



KfK 5002
März 1992

Lernmodelle und Wissensverarbeitung

H. B. Keller, Th. Weinberger
Institut für Datenverarbeitung in der Technik
Projekt Schadstoffbeherrschung in der Umwelt

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Institut für Datenverarbeitung in der Technik
Projekt Schadstoffbeherrschung in der Umwelt

KfK 5002

Lernmodelle und Wissensverarbeitung

Hubert B. Keller, Thomas Weinberger

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung:

Das Ziel einer innovativen Prozeßführung ist die Optimierung des Betriebes technischer Anlagen/Verfahren zur prozeßintegrierten Vermeidung der Bildung von Schadstoffen im Sinne eines aktiven Umweltschutzes.

Neben den konventionellen Methoden der Informationstechnik sind hierzu auch neuartige Verfahren wie wissensbasierte Techniken einzusetzen. Lernverfahren können zur automatischen Wissensakquisition und -validierung herangezogen werden.

Die wesentlichen aus der Lernpsychologie stammenden Lerntheorien werden dargestellt. Im Bereich des Problemlösens werden die drei Problemtypen Interpolation, Synthese und Diagnostik sowie verschiedene Problemlösungsstrategien behandelt. Strukturelle Veränderungen im Gedächtnis, ausgelöst durch eine Entwicklung der Problemlösefähigkeit, werden untersucht. Die vier verschiedenen theoretischen Ansätze zum Wissenserwerb werden ausführlich vorgestellt und auf Ansatzpunkte zur gedächtnismäßigen Repräsentation, zur Problemlösung und zum Lernen untersucht und kritisch bewertet. In diesem Zusammenhang wird eine Erweiterung des schematheoretischen Ansatzes, das Konzept kognitiver Schemata, vorgestellt und in seinen Grundzügen erläutert.

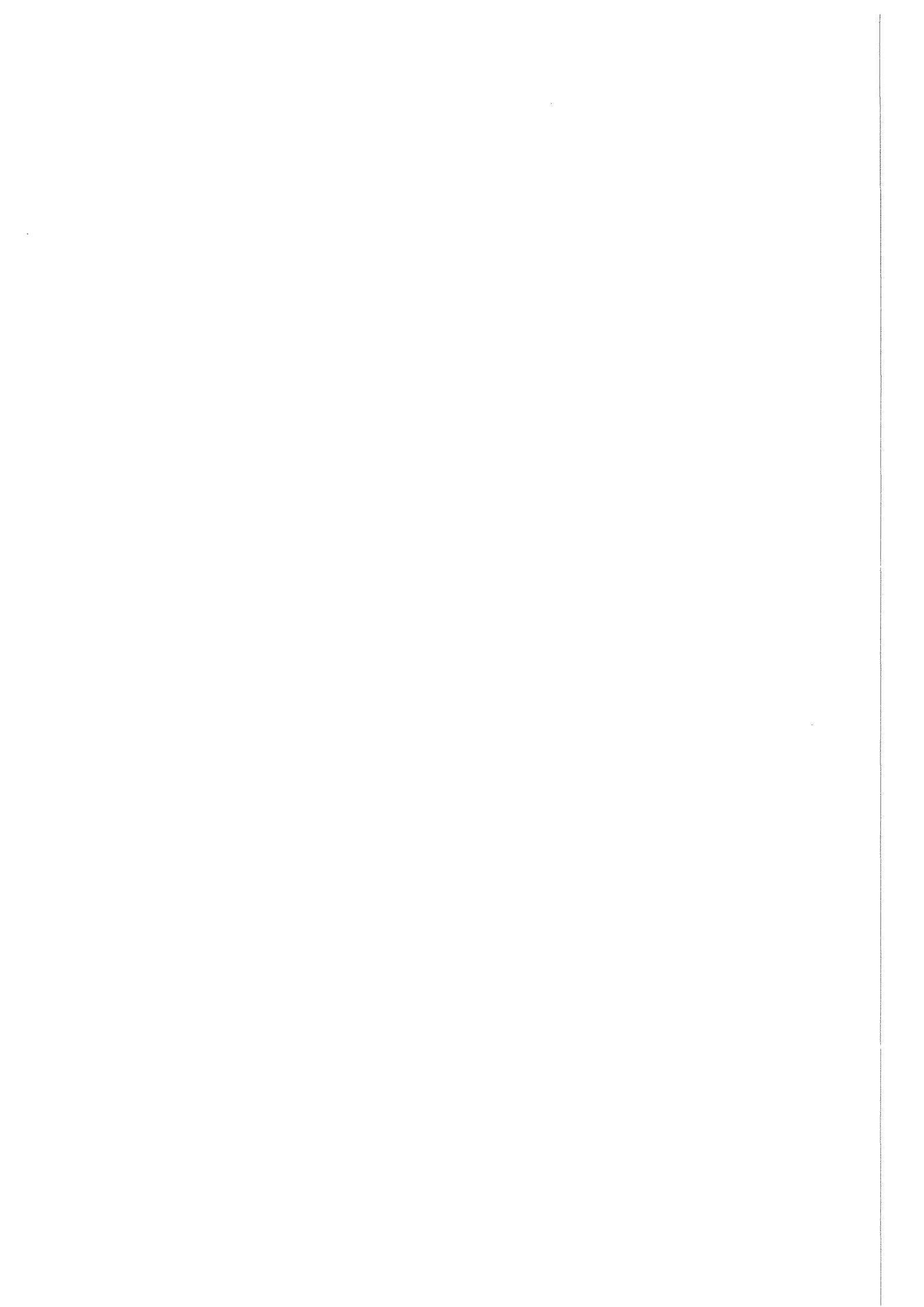
Models of Learning and the Processing of Knowledge

Abstract:

The optimisation of the operation of technical systems or processes, in order to avoid the production of ecologically harmful substances, in sense of an active conservation of the environment, is the aim of an innovative process-control.

Besides the standard methods of computer science, new methods like knowledge-based techniques should be applied. For automatic knowledge acquisition and -validation learning-techniques can be used.

The essential learning theories, originally belonging to the psychology of learning, are presented. In the field of problem-solving the three problemtypes interpolation, synthesis and diagnostic as well as different problem-solving strategies are treated. Structural changes in memory, caused by the development of problem-solving abilities are investigated. The four different theoretical approaches for knowledge acquisition are presented in detail. These approaches are analysed and critically judged with respect to starting-points of the representation in memory, methods for problem-solving and the capability of learning. In this context an extension of the scheme-theoretical approach, the concept of cognitive schemes, is presented and outlined in its essentials.



Inhalt

Zusammenfassung	1
1 Lerntheorien	5
1.1 Reiz-Reaktions-Theorien	5
1.2 Die kognitiven Theorien	6
1.2.1 Tolman und das Lernen von Zeichen	7
1.2.2 Der Grundgedanke der Gestaltpsychologie	7
1.2.3 Piaget und die kognitive Struktur	8
1.2.3.1 Der Schemabegriff und die kognitive Struktur	8
1.2.3.2 Die Stufenlehre Piagets	9
1.2.3.3 Berlyne und die Theorie des kognitiven Konfliktes	11
1.3 Das Flußdiagramm des Lernprozesses	12
2 Problemtypen	13
2.1 Einleitung	13
2.2 Drei Klassen von Problemtypen	14
3 Allgemeine Überlegungen zum Problemlösen	15
3.1 Die Abbildung von Realitätsbereichen im Gedächtnis	17
3.2 Denken als interpretativer Prozeß	20
3.3 Heurismen	20
3.4 Die Organisation der heuristischen Struktur	21
4 Verschiedene Problemlösungsstrategien	23
4.1 Problemlösen als individueller Lernprozeß	23
4.2 Lösen von Interpolationsproblemen	24
4.2.1 Koordination der Teilabläufe zur Lösung von Interpolationsproblemen	25
4.3 Synthetisches Problemlösen	27
4.3.1 Eine Umstrukturierungsmethode	27
4.3.2 Das Denken mit Analogien und Modellen	27
4.3.3 Die Wirkung von Modellen	28
4.4 Dialektisches Problemlösen	29

5	Die Grundelemente der Informationsverarbeitung	31
5.1	Der Assoziationismus	31
5.2	Der faktorenanalytische Ansatz	32
5.3	Kognitive Operationen	32
5.3.1	Der Ansatz von Selz (1913)	32
5.3.2	Der Ansatz von Lompscher (1972)	33
6	Die Entwicklung der Problemlösefähigkeit (Lernen)	35
6.1	Die Fortentwicklung der epistemischen Struktur	35
6.1.1	Veränderungen der Komplexionshierarchie	37
6.1.2	Veränderung der Abstraktionshierarchie	37
7	Der Wissenserwerb; vier verschiedene theoretische Ansätze	41
7.1	Einleitung	41
7.2	Der propositional orientierte Ansatz zum Wissenserwerb	41
7.2.1	Der Ansatz von Quillian sowie traditionelle Ansätze	42
7.2.2	Bewertung des Ansatzes von Quillian sowie traditioneller Merkmalstheorien	45
7.2.3	Der Ansatz von Lindsay, Norman und Rumelhart (LNR)	45
7.2.4	Bewertung des Ansatzes von Lindsay, Norman und Rumelhart	47
7.2.5	Der Ansatz von Graesser (1981)	48
7.2.6	Bewertung des Ansatzes von Graesser	49
7.2.7	Bewertung des propositional orientierten Ansatzes zum Wissenserwerb	50
7.2.8	Resümee	51
7.3	Der schematheoretische Ansatz zum Wissenserwerb	52
7.3.1	Die Grundzüge des Schemakonstruktes	52
7.3.2	Der Erwerb und die Modifikation von Schemata	54
7.3.3	Die Stufen des Schemaerwerbs	56
7.3.4	Die Funktion von Schemata für den Wissenserwerb	57
7.3.5	Bewertung des schematheoretischen Ansatzes zum Wissenserwerb	58
7.3.6	Resümee	59
7.4	Der Ansatz der Produktionssysteme zum Wissenserwerb	63
7.4.1	Die Theorie des Wissenserwerbs von Anderson	64
7.4.2	Das Modell des Verstehens deklarativer Information von Kieras und Bovair, 1986	67
7.4.3	Bewertung des Ansatzes der Produktionssysteme zum Wissenserwerb	68

7.4.4	Resümee	69
7.5	Der Ansatz mentaler Modelle zum Wissenserwerb	69
7.5.1	Der Ansatz von de Kleer und Brown, 1983	71
7.5.2	Der Ansatz von Forbus und Genter, 1986	73
7.5.3	Bewertung des Ansatzes mentaler Modelle zum Wissenserwerb	76
7.5.4	Resümee	77
7.6	Abschließende Bemerkungen zu den behandelten theoretischen Ansätzen zum Wissenserwerb	78
	Literatur	81
	Stichwortverzeichnis	83

Zusammenfassung

Betrachtet man einen technischen Prozeß hinsichtlich der Bildung von Schadstoffen, so muß ein *intelligenter Ansatz zur Prozeßführung* grundsätzlich eine Minimierung der entstehenden Schadstoffe anstreben, um somit die Problematik der Beseitigung von Schadstoffen quasi "an der Wurzel" anzugehen. Daher muß das oberste Ziel bei der Führung technischer Anlagen die *prozeßintegrierte Vermeidung der Bildung von Schadstoffen* sein.

