Leibniz Online 2013
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V.
ISSN 1863-3285
http://www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2013/11/sommerfeld_krause 2.pdf

Erdmute Sommerfeld und Werner Krause

„Objektiv, aber speziell“: Psychologie als Naturwissenschaft*

In der Sitzung der Klasse Sozial- und Geisteswissenschaften im Oktober vergangenen Jahres hielt Helga Sprung einen Vortrag zum Thema „Einheit in der Vielfalt. Zur Entwicklung der Psychologie im Spannungsfeld zwischen Natur- und Geisteswissenschaften“. Sie stellte darin einen repräsentativen Ausschnitt aus dem 2010 erschienenen Buch von Lothar und Helga Sprung zur Geschichte der Psychologie und ihrer Methoden vor (Sprung & Sprung, 2010).

An diesen Vortrag knüpfen wir heute an. Wir möchten an ausgewählten Paradigmen zeigen, wie man auf der Basis naturwissenschaftlicher Methoden und mit Hilfe der Mathematik Prinzipien des Denkens untersuchen kann und welche Ergebnisse dabei erzielt wurden. In diesem Zusammenhang werden Fortschritte und Grenzen der Psychologie als Naturwissenschaft aufgezeigt. Den Ausgangspunkt dafür bilden theoretische Ansätze, die bereits in der griechischen Naturphilosophie entwickelt wurden.

1. Von der griechischen Naturphilosophie zur heutigen Psychologie

Eine besonders wichtige Phase für die Entwicklung der Psychologie begann mit den Anfängen der griechischen Naturphilosophie um 600 v.u.Z. In dieser Zeit wurden Theorien und Hypothesen entwickelt, die heute noch für die Psychologie von grundlegender Bedeutung sind. Sie konnten jedoch mit den damaligen Methoden nicht empirisch überprüft werden.

Für diesen Vortrag haben wir drei theoretische Ansätze aus der griechischen Naturphilosophie ausgewählt, die sich auf Grundprinzipien des Denkens beziehen. Das betrifft die Schwerpunkte „Formale Logik und Schlussprozesse“, „Kategorienbildung“ und „Einheitenbildung“.

1.1 Formale Logik und Schlussprozesse

Grundbegriffe der Logik entstanden bereits mit den philosophisch-mathematischen Problemen in der Schule der Pythagoreer (Pythagoras: um 580-500 v.u.Z.) und im Folgenden bei Sokrates (469-399 v.u.Z.) und Platon (427-347 v.u.Z.) (www.textlog.de/6179.html: „Die Begründung der formalen Logik“).

Aristoteles (384-322 v.u.Z.) gilt als Begründer der formalen Logik. Neben seinem Buch „Über die Seele“ erarbeitete er Schriften zur Logik mit Beiträgen zur Psychologie des Denkens („Kategorienlehre“, „Urteilslehre“, „Beweislehre“, „Schlußlehre“, „Induktionslehre“).

Erst über 2000 Jahre später, im Zeitalter der Aufklärung, gab Kant die erkenntnistheoretische Begründung dafür, dass die Philosophie-Psychologie auf der bis dahin praktizierten (methodologischen und) methodischen Basis nicht als Wissenschaft entwickelt werden konnte (vgl. Ausführungen dazu in Sprung & Sprung, 2010). Kant stellte die Frage

* Überarbeitete Fassung des Vortrags in der Klasse für Sozial- und Geisteswissenschaften am 11. April 2013.

danach, wie der Mensch überhaupt zu Begriffen, Aussagen und Schlüssen kommen kann (www.de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Logik_#Antike_Logik). Damit war (von philosophischer Seite aus) der Weg eröffnet für einen grundlegenden Paradigmenwechsel in der Psychologie. In Sprung & Sprung (2010) wird die weitere Entwicklung folgendermaßen charakterisiert: „Das war wesentlich dafür, dass sich die moderne Psychologie – auf naturwissenschaftlicher Grundlage aufbauend – als experimentelle Psychologie entwickelte… Einige Jahrzehnte nach Kants Tod begann mit der Untersuchung sehr einfacher psychischer Phänomene der Weg, der zur Experimentalpsychologie führte. Diese Aufgabe wurde vor allem durch experimentelle Nachbarwissenschaftler geleistet, die an psychologischen Problemen interessiert waren, die in ihren experimentellen Arbeitsbereichen auftraten. Es waren dies vor allem psychologische Fragestellungen der experimentellen Physiker und der experimentellen Physiologen von der Mitte des 19. Jahrhunderts an. … Erst vom Ende des 19. Jahrhunderts an wurden Paradigmen entwickelt, die es ermöglichten, auch höhere psychische Strukturen und Prozesse systematisch, kontrolliert und wiederholbar zu untersuchen.“

In Abb. 1 sind dazu Etappen von der griechischen Naturphilosophie zur heutigen Psychologie skizziert.

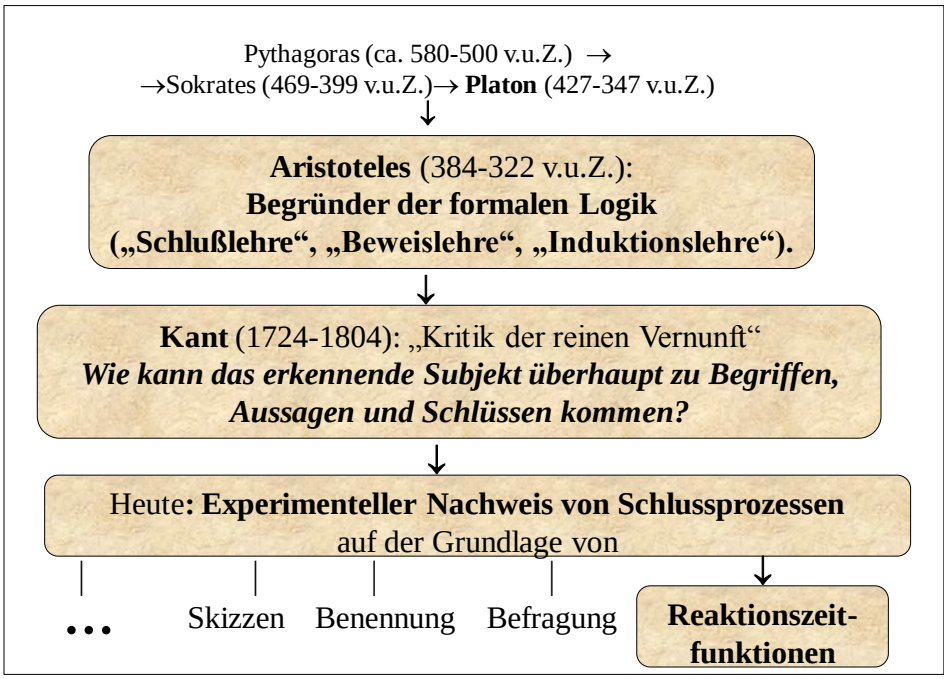


Abb. 1: Formale Logik und Schlussprozesse - von der griechischen Naturphilosophie zur heutigen Psychologie

Wir werden im Rahmen dieses Vortrags auf den experimentellen Nachweis von Schlussprozessen in der menschlichen Informationsverarbeitung auf der Grundlage von Reaktionszeit-Funktionen eingehen und prüfen, inwieweit die formale Logik der damaligen Zeit heute noch Schlussprozesse ausreichend erklärt.

1.2 Kategorienbildung

Bezugspunkt ist die Schrift zur „Kategorienlehre“ von Aristoteles (vgl. Abb. 2).
Gedanken daraus waren dann auch im 9. Jahrhundert Ausgangspunkt im Universalienstreit (9.-12. Jahrhundert) (ausführlich in Sprung & Sprung, 2010). Dabei war insbesondere der

Konzeptualismus für die Frage nach der Kategorienbildung im menschlichen Denken von Bedeutung.

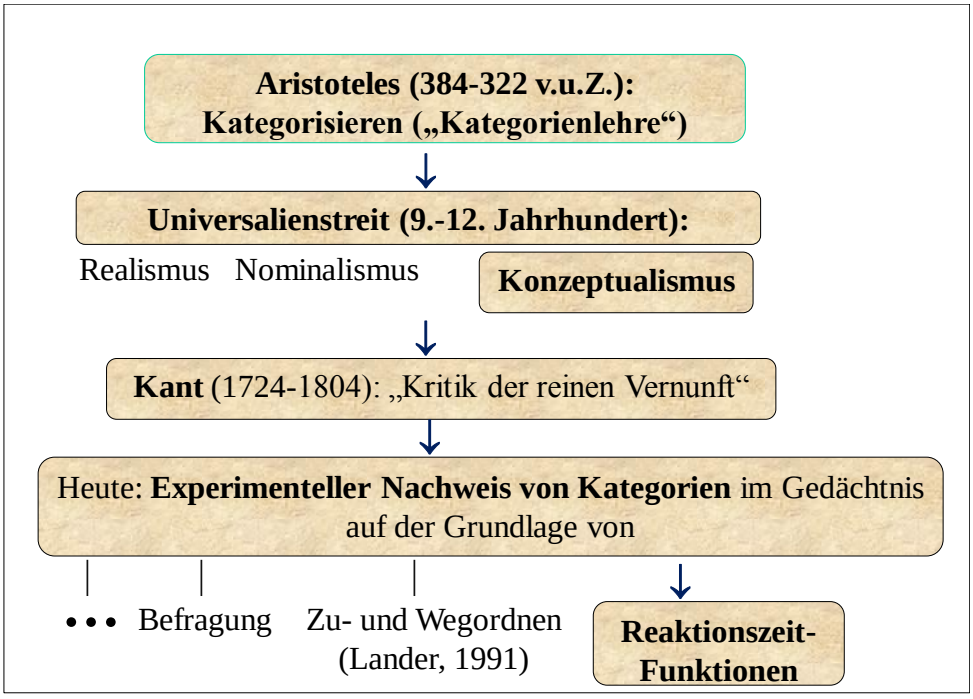


Abb. 2: Kategorienbildung - von der griechischen Naturphilosophie zur heutigen Psychologie

Wir werden im Rahmen dieses Vortrags auf den experimentellen Nachweis der Kategorienbildung in der menschlichen Informationsverarbeitung auf der Grundlage von Reaktionszeit-Funktionen eingehen.

