordnung der Wirklichkeit – Philosophische Reflexionen zur Weltansicht von Helmholtz und Heisenberg. In: Mainzer, K., Müller, A. & Saltzer, W.G. (Eds.) *From Simplicity to Complexity. Part II: Information, Interaction, Emergence*. Braunschweig, Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn, 171-188.
- Hörz, H. (2007) *Wahrheit, Glaube und Hoffnung. Philosophie als Brücke zwischen Wissenschaft und Weltanschauung*. Berlin: trafo verlag, 45-51; 88-99.
- Hörz, H. & Schimming, R. (2009) Die unglaubliche Effektivität der Mathematik in den Wissenschaften. In: Banse, G., Küttler, W. März, R. (Hrsg.) *Die Mathematik im System der Wissenschaften. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 24*. Berlin: trafo verlag (im Druck).
- Jacobs, A.M. & Levy-Schoen, A. (1988) Breaking down saccade latency into central and peripheral processing times in a visual dual task. In: Luer, G., Laß, U. & Shallo-Hoffmann, J. (Eds.) *Eye Movement Research*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Jensen, O. & Tesche, C.D. (2002) Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European Journal of Neuroscience*, 15, 1395-1399.
- Johannsen, C. (1971) *Leibniz*. Berlin: Union Verlag.
- Johnson-Laird, P.N. (1983) *Mental Models: Toward a Cognitive Science of Language*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Jonides, J., Smith, E.E., Hartley, A., Miller, A. & Marshuetz, C. (2007) Neuroimaging analyses of human working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 2035-2049.
- Kandel, E.R. (1995) Gehirn und Verhalten. In: Kandel, E.R., Schwartz, J.H. & Jessell, Th.M. (Hrsg.) *Neurowissenschaften*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum, 5-19.
- Kandel, E.R. (2006) *Auf der Suche nach dem Gedächtnis*. München: Siedler Verlag.
- Kintsch, W. (1988) The role of knowledge in discourse comprehension: A construction integration model. *Psychological Review*, 95, 163-182.
- Kintsch, W. & van Dijk, T.A. (1978) Towards a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85, 363-394.
- Klix, F. (1971) *Information und Verhalten*. Berlin: DVW.
- Klix, F. (1980) Informationsbegriff und Informationstheorie in der Psychologie. Methodologische Betrachtungen über Grenzen und Möglichkeiten. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 4, 405-419.
- Klix, F. (1983) Begabungsforschung – ein neuer Weg in der kognitiven Intelligenzdiagnostik. *Zeitschrift für Psychologie*, 191, 360-387.
- Klix, F. (1988) Gedächtnis und Wissen. In: Mandl, H. Spada, H. (Hrsg.) *Wissenspsychologie*. München: Psychologie Verlags Union.
- Klix, F. (1990) Wissensrepräsentation und geistige Leistungsfähigkeit im Lichte neuer Forschungsergebnisse der kognitiven Psychologie. *Zeitschrift für Psychologie*, 198, 165-187.
- 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, Bd. 12*. Berlin: trafo verlag, 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.
- Klix, F. & Rautenstrauch-Goede, K. (1968) Struktur- und Komponentenanalyse von Problemlösungsprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, 174, 167-193.
- Kluwe, R.H. (1997) Intentionale Steuerung kognitiver Aktivität. *Kognitionswissenschaft*, 6, 53-69.
- 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.
- Kopp, F., Schröger, E., & Lipka, S. (2001) Rehearsal processes in working memory and synchronization of brain areas. 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, 468-473.
- Kopp, F., Schröger, E., & Lipka, S. (2004) Neural networks engaged in short term memory rehearsal are disrupted by irrelevant speech in human subjects. *Neuroscience Letters*, 354, 42-45.
- Kosslyn, S.M. (1975) Information representation in visual images. *Cognitive Psychology*, 7, 341-370.

- Kotkamp, U. (1998) Steuer- und Bewertungskriterien von Denkprozessen. In: Kotkamp, U. & Krause, W. (Hrsg.) *Intelligente Informationsverarbeitung*. Wiesbaden: Universitätsverlag, 85-92.
- Kotkamp, U. (1999) *Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen*. Lengerich: Pabst.
- Krause, B. (2004a) Schwierigkeiten beim logischen Denken. 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, 83-98.
- Krause, B. (2004b) Nutzung formaler Modelle in der Psychologie – als Mathematiker in der psychologischen Forschung. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät*, 68, 79-95.
- Krause, W. (1970) Untersuchungen zur Komponentenanalyse in einfachen Problemlöseprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, 177, 199-249.