Neben den konventionellen Methoden der Informationstechnik sind hierzu auch neuartige Verfahren wie wissensbasierte Techniken einzusetzen. Lernverfahren können zur automatischen Wissensakquisition und -validierung herangezogen werden. Das Ziel sind Systeme, die das Wissen zur optimalen Führung eines technischen Prozesses sukzessive on-line ableiten (lernen) und dem Bediener zur Verfügung stellen.

Hierzu bildet der vorliegende Bericht eine Einführung und einen Überblick in den Themenbereich der Lernmodelle, als Teilgebiet der Lernpsychologie und der Künstlichen Intelligenz. Es werden nicht nur die wesentlichen Modelle vorgestellt, sondern es wird auch die zum Verständnis notwendige Terminologie sukzessive eingeführt.

Grob gesprochen läßt sich der gesamte Inhalt der vorliegenden Arbeit drei Themengebieten zuordnen. Das Kapitel 2 behandelt elementare klassische Lerntheorien, wie sie seit Beginn dieses Jahrhunderts entwickelt wurden und basiert hauptsächlich auf Joerger /5/.

Die Kapitel 3 bis 6 befassen sich im wesentlichen mit dem Problemlösen, wobei dieser Bereich schrittweise, angefangen von der Bildung von Problemtypen über deren gedächtnismäßige Repräsentation und deren Lösung, bis hin zu Ansätzen für die Grundelemente der Informationsverarbeitung, behandelt wird. Dieser Darstellung liegen die Ausführungen von Dörner /4/ zugrunde.

Der Schwerpunkt der Kapitel 7 und 8 liegt dann auf der Untersuchung des Lernprozesses und des Wissenserwerbs. Der Wissenserwerb wird durch die Darstellung von vier verschiedenen theoretischen Ansätzen, zumindest aus lernpsychologischer Sicht, ausführlich, wenn auch nicht erschöpfend behandelt. Diese Ausführungen basieren auf Mandel et al. /10/.

Im ersten Kapitel werden zunächst unter dem Blickwinkel der klassischen Reiz-Reaktionstheorien und der kognitiven Theorien verschiedene Lerntheorien vorgestellt. Ausgehend von einer Einteilung in die drei Problemtypen Interpolation, Synthese und Dialektik wird im folgenden der Problemlösungsvorgang aus lernpsychologischer Sicht bis hin zu verschiedenen Problemlösungsstrategien betrachtet.

Vor dem Hintergrund der Suche nach den Grundelementen der Informationsverarbeitung werden dann verschiedene theoretische Ansätze behandelt, wobei als Menge der elementaren kognitiven Operatoren zwei verschiedene "Vorschläge" explizit angegeben werden.

Wie sich Strukturen im Gedächtnis während des Lernvorganges, im Zuge einer Problemlösung, verändern, ist Bestandteil von Kapitel 7.

Zusammenfassung

Im letzten Kapitel werden vier grundsätzlich verschiedene theoretische Ansätze zum Wissenserwerb, entsprechend der zugrundeliegenden Form der Wissensrepräsentation, ohne auf die unterliegenden speziellen Lernstrategien näher einzugehen, diskutiert und kritisch bewertet. In diesem Zusammenhang wird das neue Konzept kognitiver Schemata vorgestellt.

Das Konzept kognitiver Schemata basiert auf dem Schemakonzept, das wesentlich durch das menschliche Verhalten, insbesondere Lernverhalten, geprägt ist und auf den Schweizer Lernpsychologen Jean Piaget (1896 - 1980) zurückgeht.

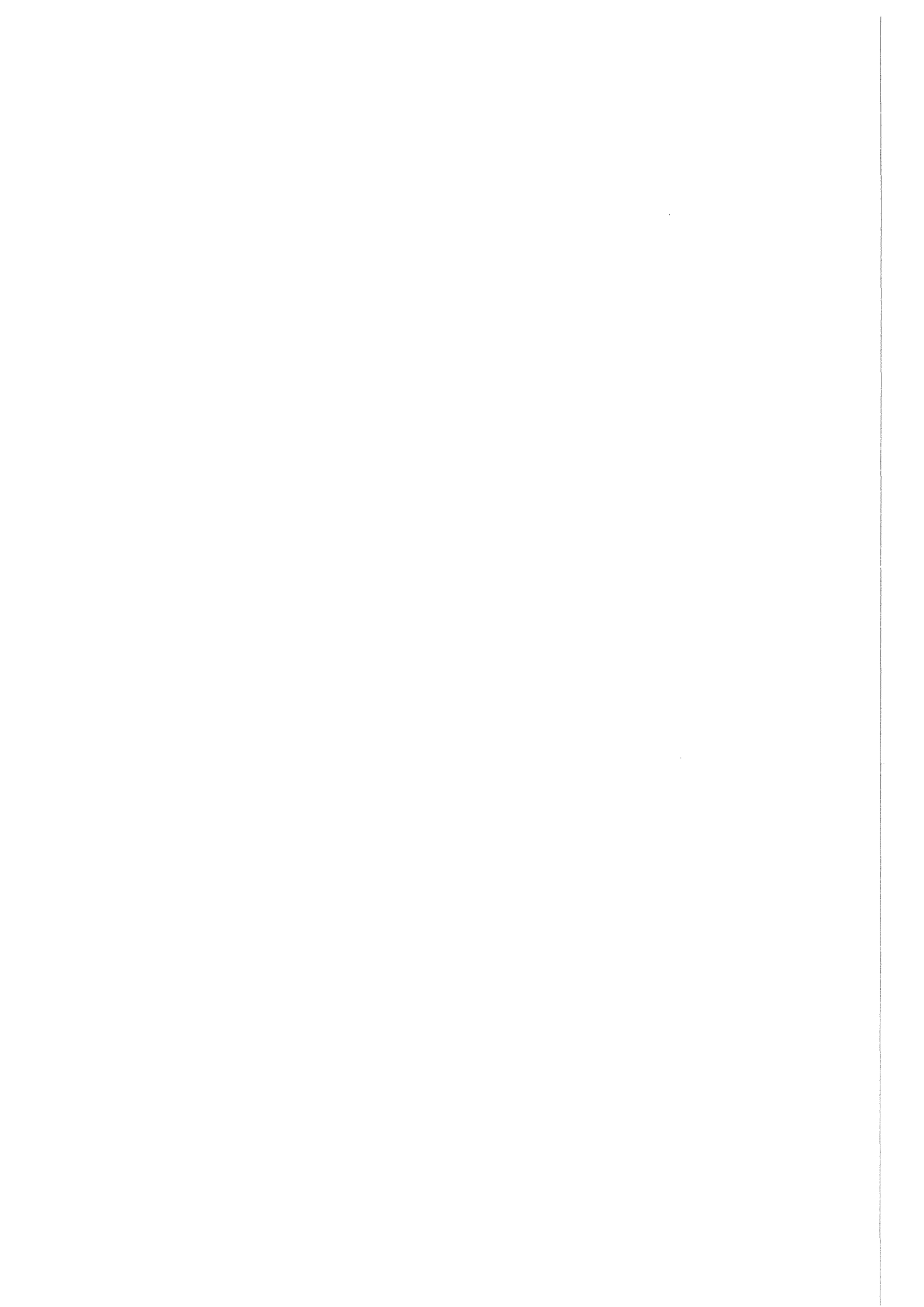
Der Inhalt dieser Arbeit ist vor dem Hintergrund der Entwicklung eines maschinell-lernenden-Systemes zu betrachten, das (technisches) Wissen automatisch akquiriert und validiert (vgl. Weinberger et al. /18/), und dient dabei sowohl als Einstieg, als auch als Überblick und als Bestandsaufnahme zum aktuellen Stand der Forschung auf diesem Gebiet, aus der Sicht der Lernpsychologie. In diesem Zusammenhang stellt sich natürlich die Frage, wie man getragen von der Idee des Maschinellen Lernens zur Lernpsychologie gelangt. Hierfür bieten sich jedoch gleich mehrere Ansatzpunkte:

- Das Prinzip der Reflexion kann im Bereich des Maschinellen Lernens durch eine Protokollierung im Sinne einer Historienbildung und deren statistische Bewertung modelliert werden.
- Lernen erfolgt durch Ableitung der Struktur und des Verhaltens des dynamischen Prozesses. Diese Ableitung erfolgt durch Prozesse der Clusterung, der Klassifikation und der Kategorisierung. Bis auf die Clusterung, die lediglich eine Strukturierung des "Rohwissens" im Sinne kausaler Zusammenhänge vornimmt, bilden die Sub-Prozesse der Differenzierung und der Generalisierung im Rahmen der Assimilation und der Akkommodation neuen Wissens das Gerüst der gesamten Vorgehensweise zum Aufbau einer dynamischen Wissensstruktur.
- Ein dem System auferlegter Zwang zur Klassifikation neuen Wissens versetzt es in die Lage einen kognitiven Konflikt erfolgreich simulieren zu können und sorgt somit dafür, daß Prozesse zur Veränderung der dynamischen Wissensstruktur angestoßen werden.
- Die Repräsentation des Wissens orientiert sich an dem lernpsychologischen Konzept der kognitiven Schemata. Dieses Konzept sieht Schemata als aktive und dynamische Strukturen zur Speicherung und Verarbeitung des Wissens vor, die sogar aktiv und steuernd in die Klassifikation neuen Wissens und den Problemlösungsprozeß eingreifen. Diese Schemata bilden die konzeptionell einheitliche Grundstruktur des zu erarbeitenden maschinell-lernenden Systemes und repräsentieren nicht nur faktisches, sondern auch prozedurales Wissen, z. B. in Form von Problemlösungsmethoden.
- In einer hierarchischen Anordnung bilden diese Schemata eine sehr stark vernetzte dynamische Struktur.

- Der Flexibilität der menschlichen Vorgehensweise im Rahmen des Problemlösungsprozesses soll dadurch Rechnung getragen werden, daß in dem zu erarbeitenden System sowohl eine attributgesteuerte, d. h. bottom-up, als auch eine schemagesteuerte, d. h. top-down, Verarbeitung vorgesehen wird.

In ähnlicher Weise wie in diesem Bericht, wird diese Vorgehensweise in den noch folgenden Berichten "Wissensbasierte Systeme - Darstellungs- und Verarbeitungsmodelle", Keller et al. /9/, und "Maschinelles Lernen - "klassische", konnektionistische und kognitive Konzepte", Weinberger et al. /18/, einmal aus der Sicht der Künstlichen Intelligenz und deren Verarbeitungsmechanismen und zum anderen aus der Sicht des Maschinellen Lernens fortgesetzt.