1.3 Einheitenbildung

Die Erklärungen und Theorien der vorherrschenden Wissenschaften waren bestimmend für die Theorien der Psychologie.

Beispiele dafür sind die atomistischen Erklärungsvorstellungen, die in Analogie zur Physik auch in der Psychologie entwickelt wurden, insbesondere von Leukipp (um 450 v.u.Z.) und Demokrit (460-371 v.u.Z.) (vgl. Sprung & Sprung, 2010).

Demokrits atomistische Erklärungsvorstellungen betrafen sowohl physikalische Atome als auch Seelenatome (vgl. Abb. 3). „Demokrits Seelenatome bilden das materielle Substrat jener Wechselbeziehungen, die das Gehirn mit dem Körper und der Außenwelt unterhält, die Nervenaktivität“ (www.vonwolkenstein.de/Datenbank/doku.php?id=Demokrit).

Leibniz (1646-1716) sah Monaden als elementare (dynamische) Einheiten der Natur und des Geistes an (vgl. auch Sprung & Sprung, 2010 sowie Lassner, 1999).

Wir werden im Rahmen dieses Vortrags auf den experimentellen Nachweis der Einheitenbildung in der menschlichen Informationsverarbeitung auf der Grundlage von Messungen des Elektroenzephalogramms (EEG) eingehen.

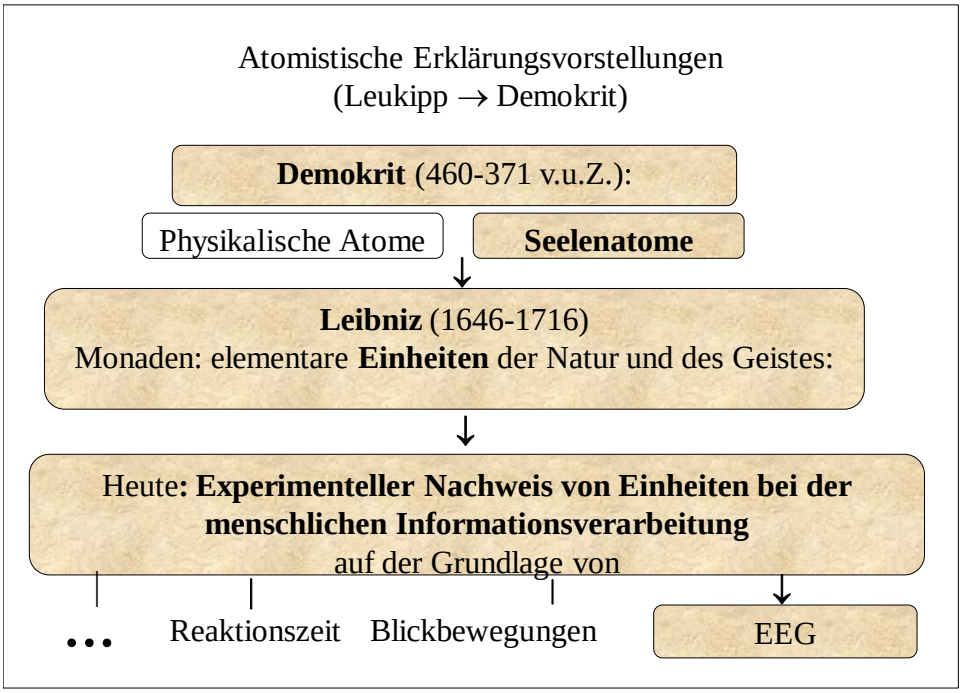


Abb. 3: Einheitenbildung - von der griechischen Naturphilosophie zur heutigen Psychologie

Zur *internen (mentalen) Repräsentation und Verarbeitung von Information* führt der Mensch *Schlussprozesse* durch, bildet *Kategorien*, nutzt *Einheiten*.

Wir fragen nun danach, wie man Schlussprozesse, Kategorienbildung und Einheitenbildung *experimentell* untersuchen kann.

Mit Bezug zum Titel unseres Vortrags möchten wir dazu folgendes betonen: Ein Experiment ist methodisch streng kontrolliert. Somit besteht der *Vorteil* einer solchen Untersuchungsmethode darin, dass man damit objektive (d.h. wiederholbare und vom Experimentator unabhängige) Ergebnisse erhalten kann. Der *Nachteil* besteht jedoch darin, dass die dabei erzielten Ergebnisse im Allgemeinen relativ speziell sind und damit nur bedingt verallgemeinerbar.

Die zu untersuchenden Prinzipien „Schlussprozesse“, „Kategorienbildung“ und „Einheitenbildung“ sind *Prinzipien der menschlichen Informationsverarbeitung.*

2. Menschliche Informationsverarbeitung

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.

Der Ansatz zur Untersuchung dieser Basisprozesse betrifft die *Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung*. Er wurde in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts von Klix (1971) sowie Newell und Simon (1972) eingeführt.

2.1 Kognitive Strukturen und Operationen: Grundbausteine menschlicher 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, aber auch in stärker anwendungsbezogenen Gebieten, wie der Entwicklungspsychologie, der Lernpsychologie, der Differentiellen Psychologie und der Diagnostik.

Offensichtlich spielen dabei im Allgemeinen solche internen Repräsentationen eine Rolle, die nicht nur Information über Elemente und ihre Merkmale repräsentieren, sondern Information, die insbesondere durch Beziehungen zwischen ihren Elementen gekennzeichnet ist – z.B. durch grammatikalische Relationen zwischen den Worten eines Textes, durch räumliche Relationen zwischen den Teilen eines Bildes oder auch durch Beziehungen zwischen Personen. Eine solche Information wird als strukturierte oder *strukturelle Information* bezeichnet (vgl. auch Klix, 1971). Strukturelle Information kann sowohl extern als auch intern repräsentiert (getragen) werden. Träger struktureller Information ist extern z.B. ein Text oder ein Bild und intern eine *kognitive Struktur*.

Kognitive Strukturen sowie Operationen zu ihrer Erzeugung, Veränderung und Abarbeitung sind Grundbausteine geistiger Vorgänge (vgl. auch Klix, 1992, 1993).

Kognitive Strukturen, wie sie als interne Repräsentationen experimentell nachgewiesen worden sind, betreffen z.B. die Repräsentation unterschiedlicher Klassen von Begriffen sowie die Repräsentation spezieller Klassen von Sätzen (vgl. Abb. 4)

Bereits bei diesen relativ einfach anmutenden Klassen von Paradigmen ist der Nachweis der entsprechenden internen Repräsentationen nicht unbedingt einfach. Jedoch für wohldefinierte Klassen von Begriffen (vgl. Klix, 1992, van der Meer, 1991) und wohldefinierte Klassen von einfachen Sätzen (vgl. z.B. Groner, 1978, Pliske & Smith, 1979, Krause et al., 1987) konnten und können die intern repräsentierten kognitiven Strukturen (auf der Basis von Prozesscharakteristiken) experimentell bestimmt werden.

Frage nach	**Klassen** (Beispiele)
Begriffsrepräsentation	Ereignisbegriffe (Klix, 1992, van der Meer, 1991)
	Objektbegriffe (Klix, 1992, van der Meer, 1991)
Satzrepräsentation	**Transitive Inferenzen (Ordnungsprobleme)** (z.B. Groner, 1978, Pliske & Smith, 1979, Krause et al., 1987)

Abb. 4: Interne Repräsentationen: Beispiele für experimentell nachgewiesene kognitive Strukturen

Wir begeben uns auf die „Satzebene“ und betrachten nun als erstes Schlussprozesse und Kategorienbildung bei der Aufnahme und Verarbeitung struktureller Information.

Gegeben sind externe Sätze, gesucht sind die interne (mentale) Repräsentation und der Verarbeitungsprozess.

2.2 Schlussprozesse und Kategorienbildung

Wir betrachten die Klasse der *transitiven Inferenzen*. Ein Beispiel für *Schlussprozesse* ist in Abb. 5a dargestellt, ein Beispiel für Schlussprozesse und *Kategorienbildung* in Abb. 5b.

Extern gegebene Menge von Sätzen

Hans ist intelligenter als Fritz

Fritz ist intelligenter als Paul

Aufgabe:

Fragen beantworten

z.B.

Ist Hans intelligenter als Paul?

Ist Hans intelligenter als Fritz?

usw.

(Fragen nach allen gegebenen und daraus ableitbaren Aussagen)

Abb. 5a: Beispiel für Schlussprozesse: Transitive Inferenzen

Extern gegebene Menge von Sätzen

(nach Pliske and Smith, 1979)

Maria ist intelligenter als Anna

Hans ist intelligenter als Fritz

Eva ist intelligenter als Hans

Fritz ist intelligenter als Paul

Anna ist intelligenter als Eva

Aufgabe:

Fragen beantworten, z.B.

Ist Hans intelligenter als Paul?

Ist Maria intelligenter als Fritz?

usw.

(Fragen nach allen gegebenen und daraus ableitbaren Aussagen)

Geordnete Menge

bezüglich der Relation “intelligenter als”:

Maria Anna Eva | Hans Fritz Paul

Mädchen ***Jungen***

Abb. 5b: Beispiel für Schlussprozesse und Kategorienbildung

Bei dem Ordnungsproblem in Abb. 5b vereinfachen die Kategorien das Behalten und die Verarbeitung der Information. Wie kann man Schlussprozesse ohne und mit Kategorienbildung *experimentell* untersuchen und prüfen, ob solche Kategorien im Lösungsprozess genutzt werden?