- Krause, W. (1982) Eye fixation and three-term series problems, or: Is there evidence for task-independent information units. In: Groner, R. & Fraisse, P. (Eds.) *Cognition and Eye Movements*. Berlin: DVW, 122-138.
- Krause, W. (1985) Komponentenanalyse des Symbol-Distanz-Effektes mit Hilfe von Augenbewegungsmessungen. *Zeitschrift für Psychologie*, 3, 259-272.
- Krause, W. (1991a) Ordnungsbildung im Denken und kognitiver Aufwand. *Zeitschrift für Psychologie, Suppl.11*, 404-421.
- Krause, W. (1991b) Klassenbildung und Inferenz? Zur Messung geistiger Leistungen: eine alte Idee und ein neuer Ansatz. In: Krause, W., Sommerfeld, E. & Ziebler, M. (Hrsg.) *Inferenz- und Interpretationsprozesse*. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 105-126.
- 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. (2006) Außergewöhnliche menschliche Informationsverarbeitung: Extremgruppenvergleiche. *Leibniz Online 2 (2006)*, www.leibniz-sozietat.de/journal.
- Krause, W., Gibbons, H. & Schack, B. (1998) Concept activation and coordination of activation procedure require two different networks. *NeuroReport* 9, 1649-1653.
- Krause, W., Müller, J., Sommerfeld, E. & Franz, S. (1994) Umstrukturierung von Wissen beim Konstruieren. In: Pahl, G. (Hrsg.) *Psychologische und pädagogische Fragen beim Konstruieren*. Köln: TÜV Rheinland. 51-54.
- 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. & 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, Bd. 12*. Berlin: trafo verlag, 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., Seifert, R. & Sommerfeld, E. (1987) Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen im Problemlösen. *ZKI-Informationen 2/87*. Berlin: AdW der DDR.
- Krause, W. & Sommerfeld, E. (2000) Elementaranalyse von Denkprozessen mit psychophysikalischen und neurowissenschaftlichen Methoden. *Zeitschrift für Psychologie*. 208 (3-4), 322-339.
- 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.
- Lisman, J.E. & Idiart, M.A. (1995) Short-Term Memories in Oscillatory Subcycles. *Science*, 267, 1512-1515.
- Lehmann, D., Ozaki, H. & Pal, J. (1987) EEG alpha map series: brain micro states by space oriented adaptive segmentation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 67, 271-288.
- Leth-Steensen, C. & Marley, A.A.J. (2000) A model of response time effects in symbolic comparison. *Psychological Review*, 107, 62-100.
- Lin, L., Osan, R. & Tsien, J.Z. (2006) Organizing principles of real-time memory encoding: neural clique assemblies and universal neural codes. *Trends in Neuroscience*, 29 (1), 48-57.
- Logie, R.H., Venneri, A., Della Salla, S., Redpath, D.W. & Marshall, I. (2003) Brain activation and phonological loop: The impact of rehearsal. *Brain and Cognition*, 53, 293-296.
- Lompscher, J. (1972) *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung geistiger Fähigkeiten*. Berlin: DVW.
- MacKay, D.M. (1950) Quantal aspects of scientific information. *Philosophical Magazine* 41, 289-311.
- 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.
- Marshuetz, C. & Smith, E.E. (2006) Working memory for order information: Multiple cognitive and neural mechanisms. *Neuroscience*, 139, 195-200.
- Mayr, U. & Kliegl, R. (1993) Sequential and coordinative complexity: age based processing limitations in figural transformations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 19 (6), 1297-1320.
- Mayr, U., Kliegl, R. & Krampe, R.T. (1996) Sequential and coordinative processing dynamics in figural transformations across the life span. *Cognition*, 59, 61-90.
- Mehlhorn, H.G. & Mehlhorn, G. (1985) Zur intuitiven Komponente schöpferischer Leistungsprozesse. In: Müller, J. (Hrsg.) *Probleme schöpferischer Ingenieursarbeit*. Karl-Marx-Stadt: Technische Hochschule, 70-94.
- Meischner-Metge, A. (2004) *Gustav Theodor Fechner. Tagebücher 1828 bis 1879*. Leipzig: Verlag der Sächsischen Akademie der Wissenschaften. In Kommission bei Franz Steiner Verlag Stuttgart.
- Mittenecker, E. & Raab, E. (1973) *Informationstheorie für Psychologen*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.
- Miyake, A. & Shah (1999) *Models of Working Memory: Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nenniger, P. (1980) Anwendungsmöglichkeiten der Graphentheorie in der Erziehungswissenschaft. *Zeitschrift für empirische Pädagogik*, 4, 85-106.