Durch diese "Trilogie" wird der interdisziplinäre Charakter, den die Forschungsaktivitäten im Bereich lernender Systeme aufweisen umfassend dargestellt und die Entstehung eines neuen Konzeptes, des "schematheoretischen Ansatzes für lernfähige wissensbasierte Systeme", sowie dessen Wurzeln aufgezeigt.



1 Lerntheorien

Da bis heute keine zufriedenstellende allgemeine Definition des Begriffes Lernen existiert, versucht man nicht alle verschiedenartigen Aspekte des Lernens durch ein Prinzip zu erklären, sondern man bedient sich verschiedener theoretischer Ansätze. Einige davon werden im folgenden kurz vorgestellt.

1.1 Reiz-Reaktions-Theorien

(1) Pawlow und das klassische Konditionieren:

Diese Theorie läßt sich am einfachsten durch den klassischen Versuch der Speichelabsonderung beschreiben:

Speichelfluß wird bei einem Hund durch Futterzufuhr, begleitet von einem, z. B. akustischen Signal, ausgelöst. Nach geraumer Zeit erfolgt der Speichelfluß bereits aufgrund des Signals; d. h. der Reflex (Speichelfluß) wird durch das Signal allein ausgelöst (konditioniert) und damit zu einem bedingten Reflex.

Unter **klassischem Konditionieren** versteht man die Koppellung von Reiz und Reflex.

Wird das Signal ohne Futtergabe gegeben, so bleibt nach kurzer Zeit der Speichelfluß aus, die Konditionierung wurde gelöscht.

(2) Thorndike und das Lernen durch Versuch und Irrtum:

Ein System, das nach dem Prinzip Lernen durch Versuch und Irrtum operiert genügt den folgenden Gesetzen:

- **Effektgesetz:**
Verhaltensweisen (als Reiz-Reflex-Verbindungen) treten dann mit höherer Wahrscheinlichkeit auf, wenn sie in der Vergangenheit zu einem befriedigenden Resultat geführt haben. (Es gilt ebenso die Umkehrung dieser Aussage).
- **Frequenz-Gesetz (Gesetz der Übung):**
Unter gleichen Bedingungen wird jede Reaktion auf eine Situation um so stärker mit der Situation verknüpft sein, je häufiger sie mit ihr in Verbindung gebracht wurde und je intensiver und anhaltender diese Verbindungen sind.

Nach Thorndike sind diese Gesetze nicht voneinander unabhängig, d. h. weder Bekräftigung ohne Übung, noch Übung ohne Bekräftigung führen zu einem dauerhaften Lernerfolg.

(3) Guthrie und die Kontiguitätstheorie:

(Theorie des raumzeitlichen Zusammentreffens von Reiz und Reaktion)

Diese Theorie besticht durch ihre Kürze und Einfachheit:

- **Kontiguitätsgesetz:**
Eine Kombination von Reizen, die mit einer Bewegung einhergeht, pflegt beim erneuten Auftreten diese Bewegung nach sich zu ziehen.

D. h. eine bestimmte Bewegung wird durch eine bestimmte Reizkombination entweder ausgelöst oder nicht; sie genügt folglich dem **Alles-oder-Nichts-Prinzip**.

(4) Skinner und das Operante Konditionieren:

Skinner's Theorie umfasst die Ansätze von Pawlow, Thorndike und Guthrie. Seine Untersuchungen basieren auf folgendem klassischen Versuch:

Eine Taube lernt schrittweise durch Versuch und Irrtum (Verhaltensformung durch "sukzessive Approximation" und Verstärkung von Partialverhalten), daß sie bei ertönen eines Signals eine "Zielscheibe" berühren muß, um Futter als Belohnung zu erhalten. Aus diesem Versuch konnte gefolgert werden, daß jeglicher Reiz dann ein Verstärker des Verhaltens ist, wenn er die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion erhöht.

Ein Verhalten ist dann besonders lösungsresistent (also dauerhaft gelernt), wenn in der Lernphase nicht jedes "richtige" Verhalten, sondern nur (planabhängig) intermittierend (zeitweilig aussetzend, wechselnd) bekräftigt wurde (es wird nicht jede, sondern nur jede 3. (oder 20. bzw. 100.) richtige Reaktion belohnt; oder die Belohnung erfolgt zeitversetzt).

1.2 Die kognitiven Theorien

Zwischen den Reiz-Reaktions-Theorien und den kognitiven Theorien bestehen die folgenden grundsätzlichen Unterschiede:

- Bei den Reiz-Reaktions-Theorien ging es darum, daß und nach welchen Gesetzen ein Umweltreiz mit einer Verhaltensweise gekoppelt wird. Das lernende Individuum blieb hierbei weitgehend außerhalb der Betrachtung. Man analysierte den Reiz als "Input" und die Reaktion als "Output".
- Die Reizsituation wird in den Reiz-Reaktions-Theorien viel eher physikalisch-psychologisch definiert, während man in den kognitiven Theorien die Reize mehr danach beschreibt, wie das Individuum sie erlebt.
- Die kognitiven Theorien sind in ihrem Grundsatz in viel höherem Maße "molar" oder "makroskopisch", also auf größere und komplexere Einheiten ausgerichtet als die Reiz-Reaktions-Theorien, die man im Gegensatz hierzu eher als "molekular" oder "mikroskopisch" bezeichnet, da bei ihnen die Elemente des Verhaltens in der Größenordnung der Muskelkontraktionen definiert sind.

1.2.1 Tolman und das Lernen von Zeichen

- **Orientierungslernen:**
Aus Versuchen mit Ratten in einem Labyrinth schloß Tolman, daß Organismen in der Regel nicht Bewegungsabfolgen bzw. Ketten von Muskelkontraktionen erlernen, sondern Orientierungen. D. h. gibt man ihnen Gelegenheit hierzu, so benutzen sie Reize der Umgebung als Hinweise für die Identifikation des Zieles und handeln dementsprechend "sinnvoll".
- **Latentes Lernen:**
Diesmal führte Tolman Versuche mit Ratten in einem komplizierteren Labyrinth durch. Er beobachtete dabei verschiedene, sich durch den Umfang der Belohnung unterscheidende Gruppen von Versuchstieren. Aus den Versuchsergebnissen zog er, unter anderem, die folgenden Schlußfolgerungen:
 - Es besteht ein Unterschied zwischen Lernen und Leistung (latentes Lernen).
 - Lernen, zumindest latentes Lernen ist ohne jede Form von Verstärkung und damit auch ohne jede Motivation möglich.

1.2.2 Der Grundgedanke der Gestaltpsychologie

Die Gestaltpsychologie (vgl. Rock et al. /14/ oder Joerger /5/) wurde von Max Wertheimer (1880 - 1943), Wolfgang Köhler (1886 - 1967) und Kurt Koffka (1886 - 1941) begründet. Stark vereinfacht kann man sagen, daß sich die Gestaltpsychologie mit der "Wechselwirkung" des Ganzen mit seinen einzelnen Komponenten beschäftigt, wobei man unter einer Gestalt eine strukturierte Gesamtheit versteht.

Den Hauptehtsatz der Gestaltpsychologie kann man wie folgt formulieren: "**Das Ganze ist verschieden von der Summe seiner Teile**". Durch diesen Lehrsatz wird insbesondere der Elementarismus verworfen, der auf der grundlegenden Annahme basiert, daß komplexe Wahrnehmungen durch Erforschung ihrer elementaren Bestandteile wahrgenommen werden. Die Gestaltpsychologie liefert beispielsweise eine Erklärung dafür, daß im Zuge der menschlichen Wahrnehmung die Punkte A und B den jeweiligen Kreisen zugeordnet werden, obwohl die Entfernung zwischen ihnen geringer als diejenige zu jedem anderen Punkt der Darstellung ist (Abbildung 1, diese findet sich in ähnlicher Form in Michalski et al. /12/).

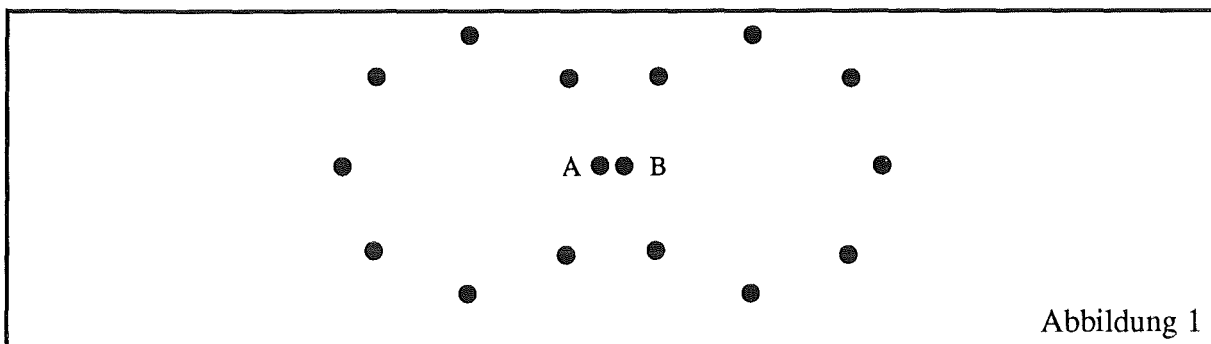


Abbildung 1

Die Grundthese (der Hauptlehrsatz) der Gestaltpsychologie findet sich heute in den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Gebieten, z. B. Lernpsychologie, Sozialpsychologie, Physiologie, Neurobiologie, Maschinelles Lernen, neuronale Netze, wieder.

Der Einfluß der Gestaltpsychologie beim Maschinellen Lernen (und dort speziell auf das conceptual Clustering, vgl. Michalski et al. /12/) besteht in der Tatsache, daß man bei der Kategorisierung von Situationen oder Objekten in der Regel eine konzept-sensitive, d. h. Hintergrundwissen oder Umweltinformationen einbeziehende Vorgehensweisen wählen muß, um zu guten Ergebnissen zu gelangen.

Die Gestaltpsychologie beeinflusste durch Köhlers mittlerweile widerlegte Theorie der "physischen Gestalten", die eine strukturelle Gleichheit (Isomorphie) des subjektiv Erlebten und den zugrundeliegenden Vorgängen im Nervensystem, bei minimaler Energie postulierte, die Theorie neuronaler Netze (vgl. McCord Nelson et al. /11/), da sich dort ein "Lernerfolg" im Fortschreiten des Systemzustandes in Richtung eines Gleichgewichtes, d. h. eines Zustandes minimaler Energie, widerspiegelt.

1.2.3 Piaget und die kognitive Struktur

1.2.3.1 Der Schemabegriff und die kognitive Struktur

Im folgenden wird der im Teilbereich der Kognitionstheorie, dem Wissenserwerb im schematheoretischen Ansatz, zentrale Begriff des Schemas eingeführt. Eine ausführliche Behandlung dieses Ansatzes erfolgt in Abschnitt 7.3.