2.2.1 Voraussetzungen für den experimentellen Nachweis

Um prinzipiell jede mögliche von den Versuchspersonen ausgebildete interne Repräsentation einer extern gegebenen Information experimentell nachweisen zu können, müssen mindestens die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Die Menge aller möglichen bildbaren internen Repräsentationen muss *vollständig angebbar* sein und
2. auf der Grundlage einer jeden (so) bildbaren internen Repräsentation muss eine *Vorhersage* des Antwortverhaltens möglich sein.

Um die Voraussetzung der Vollständigkeit zu erfüllen, muss eine *Systematisierung und Formalisierung* kognitiver Strukturtransformationen mit Hilfe der *Mathematik* durchgeführt werden (vgl. Abb. 6). Um die Voraussetzung der Vorhersage des Antwortverhaltens zu erfüllen, unterstellen wir Linearität des Antwortprozesses (zwei Operationen verbrauchen die doppelte Zeit gegenüber einer).

Systematisierung und Formalisierung
kognitiver Strukturtransformationen
↓
Vorhersage
des **Antwortverhaltens**
in Form von Reaktionszeitfunktionen
↓
Experimentelle Überprüfung

Abb. 6: Voraussetzungen für den experimentellen Nachweis interner Repräsentationen

2.2.2 Übersichten über kognitive Operationen

Sowohl in der Psychologie als auch in der Künstlichen Intelligenz spielen Operationen über kognitiven Strukturen eine bedeutende Rolle. In Abb. 7 werden einige Ansätze genannt.

- Grundgedanken zu kognitiven Operationen (Selz, 1913, zitiert in
- Dörner, 1976)
- Übersicht über elementare geistige Operationen (Lompscher, 1972;
- weiterführende Analysen dazu: Dörner, 1976)
- Kognitive Operationen und Prozeduren aus verschiedenen Gebieten psychologisch relevanten Geschehens (Klix, 1988, 1990, 1992, 1993, 2004; Klix & Lanius, 1999)
- „SemantischeNetze“ (Kintsch, 1988)
- „Produktionssysteme“ (Anderson, 1983, 2001, 2004)
- „Mentale Modelle“ (Johnson-Laird, 1983; Schnotz, 1994; Schnotz & Lowe, 2003; Goodwin & Johnson-Laird, 2005)

Abb. 7: Übersichten über kognitive Operationen

Einen breiten Raum in der Literatur nehmen die Darstellungen von kognitiven Operationen und Prozeduren von Klix (1988, 1990, 1992, 1993) ein. Die Kenntnisse darüber entstammen fünf verschiedenen Gebieten psychologisch relevanten Geschehens: aus der Evolution der Lernprozesse (vgl. dazu auch Klix & Lanius, 1999; Klix, 2004), aus perzeptiven Vorgängen, aus dynamischen Strukturbildungen begrifflichen Wissens, aus der Behandlung konstruktiver Denkprozesse und aus Analysen kognitiver Komponenten in Technologien. Die Menge der Operationen ist hier empirisch begründet.

Der Vorteil dieser empirisch begründeten Menge von Operationen besteht darin, dass von vornherein eine breite Palette von Anforderungen des psychologisch relevanten Geschehens berücksichtigt wird. Der Nachteil besteht im Verzicht auf Vollständigkeit.

Im Gegensatz dazu ist es unser Anliegen, kognitive Operationen von einer theoretisch-systematischen Betrachtung her zu definieren.

Der Vorteil eines solchen mathematisch-psychologischen Ansatzes besteht in der Vollständigkeit der Menge der (exakt definierten) internen Repräsentationen. Der Nachteil besteht in der Beschränkung der Vorhersage von Verhalten auf spezielle Klassen von Anforderungen. Schließlich besteht ein weiterer Vorteil einer – theoretisch induzierten - Systematik auch darin, zu prüfen, inwieweit sich alle in der Literatur bekannten kognitiven Strukturoperationen darin einordnen lassen.

2.2.3 Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturtransformationen

Als erstes stellte sich die Frage nach den *Kriterien* für die Systematisierung.

Da sich bei der Ausbildung und Veränderung kognitiver Strukturen sowohl die repräsentierte strukturelle Information als auch die diese Information repräsentierende (tragende) (kognitive) Struktur ändern kann, stellen diese Änderungen psychologisch relevante Kriterien für eine Systematik dar. Unter dem Aspekt der Änderung der *Information* und der Änderung der *Struktur* haben wir Vollständigkeitsbetrachtungen durchgeführt - für kognitive Strukturtransformationen, bei denen die lösungsrelevante Information erhalten bleibt.

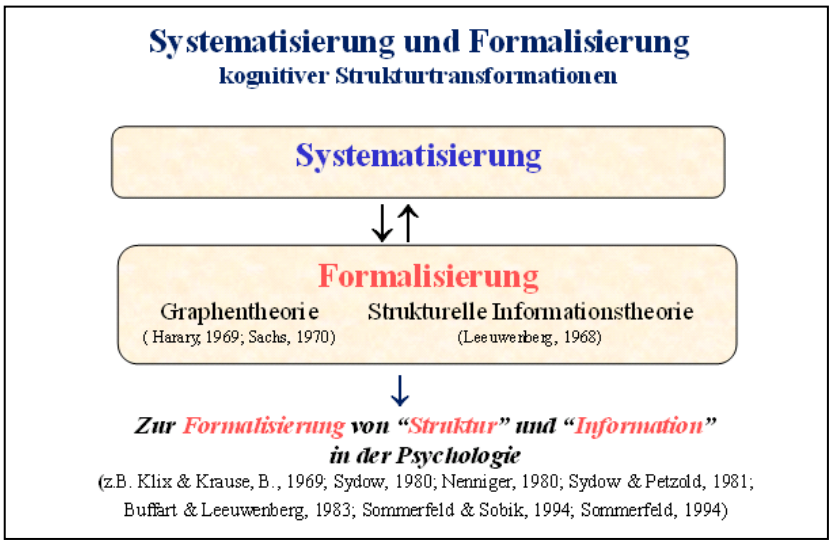


Abb. 8: Zur Systematisierung und Formalisierung

Als mathematische Disziplinen wurden die Graphentheorie (Harary, 1969; Sachs, 1970) und die strukturelle Informationstheorie (Leeuwenberg, 1968) eingesetzt. Bei der Formalisierung von Struktur und struktureller Information in der Psychologie wurde an Arbeiten von Leeuwenberg und Buffart, Klix und Bodo Krause, Sydow und Petzold und anderen angeknüpft (vgl. Abb. 8).

In Abb. 9 ist die auf dieser Grundlage entwickelte Systematik kognitiver Strukturtransformationen (Sommerfeld, 1994) in einer Übersicht dargestellt.

Struktur / Informationsgehalt	keine Änderung	Vergrößerung	Verkleinerung	Vergrößerung und Verkleinerung
keine Änderung	isomorphe Abbildung	Hinzufügen von Redundanz	Entfernen von Redundanz	Hinzufügen u. Entfernen von Redundanz
Vergrößerung	-----	Inferenz, Integration, Elaboration	Entfernen von Wider-sprüchen	Inferenz, Elaboration u. Entfernen v. Widersprüch.
Verkleinerung	-----	Hinzufügen von Wider-sprüchen	Selektion, Reduktion	Selektion, Reduktion u. Hinzufügen v. Widersprüch.
Vergrößerung und Verkleinerung	-----	Inferenz, Elaboration und Hinzufügen von Widersprüch.	Selektion, Reduktion und Entfernen von Widersprüch.	hierarchische Struktur-bildung, Bildung eines mentalen Modells

Abb. 9: Systematik kognitiver Strukturtransformationen (Sommerfeld, 1994)

Die Diagonale der Matrix 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 (als Inferenz- oder Schlussprozesse bezeichnet) sowie der integrativen Strukturbildung oder der hierarchischen Strukturierung auf der Basis von Klassenbildungsprozessen.

Mit dem entwickelten Ansatz zur Systematisierung und Formalisierung kognitiver Strukturtransformationen ist eine Systematik entstanden, in die alle psychologisch relevanten kognitiven Strukturoperationen eingeordnet werden können (Sommerfeld, 2008, 2009). Damit lassen sich mehr als 30 verschiedene Begriffe für kognitive Operationen und Operationenklassen (aus der Literatur) durch diese Systematik auf drei Klassen von Operationen (charakterisiert durch die Diagonale in Abb. 9) reduzieren.

Häufig empirisch auftretende kognitive Strukturtransformationen haben wir ausgewählt und bezüglich der Vorhersage für die vorn vorgestellte Klasse der transitiven Inferenzen ohne und mit Kategorienbildung weiter betrachtet (dargestellt in Abb. 10).

2.2.4 Vorhersage des Verhaltens in Abhängigkeit von der internen Repräsentation

Mit der oben gemachten Annahme über den Prozess lassen sich für die einzelnen kognitiven Strukturen die in der Abb. 10 skizzierten Reaktionszeitfunktionen vorhersagen.

Würde z.B. eine Versuchsperson die extern gegebenen Aussagen intern *isomorph abbilden* und dann bei der Fragenbeantwortung die dazu erforderlichen Aussagen entsprechend der formalen Logik ableiten, so müsste – mit der vorher gemachten Prozessannahme - bei der

Fragenbeantwortung die Reaktionszeit mit der Anzahl der Inferenzschritte zunehmen (vgl. erste Zeile der Tabelle in der Abbildung).

Würde z.B. eine Versuchsperson bereits während der Informationsaufnahme die Aussagen ableiten (*Inferenz*) und sowohl die extern gegebenen Aussagen als auch die abgeleiteten Aussagen intern abbilden, dann müsste die Reaktionszeit von der Inferenzschrittanzahl unabhängig sein (2. Zeile der Tabelle in Abb. 10).