- Newell, A. & Simon, H.A. (1972) *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Nunez, P.L., Srinivasan, R., Wijesinghe, R.S., Westdorp, A.F., Tucker, D.M., Silberstein, R.B. & Cadusch, P.J. (1997) EEG Coherency I: Statistics, Reference Electrode, Volume Conduction, Laplacians, Cortical Imaging, and Interpretation at Multiple Scales. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 103, 499-515.
- Paivio, A. (1986) *Mental representation. A dual Approach*. New York: Oxford University Press.
- Petrusic, W.M. (2001) Contextual effects and associative processes in comparative judgements with perceptual and symbolic stimuli. 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, 75-80.
- Petrusic, W.M., Harrison, D.H. & Baranski, J.V. (2004) Long term memory for elementary visual percepts: Memory psychophysics of context and acquisition effects. *Perception and psychophysics*, 66, 430-445.
- Petsche, H. (1995) Die flirrende Welt der Aufmerksamkeit: Zur Neurophysiologie kognitiver Prozesse. *Zeitschrift EEG – MEG*, 26, 1-18.
- Petsche, H. (1996) Approaches to verbal, visual and musical creativity by EEG coherence analysis. *International Journal of Psychophysiology*, 24, 145-160.
- Petsche, H. (1997) Der Beitrag des Spontan-EEG zum Verständnis kognitiver Funktionen. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 9, 327-341.
- 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.
- Posner, M.I. (1976) *Kognitive Psychologie*. München: Juventa.
- Posner, M.I. & Raichle, M.E. (1994) *Bilder des Geistes*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum.
- Potts, G. R. (1975) Bringing order to cognitive structures. In: Restle, F., Shiffrin, R. M., Castellan, N. J., Lindman, H. R. & Pisoni, D. B. (Eds.) *Cognitive Theory, vol. 1*. New York: Wiley, 247-270.
- Rappelsberger, P. & Petsche, H. (1988) Probability mapping: power and coherence analyses of cognitive processes. *Brain Topography 1*, 46-54.
- Restle, F. (1970) Theory of serial pattern learning: Structural trees. *Psychological Review*, 77, 481-495.
- Rogers, R.D. & Monsell, S. (1995) Costs of predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 74, 207-231.
- Rougier, N.P., Noelle, D.C., Braver, T.S., Cohen, J.D. & O'Reilly, R.C. (2005) Prefrontal cortex and flexible cognitive control: Rules without symbols. *PNAS*, 102, 7338-7343.
- Sachs, H. (1970) *Einführung in die Theorie der endlichen Graphen*. Leipzig: Teubner.
- Sanders, A.F. (1971) *Psychologie der Informationsverarbeitung*. Bern: Huber.
- Sarnthein, J., Petsche, H., Rappelsberger, P., Shaw, G.L. & von Stein, A. (1998) Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 95, 7092-7096.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Schabus, M. & Doppelmayr, M. (2005) Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *International Journal of Psychophysiology*, 57, 97-103.
- Schack, B., Grieszbach, G., Arnold, M. & Bolten, J. (1995) Dynamic cross-spectral analysis of biological signals by means of bivariate ARMA processes with time-dependent coefficients. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 33, 605-610.

- 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.
- Scheerer, E. (1993) Mentale Repräsentation in interdisziplinärer Perspektive. *Zeitschrift für Psychologie*, 201, 136-166.
- Schefe, P. (1986) *Künstliche Intelligenz – Überblick und Grundlagen*. Mannheim: B.I. Wissenschaftsverlag.
- Schneider, W. & Shiffrin, R.M. (1977) Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review* 84, 1-66.
- Schnotz, W. (1994) *Aufbau von Wissensstrukturen*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Schnotz, W. & Lowe, R. (2003) External and internal representations in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 13, 117-123.
- Selz, O. (1913) *Über die Gesetze des geordneten Denkverlaufs*. Stuttgart: Speman.
- Shannon, C.E. & Weaver, W. (1949) *Mathematische Grundlagen der Informationstheorie*. München, Wien: Oldenbourg Verlag.
- Shimizu, H. (1989) A dynamical approach to semantic communication – the significance of biological complexity in the creation of semantic information. In: Shimizu, H. (Ed.) *Biological complexity and information*. Fuji-Suom: World Scientific, 145ff.
- 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.
- Simon, H.A. & Kotowski (1963) Human acquisition of concepts for sequential patterns. *Psychological Review*, 70.
- Singer, W. & Gray, C.M. (1995) Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 555-586.
- Smith, E. & Jonides, J. (1997) Working memory: A view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33, 5-42.
- Smith, E. & Jonides, J. (1999) Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283, 1657-1661.