Da Denkprozesse von anderen psychologischen Prozessen nicht scharf abgrenzbar sind muß man in eine Theorie des Denkens Hypothesen über Gedächtnisprozesse, wie Erinnern und Lernen mit einfließen lassen.

Nach Piaget ist das **Schema** die kleinste Einheit auf der menschliches (und weitgehend auch tierisches) Verhalten aufbaut; es ist entweder wie ein Reflex oder eine Instinkthandlung angeboren oder aufgrund vorangegangener Erfahrung erworben.

Ein Schema ist das Ergebnis eines ersten Abstraktions- oder Generalisierungsaktes des Individuums, aufgrund dessen von den konkreten Umständen und Gegebenheiten der Situation, unter der es erlernt wurde, abgesehen werden kann. Ein Schema kann damit als ein erster hypothetischer Bezugsrahmen angesehen werden, der wie eine Schablone an neue Erfahrungen angelegt wird.

Je nach Bereichen, in denen sie zum Einsatz kommen, unterscheidet man mindestens drei verschiedene Formen psychischer Schemata:

- (1) Sensomotorische Schemata
- (2) Kognitive Schemata.
Hierbei unterscheidet man zwei Untergruppen :

- Klassifikations-Schemata
- Erklärungs-Schemata.

(3) Evaluations-Schemata

Schemata sind im Gegensatz zu Signal-Reiz-Verbindungen abstrakt, d. h. sie lassen sich über den Wechsel äußerer Erscheinungen hinweg vielfältig unverändert anwenden. Sie zeichnen sich durch eine gewisse Starrheit aus und setzen dadurch Veränderungen einen gewissen Widerstand entgegen. Treten mehrere kognitive Schemata miteinander in Verbindung, so bilden diese ein Schema höherer Ordnung, eine **kognitive Struktur**.

Die kognitive Struktur bildet die geistige "Basisausstattung" für das Problemlösen. Eine solche "Basisausstattung" ist nach Dörner /4/ zum Problemlösen zwingend notwendig, denn das Individuum muß zumindest in der Lage sein, den angestrebten Zielzustand von anderen Sachverhalten zu unterscheiden; d. h. es benötigt hierfür ein **Kategoriensystem**, das Informationen über mögliche Sachverhalte enthält.

Durch Anwendung des biologischen Homöostase-Begriffes auf die menschliche Entwicklung und speziell die Entwicklung der Intelligenz kam Piaget zur Überzeugung, daß die Entwicklung - und speziell auch das Lernen - das Fortschreiten von Zuständen geringeren Gleichgewichts zwischen dem Organismus und seiner Umwelt zu Zuständen größeren Gleichgewichts darstellt.

Diese Anpassung oder Äquilibration (Gleichgewichtsherstellung) kann auf zweierlei Arten erreicht werden:

- **Assimilation:**
Die Einführung einer Umweltinformation in ein bereitstehendes Schema; dies ist ein aktiver Prozeß der Bedeutungsverleihung (Veränderung der Umwelt zur Anpassung an vorhandene Schemata).
- **Akkommodation:**
Die Veränderung eines Schemas in Richtung auf die Passung oder Stimmigkeit in bezug auf eine Umwelterfahrung (Veränderung der vorhandenen Schemata zur Anpassung an die Umwelt).

In diesem Sinne kann das menschliche Denken als dauerhaft zwischen Assimilation und Akkommodation oszillierender Prozeß verstanden werden (vgl. Abbildung 3, Abschnitt 3.3).

1.2.3.2 Die Stufenlehre Piagets

Zur Erläuterung des von Piaget verwendeten Begriffes der Operation betrachten wir die fünf Entwicklungsstufen menschlichen Verhaltens und Denkens, die ebenfalls auf Piaget zurückgehen:

- (1) Stufe der sensomotorischen Intelligenz (Geburt bis 2. Lebensjahr):
Das Verhalten des Kindes wird von seinem sensomotorischen Schema bestimmt, das Denken kann nicht von äußeren Handlungen abgegrenzt werden.
- (2) Stufe des vorbegrifflich-symbolischen Denkens (2. - 4. Lebensjahr):
Diese Stufe beginnt mit der "Objekt Konstanz", d. h. die Gegenstände der physischen Welt sind im "Bewußtsein" repräsentiert, auch wenn sie nicht mehr unmittelbar wahrgenommen werden können, und damit mit einem ersten **Invarianz-Schema**.
- (3) Stufe des anschaulichen Denkens (4. - 7. Lebensjahr):
Bestand in der ersten Stufe das **Wissen im Tun** und bezog es sich in der zweiten Stufe **auf das Tun** (oder das Ding), so bezieht es sich jetzt auf die Wahrnehmung oder **auf die wahrnehmbaren Merkmale** eines Gegenstandes oder einer beobachteten Handlung.

Wird in dieser Stufe auch ein neues Abstraktionsniveau erreicht, so sind damit auch die Grenzen aufgezeigt: Das Denken des Kindes ist in der eigenen Wahrnehmung, in der Anschauung des Wahrnehmbaren, gefangen.

- (4) Stufe der konkreten Operationen (7. - 12. Lebensjahr):
Das Ergebnis einer Handlung kann nun als Ereignis mit eigenem **Realitätscharakter** vom Handlungsgeschehen als solchem abstrahiert werden (dieser Entwicklungsschritt wird jedoch nicht generell vollzogen).

In dieser Stufe kann ein Kind zum ersten Mal erkennen, daß man eine Handlung ungeschehen machen kann, indem man sie in umgekehrter Richtung in Gang setzt. Dieser **vollen Reversibilität** eines kognitiven Schemas gehen Vorformen voraus, die eine immer größer werdende Beweglichkeit, mit dem Endstadium der vollen Beweglichkeit kognitiver Schemata beinhalten. Mit der Reversibilität des kognitiven Schemas wird das möglich, was Piaget eine **Operation** nennt.

Eine Operation, in diesem Sinne, ist eine verinnerlichte Handlung des Individuums, die frei von der engen Bindung an die tatsächliche ausgeführte Handlung ist, d. h. sie ist eine verinnerlichte Handlung mit maximaler Mobilität.

Diese Abstraktionsleistung bezieht sich nicht auf jede denkbare Handlung, sondern bezieht sich nur auf Handlungen, mit denen hinreichende Erfahrungen gemacht wurden. Hieraus wird bereits ersichtlich, daß man eigentlich nicht von generellen Entwicklungsstufen sprechen kann. Dies ist auch eine häufig geäußerte Kritik an Piagets Stufenlehre.

- (5) Stufe der formalen Operatoren (ab dem 12. Lebensjahr):
Diese Stufe bringt die Fähigkeit, mit den Operationen selbst wieder zu operieren, d. h. Operationen zweiten Grades zu vollziehen. Es handelt sich hierbei um das **Denken in Möglichkeiten**, das auch das rein formale Schließen aufgrund hypothetischer Annahmen möglich macht. Diese Stufe wird nicht mehr von jedem Individuum erreicht.

1.2.3.3 Berlyne und die Theorie des kognitiven Konfliktes

Betrachtet man die Stufenlehre Piagets, so stellt sich die Frage, wie sich beim Kind ein Lern- bzw. Entwicklungsfortschritt einstellt und wodurch dieser ausgelöst wird. Der Forscher Berlyne beantwortet diese Frage durch die **Theorie des kognitiven Konfliktes**.

Ein kognitiver Konflikt tritt ein, wenn der Organismus bei der Wahrnehmung von Umweltreizen auf Informationen trifft, die er nicht assimilieren bzw. kognitiv verarbeiten kann (= kognitiver Konflikt). Dadurch wird das Aktivationsniveau erhöht und die ausgelöste Aktivität zielt auf eine Reduktion des Aktivationsniveaus und mobilisiert dazu die operatorischen Systeme. Gelingt aufgrund der in Gang gesetzten Operationen eine Assimilation, so ist der kognitive Konflikt gelöst; die kognitiven Schemata sind differenzierter und umfassender geworden (akkommodiert), d. h. es wurde gelernt.

Gelingt eine Assimilation nicht, so steigt das Aktivationsniveau bis zum Grenzwert; danach versucht der Organismus den konflikterzeugenden Umweltreiz zu meiden.

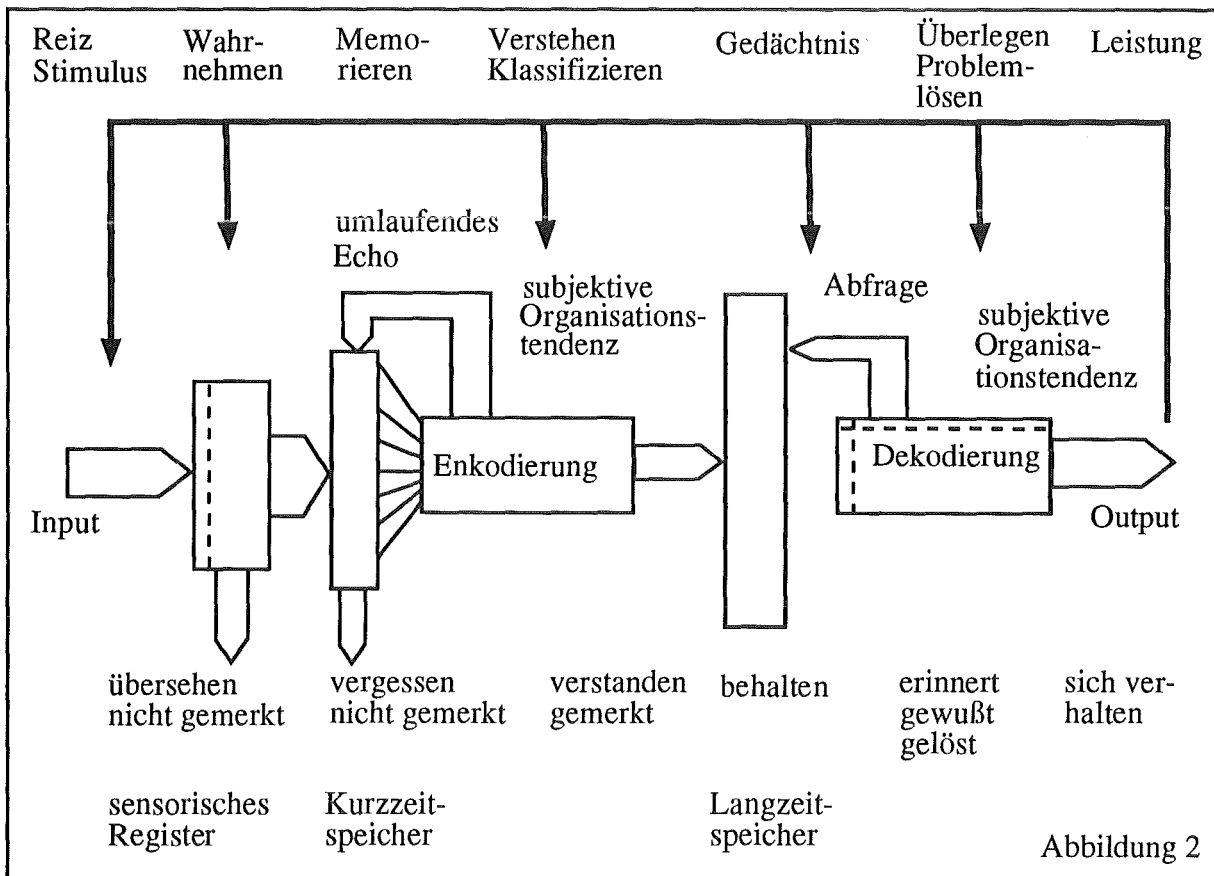
Den Ausgangspunkt um in eine kognitive Konfliktsituation zu gelangen sieht Berlyne in der dem Menschen innewohnenden epistemischen Neugier, dem Bestreben des Menschen, eine Ordnung in die Erscheinungen seiner Umwelt zu bringen respektive seine Umwelt als überzufällig und geordnet zu verstehen.