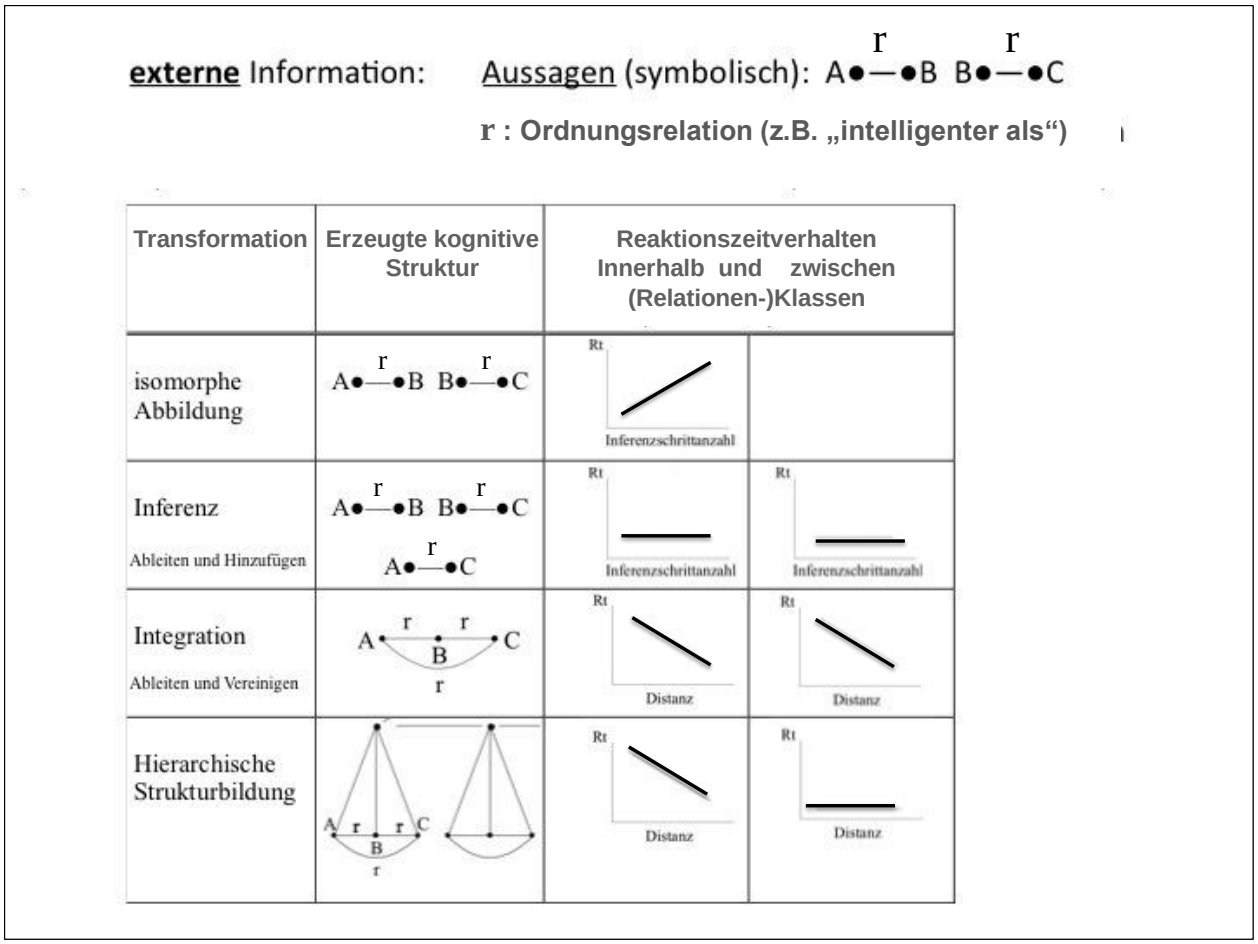


Abb. 10: Kognitive Strukturtransformationen zur Erzeugung interner Repräsentationen (Auswahl) mit zuzuordnenden Prozesscharakteristika (Reaktionszeitverhalten)

Betrachten wir weiterhin den Fall, dass die Versuchsperson bereits während der Informationsaufnahme die Aussagen ableitet und diese mit den gegebenen Aussagen *integriert* und damit eine lineare Ordnungsstruktur aufbaut (3. Zeile der Tabelle). In diesem Fall müsste – mit der vorher genannten Prozessannahme – der sogenannte Symbol-Distanz-Effekt (SDE) auftreten (vgl. z.B. Pliske & Smith, 1979), d.h. die Reaktionszeit müsste mit wachsender (erforderlicher) Inferenzschrittanzahl – oder zutreffender gesagt – mit größer werdender ordinaler Positionsdifferenz (mit zunehmender Distanz der Elemente in der linearen Ordnung) – abnehmen: Die bei kleinen Positionsdifferenzen (kurzen Distanzen zwischen den Elementen) auftretende Assimilation verlangt eine längere Entscheidungszeit als bei längeren Distanzen.

Würde eine Versuchsperson über der kognitiven Struktur *Klassen* ausbilden und diese zur Anforderungsbewältigung nutzen, so müsste für den Fall, dass die Elemente in der Frage unterschiedlichen Klassen angehören, die Reaktionszeit von der Distanz zwischen den Elementen unabhängig sein (4. Zeile der Tabelle).

2.2.5 Experimentelle Überprüfung

Der experimentelle Beleg wurde auf der Basis eines Verfahrens erbracht, das den Vorteil hat, weder von den Absolutwerten der Reaktionszeit noch von subjektiven Urteilen der Versuchspersonen abhängig zu sein (Krause, 1985).

2.2.5.1 Experimentelle Überprüfung von Schlussprozessen

Transitive Inferenzen:

Aussagen:	Fragen:
Hans ist intelligenter als Fritz.	*Ist Hans intelligenter als Fritz?*
Fritz ist intelligenter als Paul.	*Ist Hans intelligenter als Paul?*

Erwartet, entsprechend der formalen Logik:

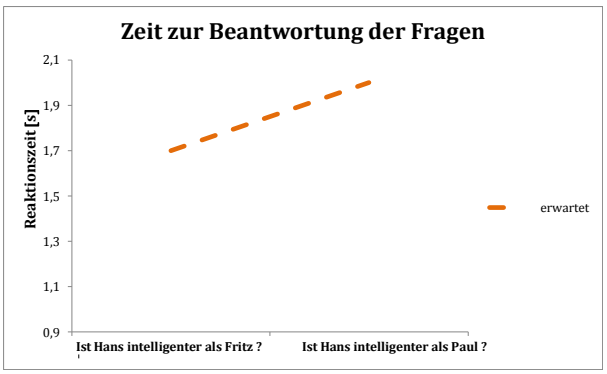
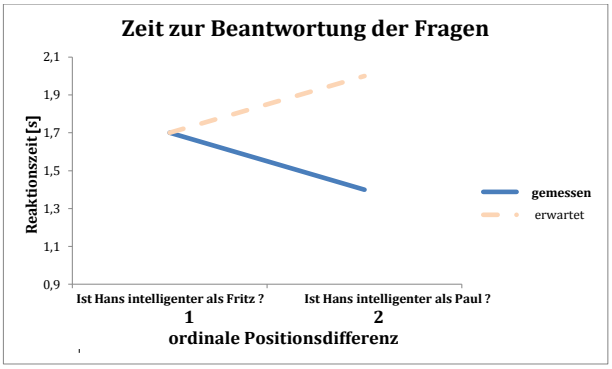


Abb. 11a

Experimentelles Ergebnis:



Interne Repräsentation:

Ordnung: **Hans Fritz Paul**

Abb. 11b

Abb. 11: Entsprechend der formalen Logik erwartetes Ergebnis (Abb. 11a) und prinzipieller Kurvenverlauf des experimentell erzielten Ergebnisses (Abb. 11b) für das in Abb. 5a dargestellte Beispiel für Inferenzprozesse

Für das Beispiel von Abb. 5a ist in Abb. 11a das entsprechend der formalen Logik erwartete Ergebnis skizziert. Es basiert auf der Annahme, dass die Reaktionszeit bei einer Frage nach einer abzuleitenden Aussage länger dauert als bei einer Frage nach einer gegebenen Aussage. Für das experimentelle Ergebnis ist der prinzipielle Kurvenverlauf in Abb. 11b skizziert.

Die Ergebnisse zeigen den bereits angesprochenen Symbol-Distanz-Effekt (SDE) und sprechen dafür, dass nicht die einzelnen Aussagen intern gespeichert werden, sondern dass bereits mit der Informationsaufnahme eine integrierte kognitive Struktur – in diesem Fall eine lineare Ordnung - aufgebaut wird (vgl. Zeile „Integration“ in Abb. 9). Aus Blickbewegungsuntersuchungen konnte der Aufbauprozess auch nachgewiesen werden (Krause, 1982). Auf der Basis einer solchen kognitiven Struktur können aufwändige Inferenzprozesse durch einfachere Vergleichsprozesse ersetzt werden.

Diese Integration von Information, d.h. eine entsprechende (interne) anforderungsabhängige Veränderung von (extern gegebenen) Aussagen, geschieht offenbar nur bei Anforderungen relativ geringer Komplexität (wie es z.B. Klahr und Wallace, 1973 bereits bei Schätzanforderungen unterschiedlicher Komplexität experimentell belegen konnten) und hat die Vereinfachung der Anforderungsbewältigung zum Ziel.