- Sommerfeld, E. (1990) Systematization and formalization of cognitive structure transformations on the basis of graph transformations. In: Brzezinski, M. & Marek, T. (Eds.) *Action and Performance: Models and Tests. Contributions to the Quantitative Psychology and its Methodology*. Amsterdam, Atlanta, GA: Rodopi, 105-120.
- Sommerfeld, E. (1991) Inferenzprozesse und kognitiver Aufwand - eine formale Analyse. In: Krause, W., Sommerfeld, E. & Zießler, M. (Hrsg.) *Inferenz- und Interpretationsprozesse*. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 127-172.
- Sommerfeld, E. (1994a) *Kognitive Strukturen*. Münster, New York: Waxmann.
- Sommerfeld, E. (1994b) Mentale Repräsentationen – mathematische Modellierung ihrer Ausbildung und Transformation. *Zeitschrift für Psychologie*, 202, 233-251.
- 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? *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin*, 101, (im Druck).
- Sommerfeld, E., Hensel, A. & Hildebrandt, A. (1999b) Cooperation of frontal and parietal brain areas as function of cognitive training. In: Killeen, P.R. & Uttal, W.R. (Eds.) *Fechner Day 99. The End of 20th Century Psychophysics*. Tempe, AZ, USA: The International Society for Psychophysics, 356-361.
- Sommerfeld, E. & Krause, W. (1998a) The effect of practice in a working memory task on synchronization of specific brain areas. In: Grondin, S. & Lacouture, I. (Eds.) *Fechner Day 98*. Quebec, Canada: The International Society for Psychophysics, 355-360.
- Sommerfeld, E. & Krause, W. (1998b) Kontrollprozesse im Arbeitsgedächtnis vor und nach Übung. In: Kotkamp, U. & Krause, W. (Hrsg.) *Intelligente Informationsverarbeitung*. Wiesbaden: Universitätsverlag, 101-110.
- Sommerfeld, E., Krause, W., Schack, B., Markert, C., Pies, R. & Tietze, H. (1999a) 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. (1986) Graph theoretical models for transformation and comparison of cognitive structures. In: Klix, F. & Hagendorf, H. (Eds.) *Human Memory and Cognitive Capabilities. Mechanisms and Performances*. Amsterdam: North Holland, 1017-1024.
- Sommerfeld, E. & Sobik, F. (1994) Operations on cognitive structures – their modelling on the basis of graph theory. In: Albert, D. (Ed.) *Knowledge Structures*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 146-190.
- Sprung, H. unter Mitarbeit von Sprung, L. (2006) *Carl Stumpf – Eine Biographie. Von der Philosophie zur experimentellen Psychologie*. München, Wien: Profil Verlag.

- Sprung, L. (2004) Merkmale und Phasen der Wissenschaftsentwicklung im 19. und 20. Jahrhundert – dargestellt am Beispiel der Geschichte der Psychologie. 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, 59-73.
- Sternberg, S. (1969) The discovery of processing stages: Extensions of donder's method. *Acta Psychologica*, 30, 276-315.
- Sydow, H. (1970) Zur metrischen Erfassung von subjektiven Problemzuständen und zu deren Veränderung im Denkprozess. I. *Zeitschrift für Psychologie*, 177, 145-198.
- Sydow, H. (1970) Zur metrischen Erfassung von subjektiven Problemzuständen und zu deren Veränderung im Denkprozess. II. *Zeitschrift für Psychologie*, 178, 1-50.
- Sydow, H. (1980) Mathematische Modellierung der Strukturrepräsentation und der Strukturerkennung in Denkprozessen. *Zeitschrift für Psychologie*, 2, 166-197.
- Sydow, H. & Petzold, P. (1981) *Mathematische Psychologie*. Berlin: DVW.
- Tesche, C.D. & Karhu, J. (2000) Theta oscillations index human hippocampal activation during a working memory task. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 97, 919-924.
- Tsien, J.Z. (2007) Der Gedächtniskode. *Spektrum der Wissenschaft*, 10/07, 47-53.
- Uttal, W.R. (2001) *The new phrenology: the limits of localizing cognitive processes in the brain*. Cambridge, MA, London: The MIT Press.
- Weisberg, R.W. (1989) *Kreativität und Begabung: Was wir mit Mozart, Einstein und Picasso gemeinsam haben*. Heidelberg: Spektrum.
- 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.

Adresse der Verfasserin:

Prof. Dr. Erdmute Sommerfeld, Chausseestr. 175, 15712 Königs Wusterhausen

e-mail: Erdmute.Sommerfeld@t-online.de