1.3 Das Flußdiagramm des Lernprozesses

Schematisch kann der Lernprozeß wie folgt in einem Flußdiagramm (Abbildung 2, wie in Joerger /5/) dargestellt werden.

Als Erläuterung zu Abbildung 2 dient die folgende Erklärung des Begriffes **subjektive Organisationstendenz**: Unter einer subjektiven Organisationstendenz versteht man den Vorgang, bei dem das Individuum das kognitive Material in einer stets ähnlichen und für es selbst typischen Weise ordnet und abruft.

Über die Effektivität des Lernprozesses kann man sagen, daß optimale Lernbedingungen bestehen, wenn die Anforderungsstruktur der Aufgabe der kognitiven Struktur und subjektiven Organisationstendenz des Individuums entspricht.



2 Problemtypen

2.1 Einleitung

Bevor man sich mit verschiedenen Problemtypen beschäftigt, gilt es zunächst zu klären, was eigentlich ein Problem ist und wodurch es sich charakterisieren läßt.

Ein Individuum steht einem Problem gegenüber, wenn es sich in einem Zustand befindet, den es nicht für wünschenswert hält, aber im Moment nicht über die Mittel verfügt, diesen unerwünschten Zustand in einen wünschenswerten Zustand zu überführen. Dies bedeutet, daß das Individuum beim Auftreten eines Problems bemüht ist, ein größtmögliches Gleichgewicht zwischen dem Organismus und seiner Umwelt herzustellen (Äquilibration), d. h. eine maximale Anpassung (Adaption) zu ermöglichen. Dies ist eine Art Gleichgewichtstheorem, das Piaget als Übertragung des biologischen Homöostase-Begriffs für das Gleichgewicht der physiologischen Körperfunktionen auf psychologische Sachverhalte betrachtete (vgl. Abschnitt 1.2.3.1).

Ein Problem besteht aus den folgenden drei charakteristischen Komponenten:

- (1) Einem unerwünschten Anfangszustand,
- (2) einem erwünschten Endzustand und
- (3) einer Barriere, die momentan die Transformation des Anfangs- in den Endzustand verhindert.

Diese Barriere ist für ein Problem insofern charakteristisch, als daß es sich dadurch von einer Aufgabe unterscheidet und daß eine Unterscheidung nach Problemtypen möglich wird.

Der hier beschriebene Ansatz der Wissensrepräsentation ist eng am Ansatz der Problemlöseforschung und der Beschreibung von Problemlösungsprozessen (im Sinne algorithmischer Aufgabenbewältigungen) und den in diesem Kontext relevanten Beschreibungskategorien wie Anfangszustand, Zielzustand, Barriere orientiert. Diese Form der Darstellung empfiehlt den Ansatz von Dörner für die Abbildung von algorithmischem Handlungswissen, sofern eine Darstellung in Netzwerkform vorgesehen ist, wobei sich die Beschränkung auf drei Relationsarten (vgl. Abschnitt 3.1) negativ auswirken kann (Tergan /17/).

2.2 Drei Klassen von Problemtypen

Es werden die folgenden drei Problemtypen unterschieden:

- (1) Interpolatorischer Problemtyp:
Anfangs- und Endzustand sowie eine Reihe von Operationen sind bekannt. Die Barriere besteht darin, die richtige Kombination oder Folge aus der Reihe bekannter Operationen zu bilden. "Man weiß was man hat, was man will und man kennt auch die Mittel".
- (2) Synthetischer Problemtyp:
Anfangs- und Endzustand sind bekannt, unbekannt ist nicht nur die spezifische Kombination von Operationen, sondern es besteht Grund zur Annahme, daß auch wichtige Einzeloperationen nicht bekannt sind oder nicht in Betracht gezogen wurden; es handelt sich um Probleme mit offenem Operatorinventar.
- (3) Dialektischer Problemtyp:
Dies ist derjenige Problemtyp, den man im Alltagsleben am häufigsten antrifft. Es ist hierbei der Anfangszustand und unter Umständen bestimmte, jedoch zumeist nicht klar faßbare Kriterien (häufig Komparativkriterien, wie z. B. "schöner als") bekannt. D. h. "man weiß nicht genau was man will, man weiß nur, daß sich etwas ändern muß".

Die Lösung solcher Probleme wird zumeist in einem dialektischen Prozeß gefunden, d. h. Vorschläge bzw. Entwürfe für den Zielzustand werden auf Widersprüche überprüft und entsprechend verändert.

Selbstverständlich besteht eine Abhängigkeit des Problemtyps vom Individuum, dem Problemlöser. Dies ist unmittelbar einsichtig, wenn man z. B. unterschiedliches Vorwissen berücksichtigt.

3 Allgemeine Überlegungen zum Problemlösen

Durch die folgende Analyse soll eine allgemeine Psychologie des Problemlösens und vernünftigen Handelns ermöglicht werden. Als formale Voraussetzungen zur Problemlösung benötigt man Sachverhalte und Kenntnisse über Operatoren, mit deren Hilfe Sachverhalte umgewandelt werden können.

Operatoren sind Handlungen in allgemeiner Form, die auf Objekte, d. h. Teile von Sachverhalten einwirken; wohingegen **Operationen** die konkrete Realisierung derselben darstellen.

Beim Problemlösen geht es immer um die Umwandlung bestimmter Sachverhalte mit Hilfe bestimmter Operatoren; diese beiden Dinge charakterisieren einen **Realitätsbereich**. Formal läßt sich ein Realitätsbereich als ein Netzwerk, gebildet aus den Sachverhalten, die umgewandelt werden und den Umwandlungsmitteln, den Operatoren definieren.

Vor diesem Hintergrund des Realitätsbereiches kann man das Problemlösen als Prozeß des Auffindens eines Weges im Labyrinth der möglichen Wege betrachten. Da die Operatoren des einen Realitätsbereiches die Sachverhalte eines anderen sein können, kann man von einer **hierarchischen Struktur des Netzwerkes** ausgehen.

Die Kenntnis der Operatoren kann mehr oder weniger eng mit der Kenntnis der möglichen Sachverhalte verknüpft sein. Durch die Kenntnis der Sachverhalte und der anwendbaren Operatoren erzeugt der Problemlöser quasi ein Bild des entsprechenden Realitätsbereiches, innerhalb dessen er sich dann bewegen kann.

Diesen somit aufgebauten Teil der kognitiven Struktur nennt man **epistemische Struktur (ES)**. Es sei hier explizit darauf hingewiesen, daß die ES sowohl Sachverhalte, als auch Operatoren enthält; es existiert demnach keine völlig autonome Datenbasis!

Aus der Unterscheidung der Begriffe Problem und Aufgabe (vgl. Abschnitt 2.1) wird bereits ersichtlich, daß die ES zum Problemlösen nicht ausreicht, da man die entsprechende Problemlösungsmethode nicht immer aus dem Gedächtnis abrufen kann. Folglich benötigt der Problemlöser Konstruktionsverfahren zur Generierung unbekannter Problemlösungsmethoden.

Hierzu verfügt der Problemlöser über Konstruktionsverfahren als mehr oder minder präzise festgelegte Pläne zur Konstruktion von Transformationen eines gegebenen Sachverhaltes in den Gesuchten. Solche Konstruktionsverfahren bezeichnet man als **Heurismen** (= Findungsverfahren) und man nennt die Gesamtmenge solcher Pläne und ihre Organisation im Gedächtnis eines Problemlösers **heuristische Struktur (HS)**.

Tergan /17/ vergleicht die heuristische Struktur mit einer mentalen Bibliothek, die Pläne für bestimmte Konstruktionsverfahren (Heurismen), d. h. Verfahren oder Denkmethode, die geeignet sind, in Problemsituationen Lösungswege aufzufinden und zu konstruieren, enthält.

Das Wissen um Lösungsalgorithmen bei einfachen Aufgabenlösungen ist demnach in der epistemischen Struktur repräsentiert, das Wissen um Prozeduren und Operationen, im Sinne des Wissens, wie auf der Grundlage vorhandener Prozeduren und Operationen für neue,

Allgemeine Überlegungen zum Problemlösen

komplexe Problemlösungen angemessene Vorgehensweisen entwickelt und eingesetzt werden können, in der heuristischen Struktur.

Um den Unterschied herauszustellen: Die ES bestimmt die reproduzierenden, und die HS die produktiven Fähigkeiten. In der Theorie Piagets werden diese Fähigkeiten durch **Assimilations-** bzw. **Akkommodationsprozesse** realisiert.

Die Art des geeigneten Problemlösungsprozesses ist abhängig von dem Problemtyp und den Eigenschaften des Realitätsbereiches, die sich aus den Eigenschaften der jeweiligen Sachverhalte und der Operatoren des Bereiches zusammensetzen.

Sachverhalte sind in den häufigsten Fällen strukturiert; sie sind gewöhnlich ein gegliedertes Ganzes, in dem einzelne Komponenten durch Verknüpfungen in einer bestimmten Form zu **Subsachverhalten** zusammengesetzt sind.

Zur Klassifizierung von Sachverhalten verschiedener Realitätsbereiche kann man unter anderem folgende Dimensionen heranziehen:

- **Komplexität:**
Anzahl der Komponenten, Vielfachheit der Vernetzungen untereinander.
- **Dynamik:**
Ein Sachverhalt ist dynamisch, wenn sich auch ohne Eingriff des Problemlösers die Situation verändert.
- **Vernetztheit:**
Stichwort Nebenwirkungen und deren Analyse.
- **Transparenz:**
Ist eine direkte Feststellung der Merkmale möglich oder muß man auf "Symptome" zurückgreifen?