Fazit zum Schwerpunkt „Formale Logik und Schlussprozesse“ – mit Bezug zu Aristoteles und Platon (skizziert in Abb. 12): Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass menschliche Schlussprozesse teilweise anders durchgeführt werden als es die alten Griechen angenommen haben: Unter bestimmten Bedingungen werden durch *Ordnungsbildung Voraussetzungen für einfachere Lösungsprozesse geschaffen* – und zwar so, dass aufwändige Inferenzprozesse durch weniger aufwändige Vergleichsprozesse ersetzt werden können.

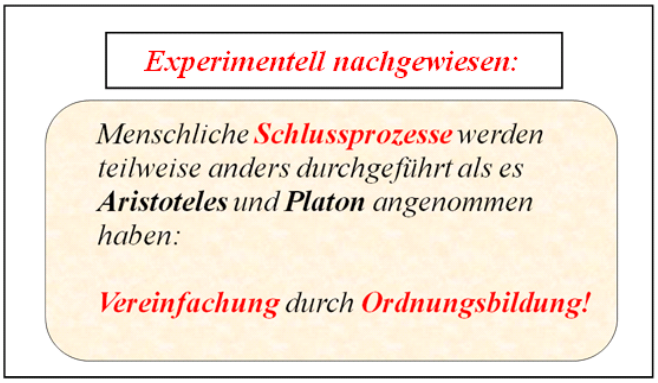


Abb. 12: Formale Logik und Schlussprozesse – mit Bezug zu Aristoteles und Platon

2.2.5.1 Experimentelle Überprüfung der Kategorienbildung

Mit Bezug zum Beispiel „Inferenzprozesse und Kategorienbildung“ in Abb. 5b wird untersucht, ob die Kategorien für die Fragenbeantwortung genutzt werden. In Abb. 13 ist der prinzipielle Kurvenverlauf für das experimentell erzielte Ergebnis skizziert.

Im Resultat zeigt sich keine Abhängigkeit von der Distanz zwischen den Elementen (genauer: der ordinalen Positionsdifferenz der Elemente) (vgl. in Abb. 10 die Zeile „Hierarchische Strukturbildung“: Reaktionszeitverhalten zwischen Relationen-Klassen): Für die Entscheidung wird offenbar das Wissen über die Kategorien-Zugehörigkeit der Elemente genutzt.

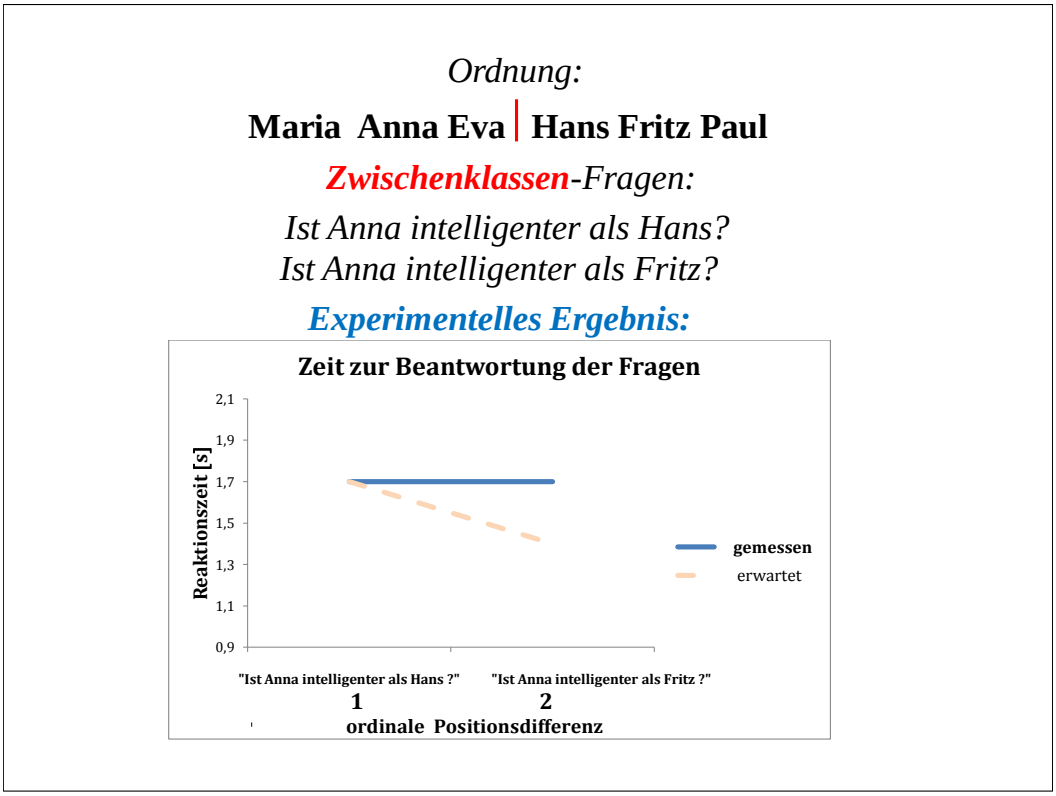


Abb. 13: Prinzipieller Kurvenverlauf des experimentell erzielten Ergebnisses für das in Abb. 5b dargestellte Beispiel für Kategorienbildung

In Abb. 14 sind die im Experiment von Pliske und Smith (1979) erzielten Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. Auf der Abszisse ist die ordinale Positionsdifferenz, die zwischen den Namen besteht, aufgetragen. Für benachbarte Elemente ist die ordinale Positionsdifferenz

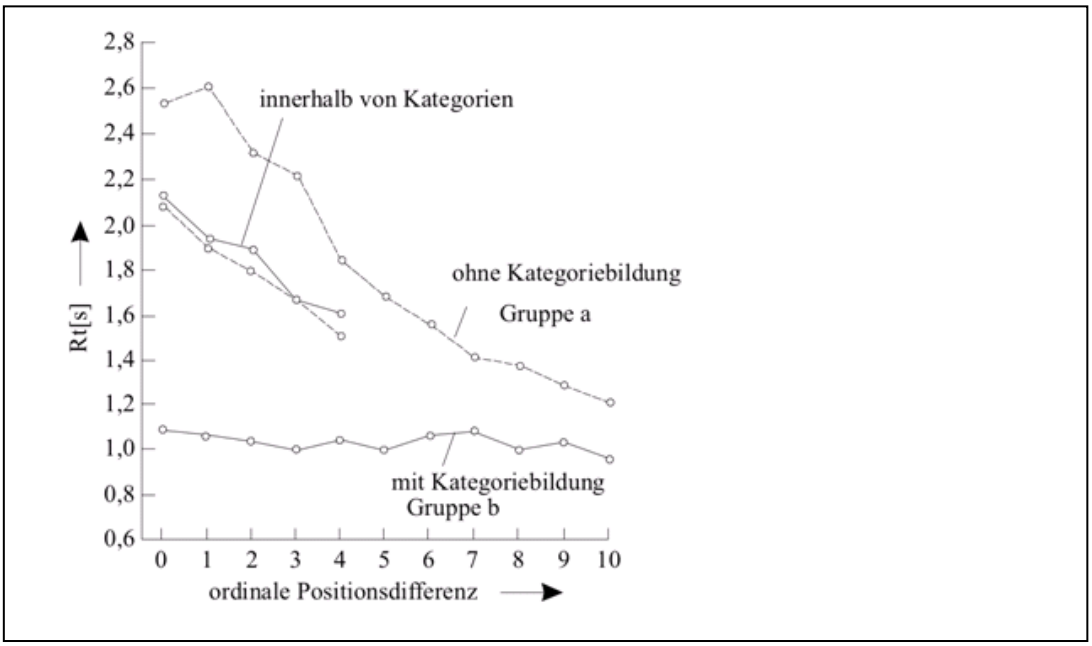


Abb. 14: Reaktionszeiten Rt[s] beim Lösen von Ordnungsproblemen nach Pliske und Smith (1979)

Die Autoren verwendeten ein zwölfgliedriges Ordnungsproblem mit 6 Jungennamen und 6 Mädchennamen – geordnet nach der Intelligenz. Variiert wurde die Ordnung (d.h. hier die Reihenfolge der nach der Intelligenz geordneten Namen).

In Gruppe a war die Reihenfolge der Namen zufällig. In Gruppe b erfolgte die Ordnung nach dem Geschlecht so, dass alle 6 Mädchen intelligenter waren als alle 6 Jungen.

Die Gruppe mit Kategorienbildung (Gruppe b) zeigt bei den Zwischenkategorien-Fragen keine signifikante Abhängigkeit von der ordinalen Positionsdifferenz zwischen den Elementen. Die Gruppe ohne Kategorienbildung (Gruppe a) zeigt in ihrem Verhalten den bekannten Symbol-Distanz-Effekt: je größer die ordinale Positionsdifferenz zwischen den Elementen, umso schneller die Entscheidung. Bei den Innerkategorien-Fragen der Gruppe b zeigt sich – analog zur Gruppe ohne Kategorienbildung – der Symbol-Distanz-Effekt.

Analoge Ergebnisse wie für dieses einrelationale Ordnungsproblem erhält man für ein dreirelationales Ordnungsproblem mit räumlichen Relationen (Krause, 2000).

In weiteren Experimenten zu transitiven Inferenzen konnte Kategorienbildung sowohl zur effektiven Strukturierung neuer Information als auch zur effektiven anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen experimentell nachgewiesen werden (Krause et al., 1987, Sommerfeld, 1994; Krause, 2000).

Auch bei *analogen Inferenzen* spielt die Kategorienbildung eine Rolle: So konnte experimentell belegt werden, dass Kategorien (in Form von Verdichtungen von Einzelmerkmalen) von Mathematik-Spezialschülern bevorzugt zur Lösungsfindung genutzt werden (Klix, 1992, Offenhaus, 1983 und Schwarz, 1986).

Das *Fazit* zum Schwerpunkt „Kategorienbildung“ – mit Bezug zu Aristoteles – ist in Abb. 15 skizziert: Die experimentell nachgewiesene Kategorienbildung bewirkt eine Vereinfachung der Anforderungsbewältigung.