Zur Charakterisierung von Operatoren kann man die folgenden Kriterien heranziehen:

- **Wirkungsgrad:**
Anzahl der veränderten Merkmale eines Sachverhaltes.
- **Reversibilität:**
Dadurch kann man Lösungen durch "spielerisches" Probierverhalten finden, evtl. Übergang zu Modellen.
- **Größe des Anwendungsbereiches:**
Diese ist abhängig von der Anzahl der Bedingungen im Operator, evtl. Bildung von Zwischenzielen.
- **Wirkungssicherheit:**
Die Wahrscheinlichkeit, mit der der Operator ein bestimmtes Ergebnis erzielt (Vorausplanung).

- Materielle und zeitliche "Kosten" des Operators:
Energieaufwand, Zeitdauer.

Ein Operatorsystem wird wesentlich durch seine **Grund-** oder **Elementaroperatoren** beeinflusst. Jedoch genügt es nicht allein diese Grundoperatoren zu beherrschen vielmehr kommt es darauf an, **Makrooperatoren**, d. h. aus mehreren Grundoperatoren gebildete Operatoren höherer Ordnung zu bilden oder irgendwoher zu übernehmen.

Im Unterschied zur Übernahme bestehender Makrooperationen bereitet die Bildung neuer Makrooperatoren Mühe.

Wird das Denken im jeweiligen Bereich von einem System von Makrooperatoren kanalisiert, so kann sich dies auch nachteilig auf den Problemlösungsprozeß auswirken, man denke hierbei nur an die sogenannte "Fachblindheit".

Man unterscheidet Operatoren nach den folgenden Wirkungsformen:

- Anfügeoperatoren (Anfügen von Komponenten an Objekte),
- Trennoperatoren (Lösen zuvor verknüpfter Objekte),
- Tauschoperatoren (Austausch zweier Komponenten eines Objektes),
- Wandlungsoperatoren (Veränderung des Zustandes einer Komponente).

3.1 Die Abbildung von Realitätsbereichen im Gedächtnis

Wegen der untrennbaren Verknüpfung der Informationsverarbeitung beim Problemlösen mit dem Gedächtnis; "das eine ist das Medium, das andere der darin stattfindende Prozeß", kann die Gedächtnisstruktur und damit verbunden die Wissensrepräsentation nicht außer acht gelassen werden.

Bei der **Gedächtnisstruktur** unterscheidet man die folgenden drei Komponenten:

- Sensorischer Speicher (Abbild der Reizsituation)
- Kurzzeitgedächtnis (beschränkte Kapazität)
- Langzeitgedächtnis (anscheinend unbegrenzte Kapazität).

Da der Gedächtnisstoff aus unterscheidbaren Elementen besteht, die untereinander in bestimmter Weise verknüpft sind, d. h. er ist **strukturiert**, kann das Gedächtnis als ein **aktives semantisches Netzwerk** modelliert werden.

Allgemeine Überlegungen zum Problemlösen

Ein solches Netzwerk besteht aus Knotenpunkten, die durch gerichtete Pfeile verschiedener Art, die semantische Relationen repräsentieren, verknüpft sind. Die **Bedeutung eines Sachverhaltes** geht dann aus seiner Stellung im semantischen Netz hervor.

In einem solchen Netzwerk können Lernprozesse durch Anfügen neuer Knoten (**Akkommodation**) bzw. durch Umstrukturierung (**Assimilation**) ausgedrückt werden.

Bei der Untersuchung der Beziehung zwischen den Begriffen und ihren Inhalten findet man drei große Gruppen von semantischen Relationen:

- Teil-Ganzes-Relation ("besteht aus", "hat"),
- Abstraktheits- oder Oberbegriffs-Unterbegriffs-Relation ("ist ein"),
- Raum-zeitliche-Relation ("folgt auf", "a verursacht b").

Begriffe beziehen sich auf **Begriffsinhalte**; Begriffsinhalte können innere Bilder von Sachverhalten eines Realitätsbereichs oder auch Handlungsprogramme sein. Die Gesamtmenge der Bilder der Sachverhalte eines Realitätsbereichs und die Menge der Handlungsprogramme (Operatoren) ist dessen Abbild; dies hat die grobe Form einer **Doppelhierarchie**. Die eine Gruppe von Hierarchien wird dabei durch Teil-Ganzes-Relationen gebildet, die andere durch Abstraktheits-Relationen.

Im Gedächtnisbild eines Realitätsbereiches kann man zwei große Teilbereiche unterscheiden, den **sensorischen** und den **motorischen Teil**. Der sensorische Teil enthält Informationen über Dinge und Vorgänge, die im jeweiligen Realitätsbereich als Sachverhalte auftreten und der motorische Teil enthält Informationen darüber, wie das Individuum in das Geschehen im Realitätsbereich eingreifen kann, welche Folgen dies hat (Ausgangssachverhalte) und unter welchen Bedingungen es geschehen kann (Eingangssachverhalte).

Die hier dargestellte Struktur bestehend aus dem aktiven semantischen Netzwerk und den drei Relationsarten ist ein Versuch, die Frage nach der allgemeinen Form von Gedächtnisbildern für verschiedene Realitätsbereiche zu beantworten.

Bisher blieben die raum-zeitlichen-Relationen in der Darstellung unberücksichtigt. Die Untersuchung dieses Relationstyps tritt jedoch sofort in den Vordergrund, wenn man sich mit der Frage beschäftigt, wie Sachverhalte und Operatoren im Gedächtnis abgebildet werden.

Fast jeder interessante Sachverhalt ist eine **Komplexion**, d. h. er besteht aus Teilen, die in einer bestimmten raum-zeitlichen Ordnung verknüpft sind. Was man in unserer Sprache gewöhnlich als Substantiv bezeichnet, "ein Ding", ist eine Komplexion, für die die räumlichen Relationen der Teile zueinander bedeutsam sind. Was wir in unserer Sprache dagegen mit einem Verb bezeichnen ist eine Komplexion, für die die zeitlichen Relationen der Teile zueinander bedeutsam sind.

Komplexionen können individuell verschieden sein. Die Bilder von Sachverhalten unterscheiden sich nicht nur nach ihrer Stufe in der Komplexionshierarchie, sondern zusätzlich noch nach ihrer Stufe in der **Abstraktionshierarchie**.

Das abstrakte Bild eines Sachverhaltes unterscheidet sich von einem Konkreten darin, daß es "Leerstellen" oder "Unschärfstellen" aufweist. Je abstrakter dieser Sachverhalt abgebildet wurde, desto mehr Leerstellen enthält das entsprechende Gedächtnisbild.

Es gibt mehr oder minder komplexe und mehr oder minder abstrakte Bilder von Sachverhalten. Diese Begriffsbildung findet sich in ähnlicher Weise auch in der Piagetschen Lehre wieder; denn sowohl ein Schema, als auch die kognitive Struktur umfassen mehr oder minder komplexe und abstrakte Bilder von Sachverhalten.

Wie oben bereits dargestellt, benötigt der Problemlöser außer der Kenntnis der Sachverhalte noch bestimmte Operatoren. Daher ist das bisher geschilderte "innere Modell" der Außenwelt im menschlichen Gedächtnis fast nie ohne ein **Operatorgedächtnis**, d. h. ohne eine Verknüpfung von Handlungsprogrammen, die der Problemlöser aktivieren kann, vorhanden. Das Operatorgedächtnis integriert das Individuum in den Realitätsbereich, indem es ihm die Möglichkeit gibt, sich darin zu bewegen. Man kann sich das Operatorgedächtnis analog zu dem bisher geschilderten Gedächtnis vorstellen.

Im Gedächtnis besteht eine Handlung aus dem Bild des Eingangssachverhaltes ("Eingangsschema"), dem motorischen Programm und dem Bild des Ausgangssachverhaltes ("Ausgangsschema"). Vom Bild eines Prozesses unterscheidet sich das innere Bild einer Handlung darin, daß es zusätzlich mit einem motorischen Programm verknüpft ist.

Vollkommen analog zu den Bildern von Sachverhalten unterscheidet man Handlungen ebenfalls nach Komplexitäts- und Abstraktionsstufen. Diese Analogie setzt man dahingehend fort, daß man auf der Handlungsseite für die Beziehungen zwischen den Handlungen und ihren Inhalten die gleichen Gruppen von Relationen verwendet wie bei Sachverhalten.

Das hier geschilderte Netzwerk als Abbild eines Realitätsbereiches gestattet dem Individuum bis zu einer bestimmten Grenze das Handeln innerhalb des Realitätsbereiches. Es befähigt das Individuum zum Lösen von Aufgaben, sofern Eingangs- und Ausgangsverhalten und die entsprechenden Handlungen und Handlungsketten bereits im Gedächtnis gespeichert sind.

Bisher wurde nur geschildert wie die ES beschaffen ist. Da zur Problemlösung im allgemeinen sowohl die ES, als auch die HS benötigt werden, stellt sich die Frage, wie diese beiden Strukturen verknüpft sind.

Ein Versuch diese Verknüpfung zu beschreiben ist die sogenannte **Tintenfischhypothese**:

Ein Tintenfisch hält mit seinen Fangarmen ein Fischernetz; die von den Fangarmen bedeckten Knoten des Netzes entsprechen den Inhalten des Kurzzeitgedächtnisses und das Weitertasten des Tintenfisches, ausgehend von diesen Knoten zu anderen Knoten simuliert heuristische Prozesse. Um das Netz zu erweitern bzw. zu verändern sei dieser hypothetische Tintenfisch mit einer Schere und mit Strickzeug ausgestattet.

Mit der Struktur von Heurismen werden wir uns im Abschnitt 3.3 genauer befassen.

3.2 Denken als interpretativer Prozeß

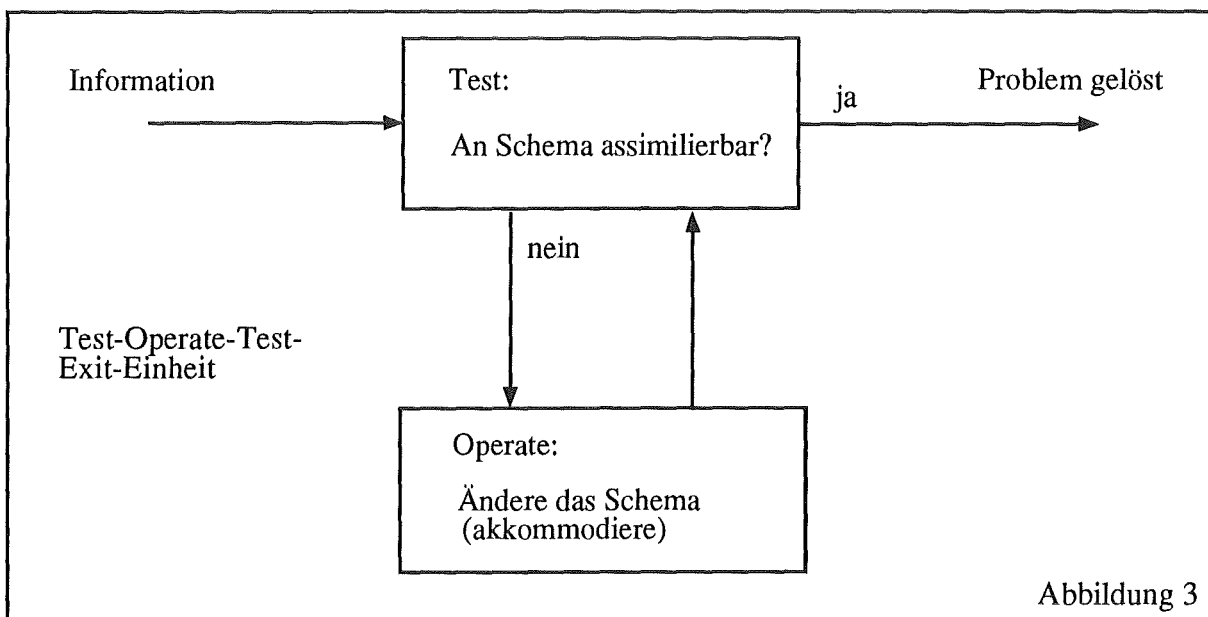
Sieht man das Denken als "interpretativen Prozeß", so bildet das semantische Netz dafür die Datenbasis und repräsentiert mit seiner Struktur das Langzeitgedächtnis. Der interpretative Prozeß besteht darin, daß bestimmte Knoten des Netzes, als Repräsentanten des Kurzzeitgedächtnisses, ausgewählt werden und das Umfeld dieser Knoten abgesucht und verarbeitet wird.

3.3 Heurismen

Heurismen sind gewissermaßen Programme für die geistigen Abläufe, durch welche Probleme bestimmter Form unter Umständen gelöst werden können. Diese stehen im Gegensatz zu elementaren geistigen Operationen, die gewöhnlich keine Rolle als selbständiger geistiger Prozeß spielen, sondern lediglich als Komponenten eines solchen auftreten.

Bei der Analyse des Problemlösungsvorganges kann man folgendes feststellen:

- Der Denkvorgang besteht aus einer Abfolge von unterscheidbaren geistigen Operationen, z. B. Veränderungsprozessen, die aus gegebenen Informationen neue Informationen oder Hypothesen produzieren.
- Die Teilprozesse sind nicht willkürlich aneinandergereiht; auf einen Veränderungsprozeß folgt bevorzugt ein Prüfprozeß.
- Die Organisation des Problemverwaltungsprozesses scheint mehrschichtig zu sein.



Nach dieser Analyse des Problemlösungsvorganges kann man ihn modellhaft durch die **TOTE-Einheit** (Abbildung 3, wie bei Joerger /5/) beschreiben. Die TOTE-Einheit kann bei

der weiteren Überlegung als kleinste Einheit (Element) des Lern- bzw. Entwicklungsprozesses herangezogen werden.

Die Koppelung geistiger Operationen nach dem TOTE-Schema kann sehr komplex werden, da die O-Stufen bestimmter TOTE-Einheiten ihrerseits aus T- und O-Einheiten zusammengesetzt werden können (z. B. Kaskadenorganisation).

Wahrscheinlich entwickeln sich differenziertere Heurismen aus einfachen. Hierfür ist die **Verhaltensformung** aufgrund zufälliger Veränderungen und Bekräftigungen bei Erfolg bedeutsam aber auch die **Selbstreflexion**, d. h. die Analyse der Denkformen durch das Denken und die bewußte Neukombination von Lösungsschritten.

3.4 Die Organisation der heuristischen Struktur

Zwei verschiedene Probleme des gleichen Problemtyps, die beispielsweise verschiedenen Realitätsbereichen angehören, erfordern zwar den gleichen Heurismus in der Grobform, d. h. sie sind "prinzipiell" durch den gleichen Heurismus lösbar, jedoch können sich die mentalen Operationen in der Feinform, diese bezieht sich auf die "Problemaufbereitung" vor der Anwendung des Heurismus, unterscheiden.

Die Anpassung einer mentalen Operation an die jeweiligen Gegebenheiten kann durch Kontrollprozesse (einen solchen modelliert die TOTE-Einheit) geschehen, die an geeigneter Stelle in den Operator eingebaut sind. Zusätzlich zu den bisher behandelten Heurismen gibt es in der HS noch sogenannte **Makroheurismen**, also Organisationen von gewöhnlich selbständigen Programmen zu größeren Einheiten. Sie sind durch einen in der Selbstbeobachtung und der Verhaltensbeobachtung ziemlich deutlichen Umschaltprozeß gekennzeichnet. Beispielsweise findet beim Wechsel von exakter Analyse zum "blinden" Probieren ein Wechsel zwischen dem analytischen- und dem Versuch-Irrtum-Heurismus statt; diese bilden einen Makroheurismus.

Bisher wurde nur die Möglichkeit betrachtet den Heurismus, d. h. die **kognitive Strategie** zur Problemlösung zu wechseln; eine andere Möglichkeit besteht darin, die Strategie beizubehalten und das Problem zu wechseln, d. h. nicht mehr der ursprüngliche, sondern ein anderer Zielzustand wird angestrebt. Beim Problemwechsel unterscheidet man die folgenden Formen:

- Übergang zu einem übergeordneten Problem.
- Verallgemeinerung des Zielzustandes.
- Übergang zu nebengeordneten oder analogen Problemen (z. B. Umformulierungen).
- Selbstreflexion.

Allgemeine Überlegungen zum Problemlösen

Zusammenfassend erhält man folgende Bestandteile für ein Gedankenmodell der heuristischen Struktur:

- Analysator (für Eigenschaften von Problemen und Aufgaben).
- Speicher (für Lösungsmethoden (Heurismen)).
- Kontrollsystem (zur Feststellung von Erfolg bzw. Mißerfolg der angewandten Lösungsmethoden).

Die Unterscheidung von zwei Strukturen (ES und HS) zur Bewältigung von Anforderungen, legt die Unterscheidung von zwei Formen der Intelligenz nahe. Zwischen diesen beiden Formen der Intelligenz bestehen teilweise sogar konträre Beziehungen. Dies kann man dadurch verdeutlichen, daß ein Individuum in einem Bereich kaum seine HS benötigt, wenn es dort über ein sehr ausgeprägtes Wissen verfügt.

4 Verschiedene Problemlösungsstrategien

4.1 Problemlösen als individueller Lernprozeß

Im folgenden verstehen wir wie Joerger /5/ unter einem Problem entweder ein Interpolationsproblem oder ein synthetisches Problem. Damit ist ein Problem dann gegeben, wenn ein Individuum ein bestimmtes Ziel erreichen will, jedoch nicht weiß, wie es zu diesem Ziel gelangen kann.

Da das Individuum während des Problemlösens noch "im Lernen" ist, kann man das Problemlösen als Teil des Lernprozesses auffassen. Im Sinne Piagets bezeichnet man Problemlösen als denjenigen Vorgang, in dessen Verlauf es zu Umstrukturierungen (Assimilationen) und Neuorganisationen (Akkommodationen) kommt.

Bei einem Individuum kann man drei Phasen des Problemlösungsverhaltens beobachten:

- (1) Versuch-und-Irrtum-Phase:
Relativ blindes Probieren; mehr oder weniger willkürlich werden Teile der Problemsituation zur Suche nach Gesetzmäßigkeiten miteinander in Verbindung gebracht.

Diese Phase tritt häufig bei komplexen Problemen auf, die nicht auf Anhieb überschaubar sind.

- (2) Phase der plötzlichen Reorganisation (Einsicht, Umstrukturierung):
Die bestehende Konfusion ist beseitigt. Beim Individuum besteht die subjektive Überzeugung, daß es der Lösung nahe ist.

Im Augenblick der Reorganisation erlebt sich das Individuum häufig als passiv und rezeptiv; zwischen der ersten und zweiten Phase besteht bisweilen eine Übergangsphase, die man als "latentes Denken" bezeichnet: Fixiert man den "Blick der Aufmerksamkeit" nicht auf den Punkt der scharfen Wahrnehmung, dann ist man offen für Einfälle, die neben der möglicherweise blockierenden und vordergründigen Sichtweise liegen.

- (3) Phase der schrittweisen Analyse:
Die Konzentration der Aufmerksamkeit liegt auf den Erfordernissen des erstrebten Zieles, auf den spezifischen Merkmalen und den Forderungen dessen, was erreicht werden soll. Es kommt dann zu schrittweiser, allmählicher Erkenntnis des Lösungsweges und zum Verstehen der Lösungsmethoden.

4.2 Lösen von Interpolationsproblemen

In einer heuristischen Prozedur zur Lösung von Interpolationsproblemen können die folgenden fünf Teilabläufe (Strategien zur Lösung von Teilproblemen) unterschieden werden:

- (1) Situations- und Zielanalyse zur Feststellung der Eigenschaften des gegebenen und des gesuchten Sachverhalts mit nachfolgendem Vergleich zur Ermittlung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden (Ähnlichkeits- bzw. Differenzmaß). Hieraus ergibt sich eine Absichtsliste zur Beseitigung der Unterschiede, d. h. eine Liste aller zu erledigenden Anforderungen.
- (2) Operatorsuche zur Erfüllung der Absichten:
Kennt man die Wirkung der Operatoren, so kann man spezifisch für die einzelnen Anforderungen Operatoren auswählen. Gewöhnlich kann man die Anforderungen nicht einfach "abarbeiten"; vielmehr muß man sie nach bestimmten Kriterien rangieren, die von der Art der Operatoren abhängig sind, mit denen die Anforderungen erfüllt werden können.

Solche Kriterien sind:

- Erfülle diejenigen Anforderungen zuerst, für die man Operatoren benutzen kann, die nicht die Voraussetzungen anderer notwendiger Operatoren zerstören.
 - Nebenwirkungen:
Erfülle diejenigen Anforderungen zuerst, die mit den Operatoren mit dem breitesten Wirkungsspektrum erfüllt werden können. Später erst sollen die Anforderungen erfüllt werden, die mit einem Operator mit schwächerem Wirkungsspektrum erfüllt werden können.
(Ein Flußdiagramm zur Operatorauswahl für eine gegebene Liste von Anforderungen befindet sich in Dörner /4/, S. 63).
- (3) Operatoranwendung und Erfolgsanalyse:
Eine Möglichkeit der Erfolgsanalyse wird hier exemplarisch demonstriert:

$$(\Delta(\alpha, \omega) \cap \Delta(\alpha', \omega)) \subset \Delta(\alpha, \omega),$$

wobei α := Anfangs-, ω := End- und α' := Zwischenzustand, sowie

$$\Delta(\alpha, \omega) := \{ \text{Die zu beseitigenden Unterschiede, um vom Zustand } \alpha \text{ in den Zustand } \omega \text{ zu gelangen} \} \text{ ist.}$$

Anmerkung: Dieses Kriterium unterstützt ein Problemlösungsverfahren, das auch die Möglichkeit bietet, durch Umwege zum Ziel zu gelangen. Dies liegt daran, daß nicht verlangt wird, daß in jedem Schritt die Anzahl der Unterschiede geringer wird.