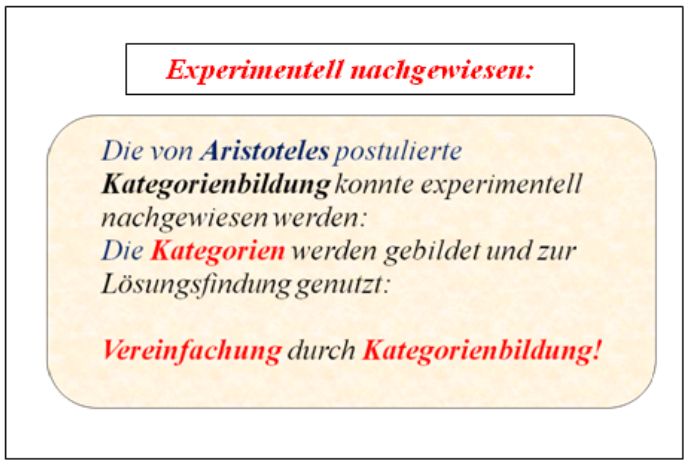


Abb. 15: Kategorienbildung - mit Bezug zu Aristoteles

Nach der Betrachtung von Schlussprozessen und Kategorienbildung fragen wir im Folgenden nach der Einheitenbildung.

2.3 Einheitenbildung

Einheiten sind Grundelemente und – bezogen auf eine bestimmte (z.B. strukturelle oder funktionale) Ebene – unteilbar. In der menschlichen Informationsverarbeitung sind in diesem Sinne Begriffe unteilbar. Es herrscht deshalb Konsens darüber, Begriffe unter dem *Elementeas-*

pekt als Einheiten zu betrachten. Begriffe sind durch Relationen verknüpft. Man denke etwa an die bereits angesprochenen Ereignisbegriffe, wie sie von Klix, Offenhaus und Schwarz experimentell untersucht wurden. Diese Verknüpfung bildet eine Struktur, die wir kognitive Struktur nennen, um sie als intern repräsentiert zu kennzeichnen.

Eine *strukturelle Einheit* ist dann z.B. „Begriff-Relation“ oder „Begriff–Relation–Begriff“. In der menschlichen Informationsverarbeitung werden solche Einheiten verknüpft, wie Groner (1978) und Groner und Groner (1982) bei der Verarbeitung eines zehngliedrigen Ordnungsproblems gezeigt haben.

Das Besondere - und zunächst Widersprüchliche - der menschlichen Informationsverarbeitung besteht darin, dass die Einheitenbildung eine hohe Flexibilität aufweist. So werden z.B. – wie wir oben gezeigt haben – bei der Lösung eines dreigliedrigen Ordnungsproblems nicht die extern gegebenen strukturellen Einheiten zum eigentlichen Lösungsprozess genutzt, sondern es wird bereits während des Verstehens- (oder Lese-) Prozesses inferiert und eine integrierte kognitive Struktur aufgebaut, so dass der Lösungsprozess auf einen Vergleichsprozess reduziert werden kann. Das ist einfacher, d.h. aufwandsärmer. Die Dynamik der Bildung kognitiver Strukturen steht gegen das Postulat anforderungsunabhängiger Einheiten der menschlichen Informationsverarbeitung (Krause, 1982).

Die Betrachtung von Einheiten haben wir bisher auf Element und Struktur bezogen. Beziehen wir jetzt die Zeit ein und wenden unseren Blick von der begrifflichen, d.h. semantischen Modellebene zur *neuronalen* Ebene.

Einheiten auf der neuronalen Ebene sind zeitlich stabile Aktivitätsmuster, die auch als Mikrozustände bezeichnet werden. Diese Auffassung geht auf Lehmann et al. (1987) zurück. Wir betrachten zeitlich stabile *Kohärenzmuster* aus dem EEG.

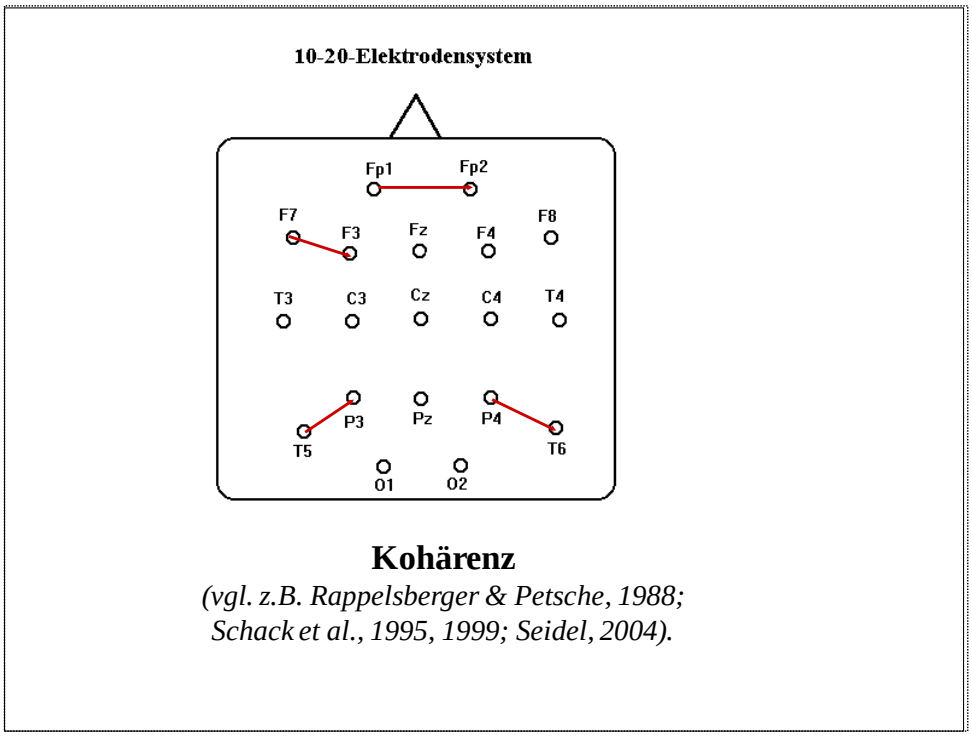


Abb. 16: Zur EEG-Messung als Grundlage für die Berechnung der EEG-Kohärenz. Die Bezeichnungen kennzeichnen Positionen auf der Schädeloberfläche (oben die Nase, an den Seiten die Ohren), an denen Elektroden zur EEG-Ableitung angebracht werden. Die Verbindungslinien kennzeichnen Beispiele für Paare von Elektrodenpositionen, zwischen denen die Kohärenz berechnet wird.

Mit Hilfe der EEG-Kohärenz können Aussagen zur synchronen Aktivität von Hirnarealen gemacht werden. Da kognitive Prozesse auf einer parallelen und verteilten Informationsverarbeitung basieren, gewinnt die synchrone Aktivität von Hirnarealen für die Elementaranalyse von Denkprozessen mehr und mehr an Bedeutung (vgl. z.B. von der Malsburg, 1981, 1994; Singer und Gray, 1995). Die Synchronisation kann auf der Basis der EEG-Spektralanalyse berechnet werden (vgl. z.B. Rappelsberger & Petsche, 1988; Schack et al., 1995, 1999; Seidel, 2004). Dabei informiert die Kohärenz über den Grad des frequenzbezogenen Zusammenhangs zweier elektrischer Signale, die von unterschiedlichen Positionen der Schädeloberfläche (mit Hilfe dort angebrachter Elektroden) abgeleitet werden (vgl. Abb. 16).

In Abb. 17 sind die Kohärenzen zwischen benachbarten Elektrodenpositionen als Kohärenzmaps dargestellt.

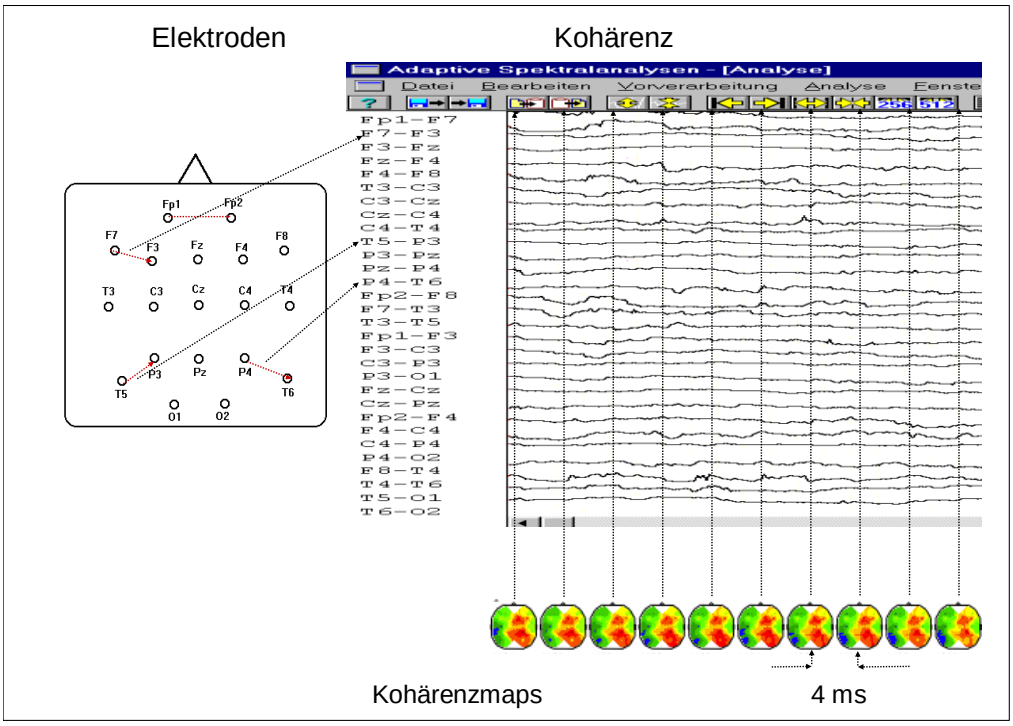


Abb. 17: EEG-Kohärenzen und EEG-Kohärenzmap (Mikrozustände): Jedes Kohärenzmap zeigt die kohärente Aktivation über dem Kopf (Kohärenz-Zunahme: blau→grün→gelb→ rot)

Wir gehen von der Auffassung aus, dass sich jede beliebige Anforderungsbewältigung als *Sequenz* solcher Kohärenzmuster, solcher Mikrozustände, solcher Einheiten abbildet.

In Abb. 18 sind EEG-Kohärenzmap-Sequenzen mit hoher zeitlicher Auflösung dargestellt (Schack, 1997; Krause et al., 2003a,b; Seidel, 2004). Die Muster sind über einen bestimmten Zeitabschnitt quasi stabil, kippen dann plötzlich in einen anderen quasi stabilen Zustand usw. Das bildet die *Grundlage für die Einheitenbildung*. Abb. 19 zeigt eine Sequenz von Mikrozuständen einer mathematisch hochbegabten (HB) Versuchsperson (Vp) beim Lösen eines mathematischen Problems der Art “Wie viele Diagonalen hat ein 23-Eck?“.

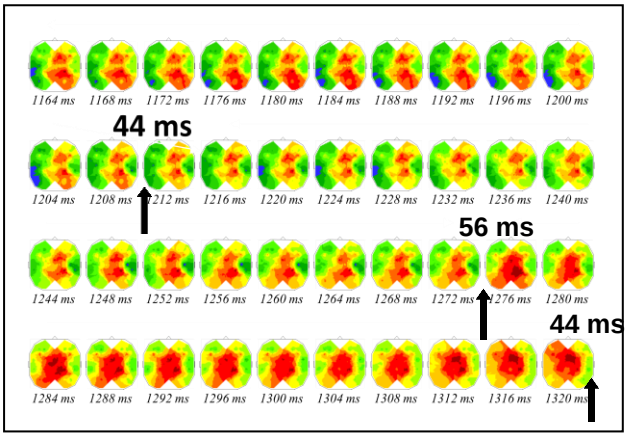


Abb. 18: EEG-Kohärenzmap-Sequenzen mit hoher zeitlicher Auflösung (Schack, 1997; Krause et al., 2003 a,b; Seidel, 2004).

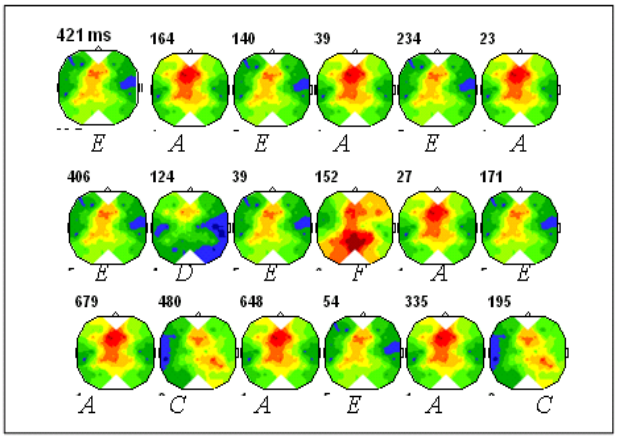


Abb.19: Mikrozustandssequenzen beim Lösen eines mathematischen Problems, Auschnitt 4,7 sec., 1 Vp: HB., Skala EEG-Kohärenz: 0.17 (blau) – 0.79 (rot). Oben steht die jeweilige Dauer des Mikrozustandes in ms und darunter die Kennzeichnung mit einem Buchstaben.

Vom Verhalten her ist nun interessant, welcher Zustand auf welchen folgt: Gibt es Abhängigkeiten, Wiederholungen, Periodizitäten usw., die sich in unterschiedlichen Ordnungsgraden ausdrücken? Man kann die Ordnung innerhalb einer solchen Mikrozustandssequenz durch ein auf Clausius (1822-1888) zurückgehendes Maß ausdrücken, die Entropiereduktion. Hohe Entropiereduktion bedeutet hohe Ordnung in der Sequenz. (z.B. Krause, 2000; Krause & Seidel, 2004). Abb. 20 zeigt Sequenzen von Mikrozuständen einer normalbegabten Versuchsperson und einer mathematisch hochbegabten Versuchsperson beim Lösen eines mathematischen Problems. Die Buchstaben bezeichnen bestimmte Kohärenzmuster, die nacheinander auftreten.

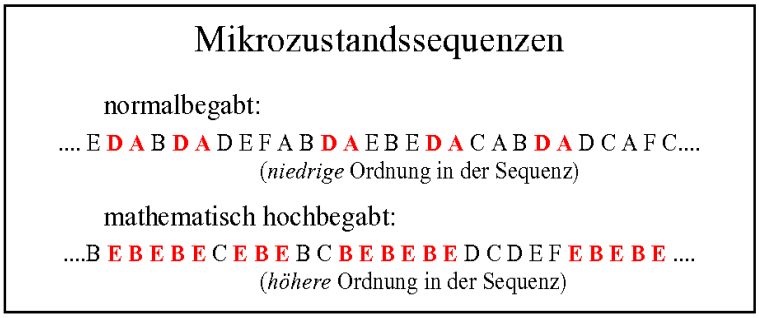


Abb. 20: Mikrozustandssequenzen beim Lösen eines mathematischen Problems

Bisher konnten wir zeigen, dass mathematisch Hochbegabte eine *höhere Ordnung* in solchen Sequenzen aufweisen als mathematisch Normalbegabte, quantitativ ausgedrückt als höhere Entropiereduktion. In Abb. 21 sind die Mittelwerte für die Gruppe der Normalbegabten und die Gruppe der Hochbegabten dargestellt.

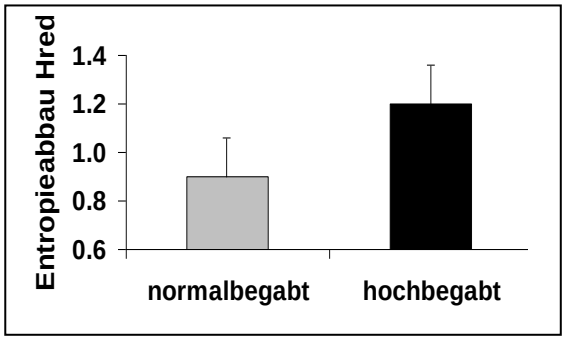


Abb. 21: Entropiereduktion in Abhängigkeit von der mathematischen Begabung (Krause, 2000; Krause et al., 2003 a, b). Hohe Entropiereduktion bedeutet hohe Ordnung in der Sequenz der Mikrozustände.

Interessant ist, dass – im Gegensatz zur Bearbeitung schwieriger mathematischer Aufgaben - bei leichten Aufgaben (z.B. „Wie viel ist 2 + 4 + 1?“) kein signifikanter Unterschied zwischen Normalbegabten und mathematisch Hochbegabten in der Ordnung der entsprechenden Sequenzen besteht (vgl. Abb. 22).

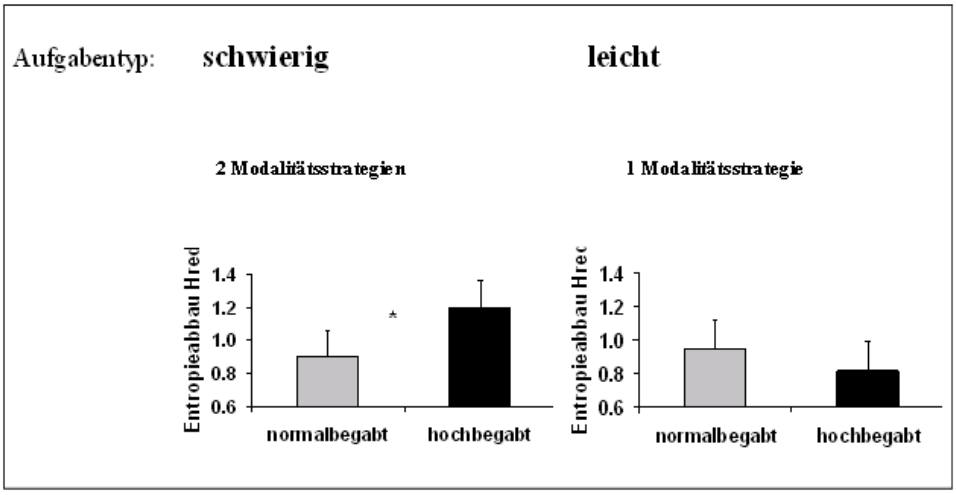


Abb. 22: Entropiereduktion in Abhängigkeit von der mathematischen Begabung (Krause, 2000; Krause et al., 2003 a, b).
*Aufgabentyp **schwierig**: z.B.: Wie viele Diagonalen hat ein 23–Eck?*
*Aufgabentyp **leicht**: z.B.: Wie viel ist 2 + 4 + 1?*

Eigenschaften auf der Verhaltensebene bilden sich also in Eigenschaften solcher Sequenzen von Mikrozuständen auf der neuronalen Ebene ab.

Wenn wir solche Mikrozustände als Buchstaben eines Alphabetes auffassen, dann bildet sich jeder kognitive Prozess in einem beliebigen „Wort“ aus solchen „Buchstaben“-Sequenzen ab. Das gilt dann ohne Einschränkung für jede beliebige Anforderung. Die genaue Anzahl unterscheidbarer Mikrozustände, also die Anzahl der Buchstaben dieses Alphabetes, ist bisher noch nicht angebbar. Bisherige Befunde sprechen dafür, dass diese Anzahl sehr klein ist. Auch ist es noch nicht gelungen, den Mikrozuständen kognitive Operationen bzw. kognitive Zustände zuzuordnen. Das muss zukünftiger Forschung überlassen bleiben.

Das *Fazit* zum Schwerpunkt „Einheitenbildung“ - mit Bezug zu Demokrit – ist in Abb. 23 skizziert: Die experimentell nachgewiesene Bildung von Einheiten sowie eine hohe Ordnung in der Abfolge solcher Einheiten im Lösungsprozess stellen Grundlagen für die Vereinfachung der Anforderungsbewältigung dar.

Abb. 23: Einheitenbildung - mit Bezug zu Demokrit

2.4 Fazit

Wir haben *Schlussprozesse*, *Kategorienbildung* und *Einheitenbildung* bei der menschlichen Informationsverarbeitung betrachtet und gezeigt, dass Folgendes *experimentell nachgewiesen* werden konnte:

- Mit Bezug zu *Aristoteles* und *Platon*:
  Menschliche *Schlussprozesse* werden teilweise anders durchgeführt als es die alten Griechen angenommen haben: *Vereinfachung* durch anforderungsabhängige Ordnungsbildung.
- Mit Bezug zu *Aristoteles*: *Kategorienbildung* ist experimentell nachgewiesen worden: *Vereinfachung* durch anforderungsabhängige Kategorienbildung.
- Mit Bezug zu *Demokrit*: *Einheitenbildung* ist experimentell nachgewiesen worden: Vereinfachung durch anforderungsabhängige Einheitenbildung.

Wenngleich wir hier vorerst nicht quantifizieren können, so ist es uns besonders wichtig, den einen Gedanken zu unterstreichen: die Vielfalt der Erscheinungsformen von Ordnungs-, Kategorien- und Einheitenbildung über Wissen und Prozeduren wird möglicherweise durch „ein Motiv“ bestimmt, durch das *Funktionsprinzip Vereinfachu*ng, wie wir es mit Bezug auf Klix (1983) nennen wollen (vgl. auch Krause, 2010; Sommerfeld, 2010). Wahrscheinlich haben wir es hier mit einer invarianten Eigenschaft gegenüber Anforderungstransformation bei der menschlichen Informationsverarbeitung zu tun.

3. „Objektiv, aber speziell“: Psychologie als Naturwissenschaft: Fortschritte und Grenzen

Mit Bezug zum Titel unseres Vortrags möchten wir noch einmal hervorheben: Die beschriebenen Untersuchungen auf der Basis *naturwissenschaftlicher Methoden* und *unter Einbeziehung der Mathematik* waren methodisch streng kontrolliert. Somit konnten damit *objektive* (d.h. wiederholbare und vom Experimentator unabhängige) Ergebnisse erzielt werden. Der

Nachteil besteht jedoch darin, dass die Ergebnisse relativ *speziell* sind. Somit ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse entsprechend eingeschränkt. Dem Nachteil einer eingeschränkten Generalisierbarkeit steht der Vorteil gegenüber, dass entscheidende Grundlagen dafür gegeben sind, *präzise* Aussagen zu erhalten. Das betrifft zum einen die relativ gute Formalisierbarkeit (vgl. z.B. Groner, 1978; Sommerfeld, 1994) und zum anderen die Möglichkeit der experimentellen Erfassung interner (mentaler) Repräsentationen (Pliske & Smith, 1979; Krause, 1985, 2000). Wichtig ist weiterhin folgendes: *Schlussprozesse, Kategorien und Einheiten sind sowohl in elementaren als auch in komplexeren Denkprozessen von grundlegender Bedeutung.* Das konnte in unterschiedlichen Untersuchungen *experimentell nachgewiesen* werden (vgl. z.B. Krause et al., 1987; Sommerfeld, 1994; Kotkamp, 1999; Krause, 2000).

Für die Entwicklung der Psychologie sind *Interdisziplinarität* und im weiteren Multidisziplinarität sowie die Entwicklung und Bearbeitung transdisziplinarer Problemstellungen erforderlich (vgl. auch Krause, 2011). Am Beispiel der Denkpsychologie haben wir an ausgewählten Paradigmen die Bedeutung der Interdisziplinarität zwischen Psychologie und Mathematik sowie zwischen Psychologie und Neurowissenschaft demonstriert. Über die Wechselbeziehung zwischen der Psychologie und weiteren Disziplinen haben wir in diesem Vortrag nicht gesprochen. Der Trend geht zur Einbeziehung von Biochemie und Mikrobiologie.

Literatur

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.

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.

Dörner, D. (Hrsg.) (1976) *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.

Goodwin, G.P. & Johnson-Laird, P.N. (2005) Reasoning about relations. *Psychological Review, 112*, 468-493.

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

Groner, R. & Groner, M. (1982) Towards a hypothetico-theory of cognitive activity. In: Groner, R. & Fraisse, P. (Eds.) *Cognition and Eye Movements*. Berlin: DVW, 100-121.

Harary, F. (1969) *Graph Theory.* Reading, MA: Addison-Wesley. New edition (1994): Perseus Books.

Johnson-Laird, P.N. (1983) *Mental Models: Toward a Cognitive Science of Language.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

Kintsch, W. (1988) The role of knowledge in discourse comprehension: A construction integration model. *Psychological Review, 95,* 163-182.

Klahr, D. & Wallace, J.G. (1973) The role of quantification operatorsin the development of conservation of quantity. *Cognitive Psychology,* 4, 731-736.

Klix, F. (1971) *Information und Verhalten.* Berlin: DVW.

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: tra*f*o 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.

Kotkamp, U. (1999) *Elementares und komplexes Problemlösen. Über Invarianzeigenschaften von Denkprozessen*. Lengerich: Pabst.

Krause, W. (1982) Eye Fixation and Three-Term Series Problems. Or: Is there evidence for task-independent information units? In R. Groner & 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. (2000) *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.

Krause, W. (2010) Einfachheit und menschliche Informationsverarbeitung? *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 108.* Berlin: tra*f*o Verlag, 37-55.

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

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

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

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

Krause, W., Seifert, R. & Sommerfeld, E. (1987) Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen im Problemlösen. *ZKI-Informationen 2/87*. Berlin: AdW der DDR.

Lander, H.-J. (1991) Ein methodischer Ansatz zur Ermittlung der Struktur und der Dimensionierung einer intern-repräsentierten Begriffsmenge. *Zeitschrift für Psychologie, 199*, 167-176.

Lassner, G. (1999) Die Leibnizsche Monadologie aus der Sicht der modernen Naturwissenschaften. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 30.* Berlin: tra*f*o Verlag, 5-78.

Leeuwenberg, E. (Ed.) (1968) *Structural Information of Visual Patterns*. Paris: Mouton & Co.

Lehmann, D., Ozaki, H. & Pal, I. (1987) EEG alpha map series: brain microstates by space oriented adaptive segmentation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 67*, 271-288.

Lompscher, J. (1972) *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung geistiger Fähigkeiten*. Berlin: DVW.

Malsburg, C. von der (1981) The correlation theory of brain function. *Internal Report 81-2*. Göttingen. Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie. Reprinted (1994) in: Domany, E., van Hemmen, J.L. & Schulten, K. (Eds.) *Models of Neural Networks II*. Berlin: Springer, 95-119.

Meer, E. van der (1991) Die dynamische Struktur von Ereigniswissen. In: Klix, F., Roth, E. & van der Meer, E. (Hrsg.) *Kognitive Prozesse und geistige Leistung*. Berlin: DVW, 41-67.

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.

Offenhaus, B. (1983) Analyse des analogen Schlußprozesses unter differentiellem Aspekt. *Dissertation A*. Humboldt-Universität zu Berlin.

Pliske, R.M. & Smith, K.M. (1979) Semantic categorization in a linear order problem. *Memory and Cognition, 7,* 297-302.

Rappelsberger, P. & Petsche, H. (1988) Probability mapping: power and coherence analyses of cognitive processes. *Brain Topography 1*, 46-54.

Sachs, H. (1970) *Einführung in die Theorie der endlichen Graphen*. Leipzig: Teubner.

Schack, B. (1997) Adaptive Verfahren zur Spektralanalyse instationärer mehrdimensionaler biologischer Signale. *Habilitationsschrift*. Technische Universität Ilmenau.

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

Schack, B., Grießbach, 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.

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.

Schwarz, Ch. (1986) Zur Spezifik von Erkennungsprozessen bei mathematisch Hochbegabten. *Zeitschrift für Psychologie, 194,* 7-23.

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

Selz, O. (1913) *Über die Gesetze des geordneten Denkverlaufs.* Stuttgart: Speman.

Singer, W. & Gray, C.M. (1995) Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annual Review of Neuroscience, 18,* 555-586.

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

Sommerfeld, E. (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, Bd. 101.* Berlin: trafo Verlag, 93-110 und *Leibniz-Online 6/2009.* www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/05-Sommerfeld_2009_04_281.pdf

Sommerfeld, E. (2010) Einfachheit - ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 108.* Berlin: trafo Verlag, 145-163.

Sommerfeld, E. & Sobik, F. (1994) Operations on cognitive structures – their modeling on the basis of graph theory. In: Albert, D. (Ed.) *Knowledge Structures*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 146-190.

Sprung, L. & Sprung, H. (2010) *Eine kurze Geschichte der Psychologie und ihrer Methoden.* München, Wien: Profil Verlag.

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.

www.textlog.de/6179.html: „Die Begründung der formalen Logik“

www.de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Logik_#Antike_Logik

www.vonwolkenstein.de/Datenbank/doku.php?id=Demokrit

Adressen der Autoren:

Prof. Dr. Erdmute Sommerfeld: Erdmute.Sommerfeld@t-online.de
Prof. Dr. Werner Krause: urwe.krause@t-online.de