Die Anwendung eines Operators kann man in zwei Teilprozesse zerlegen:

- Prüfung der Anwendbarkeit des Operators.

Koordination der Teilabläufe zur Lösung von Interpolationsproblemen

- Ausführung der einzelnen Teiloperationen, aus denen der Operator besteht.
- (4) Umorientierung bei Mißerfolg:
Man kann die folgenden Ansätze verfolgen, um bei Mißerfolg den Problemlösungsprozeß fortzusetzen:
- Zwischenzielbildung: Dadurch kann man versuchen, Anwendungsbedingungen für bisher nicht anwendbare Operatoren zu schaffen.
 - Erneute Suche nach Operatoren: Versuche das Problem mit einem anderen Operator zu lösen.
 - Absichtswechsel: Falls mehrere Absichten zu erfüllen sind kann man unter Beibehaltung von Start- und Zielposition die Absicht wechseln.
 - Zielwechsel.
 - Startpunktwechsel: Bei Mißerfolg kann häufig das Ziel von einem bereits erreichten Zwischenziel ausgehend erreicht werden.
 - Wechsel des Heurismus.
- (5) Festlegung der Schlußrichtung:
Zunächst Vorwärts- bzw. Rückwärtssuche. Sofern möglich, d. h. der Zielzustand ist klar definiert, führt eine Kombination der beiden zu einer deutlichen Reduktion des "Kombinationsraumes".

4.2.1 Koordination der Teilabläufe zur Lösung von Interpolationsproblemen

Die verschiedenen Heurismen zum interpolativen Problemlösen können grob nach dem Ausmaß ihrer **determinierenden Tendenzen** geordnet werden. Unter determinierender Tendenz versteht man die Wirkung, die die Zielvorstellung, die Antizipation des Endzustandes auf den Denkprozeß beim Problemlösen (z. B. durch die Auswahl der Operatoren nach einer Unterschiedsliste) ausübt.

Ein Heurismus für Versuch-und-Irrtum Problemlösen ist durch mehr oder minder vollständigen Ausfall determinierender Tendenzen gekennzeichnet. In je größerem Maße determinierende Tendenzen in einem Problemlösungsprozeß ausfallen, desto mehr nimmt der Problemlösungsprozeß den Charakter eines Versuch-und-Irrtum Prozesses an. Versuch-und-Irrtum Verhalten unterscheidet man nach dem Grad der Systematik nach

- **vollständig stochastischem**, d. h. sowohl die Startpunktauswahl, als auch die Operatorauswahl wird dem Zufall überlassen und

Verschiedene Problemlösungsstrategien

- **vollständig systematischen** Versuch-und-Irrtum Verhalten, d. h. jeder Operator wird an jedem möglichen Startpunkt höchstens einmal erprobt.
Dieser Heurismus beinhaltet jedoch durch die Vorgabe des Startpunktes einen Rest determinierender Tendenz.

Da systematisches Versuch-und-Irrtum Verhalten häufig der einzige Ausweg aus einer verfahrenen Situation ist, muß man diese Form des Problemlöseverhaltens berücksichtigen.

Der Vorteil determinierender Tendenzen liegt in der Verringerung der Komplexität; der Nachteil besteht darin, daß dadurch die Blickrichtung zu sehr eingeschränkt werden kann.

Beispiele für determinierende Tendenzen für Heurismen sind:

- (1) Einschränkung und Zielausrichtung der Operatorsuche,
 - durch vorausgehende Zielanalyse,
 - durch Voraussetzungs- und Nebenwirkungsanalyse bei der Operatorauswahl.
- (2) Einschränkung und Zielausrichtung des Ausbaus der Vorwärtsverzweigung durch vernünftige Umorientierung bei dem Mißerfolg des Versuchs einen Operator anzuwenden.

Ein Beispiel für einen Heurismus zum analytischen Problemlösen ist der General-Problem-Solver (GPS), vgl. auch Puppe /13/. Dieser besteht im wesentlichen aus drei rekursiv miteinander verknüpften Methoden:

- (1) Die Transformationsmethode, zur Analysierung von Start- und Zielpunkt.
- (2) Die Reduktionsmethode, zur Operatorsuche mit dem Ziel der Unterschiedsbehebung.
- (3) Die Operatoranwendungsmethode, zur Prüfung des Operators auf Anwendbarkeit und evtl. dessen Anwendung.

Da sämtliche hier aufgeführten Methoden nur die Vorwärtssuche unterstützen sind Verbesserungen denkbar, indem man sie durch Rückwärtssuche bzw. eine Kombination von beiden ergänzt.

(Ein Flußdiagramm eines Heurismus für Versuch-und-Irrtum Problemlösen befindet sich in Dörner /4/ S. 71).

4.3 Synthetisches Problemlösen

Im Gegensatz zu interpolativem Problemlösen sind beim synthetischen Problemlösen unter Umständen nicht alle notwendigen Operationen bekannt. Daher beschäftigt man sich mit Heuristiken, die zur Neuentdeckung von Operatoren und zur Umstrukturierung vorhandener Gedächtnisinhalte verwendet werden können.

4.3.1 Eine Umstrukturierungsmethode

Umstrukturierungsmethoden sind Heuristiken, die geeignet sind, Materialien für den Problemlöseprozeß zu liefern, die dem Problemlöser zwar bekannt sind, aber aus verschiedenen Gründen zunächst nicht mit dem zu lösenden Problem in Verbindung gebracht werden.

Umstrukturieren bedeutet die Betrachtungsweise zu verändern, wobei die Elemente des Gegenstandes in eine andere Beziehung zueinander treten als üblich. Es handelt sich dabei um eine Änderung des Betontheitsreliefs; diese ist bei den meisten Problemen sogar die Lösung selbst.

Ein Beispiel einer solchen Umstrukturierungsmethode ist der zweistufige Prozeß der Resonanzwirkung des tauglichen Signalelements. Hierbei wird zunächst ein diffus-abstraktes Suchbild konstruiert, sodann wird in der Umgebung nach einem Wahrnehmungssachverhalt geforscht, welcher in dieses diffus-abstrakte Bild hineinpaßt.

Die Verschwommenheit und Eigenschaftsarmut des Suchbildes ist in gewisser Weise Voraussetzung für eine effektive Suche, denn je konkreter und klarer das Suchbild ist, desto weniger Sachverhalte sind mit ihm verträglich.

4.3.2 Das Denken mit Analogien und Modellen

Der Analogieschluß spielt beim kreativen Denken und in der Geschichte der großen Erfindungen und Entdeckungen eine große Rolle.

Abstrakt betrachtet besteht ein Analogieschluß darin, daß angenommen wird, die Relation zwischen den Sachverhalten eines Bereiches A bestände in gleicher oder ähnlicher Form auch zwischen den Sachverhalten eines Bereiches B.

In der Literatur, z. B. bei Joerger /5/, wird der Analogieschluß auch als **Lernübertragung** oder **Transfer** bezeichnet.

Bei einem Analogieschluß unterscheidet man die folgenden vier Teilschritte:

- (1) Abstraktion von bestimmten Merkmalen des gegebenen, konkreten Sachverhaltes.

Verschiedene Problemlösungsstrategien

- (2) Suche nach einem Modell, d. h. Suche nach einem Sachverhalt, der eine andere Konkretisierung des abstrakten Sachverhaltes darstellt.
- (3) Rückübertragung von Merkmalen des Modells auf den ursprünglichen Sachverhalt, dessen Bild dadurch bereichert wird.
- (4) Prüfung, ob die neuen, hypothetisch angenommenen Merkmale tatsächlich vorhanden sind.

Man beachte, daß die einzelnen Schritte notwendige Voraussetzung füreinander sind; ohne Abstraktion kann es keine Modellsuche geben, da ein Sachverhalt einen anderen nie völlig, sondern nur im Hinblick auf bestimmte Merkmale gleichen kann. Diese Merkmale müssen zunächst durch einen Abstraktionsprozeß ermittelt werden. Das **Finden des richtigen Modells** zusammen mit der **Rückübertragung** sind die entscheidenden Schritte des Prozesses, jedoch ist die Prüfung, ob das durch Rückübertragung gewonnene, hypothetisch angenommene Merkmal am Sachverhalt tatsächlich vorliegt, gleichfalls von großer Bedeutung.

Einen Ansatz, die Suche nach Analogien systematisch zur Lösung von Problemen einzusetzen bietet die Gordonsche Synektik (1961). Von ihr wird behauptet, daß sie ein wirkungsvolles Mittel produktiven Problemlösens sei.

4.3.3 Die Wirkung von Modellen

Denken in Analogien besteht in der Suche und der Verwertung von Modellen. Sie werden nicht nur im Rahmen von Analogieschlüssen verwendet, sondern sie sind auch dann hilfreich, wenn die Beschreibung eines Sachverhaltes nur in abstrakter Form vorliegt.

Modelle gibt es also als Ergebnisse der Suche nach Analogien und als Konkretisierung abstrakter Sachverhalte. Durch diese Konkretisierung wird das Verständnis abstrakter Sachverhalte erleichtert, da der Blick auf die wesentlichen Merkmale gelenkt und damit die Trennung von wesentlichen und unwesentlichen Merkmalen erleichtert wird.

Modelle als Ergebnisse der Suche nach Analogien liefern auf dem Weg über die Rückübertragung Hypothesen über den Sachverhalt, für den die Modelle gesucht werden.

Man kann das Verständnis von Sachverhalten durch Abstraktion ebenfalls erhöhen. Im allgemeinen unterscheidet man zwei Möglichkeiten der Abstraktion:

- (1) Man vergleicht, welche Merkmale der Sachverhalt mit anderen gemeinsam hat und welche nicht. Die gemeinsamen Merkmale können zur Klassifizierung verwendet werden.
- (2) Man betrachtet den Sachverhalt in seinem funktionalen Kontext und erkennt dadurch zusätzliche Merkmale.

Joerger /5/ bezeichnet diese beiden Verfahrensweisen als Möglichkeiten das Unterscheidungslernen zu erleichtern.

4.4 Dialektisches Problemlösen

Dialektische Problemlösen unterscheidet sich von allen anderen Formen des Problemlösens dadurch, daß die Kriterien für die Beurteilung, ob das Ziel erreicht ist mit der Konstruktion des Zielraumes zusammen entstehen; dies ist ein charakteristisches Merkmal für dialektisches Problemlösen.

Ein möglicher Heurismus für dialektisches Problemlösen läßt sich am einfachsten durch das folgende Flußdiagramm (Abbildung 4, aus Dörner /4/) darstellen.

Die im Flußdiagramm dargestellten Prüfprozesse unterscheidet man nach **systemimmanente** und **systemtranszendente Prüfprozesse**. Erstere führen zu Veränderungen des bereits bestehenden Gefüges, während letztere zum weiteren Ausbau des vorhandenen Gefüges führen.

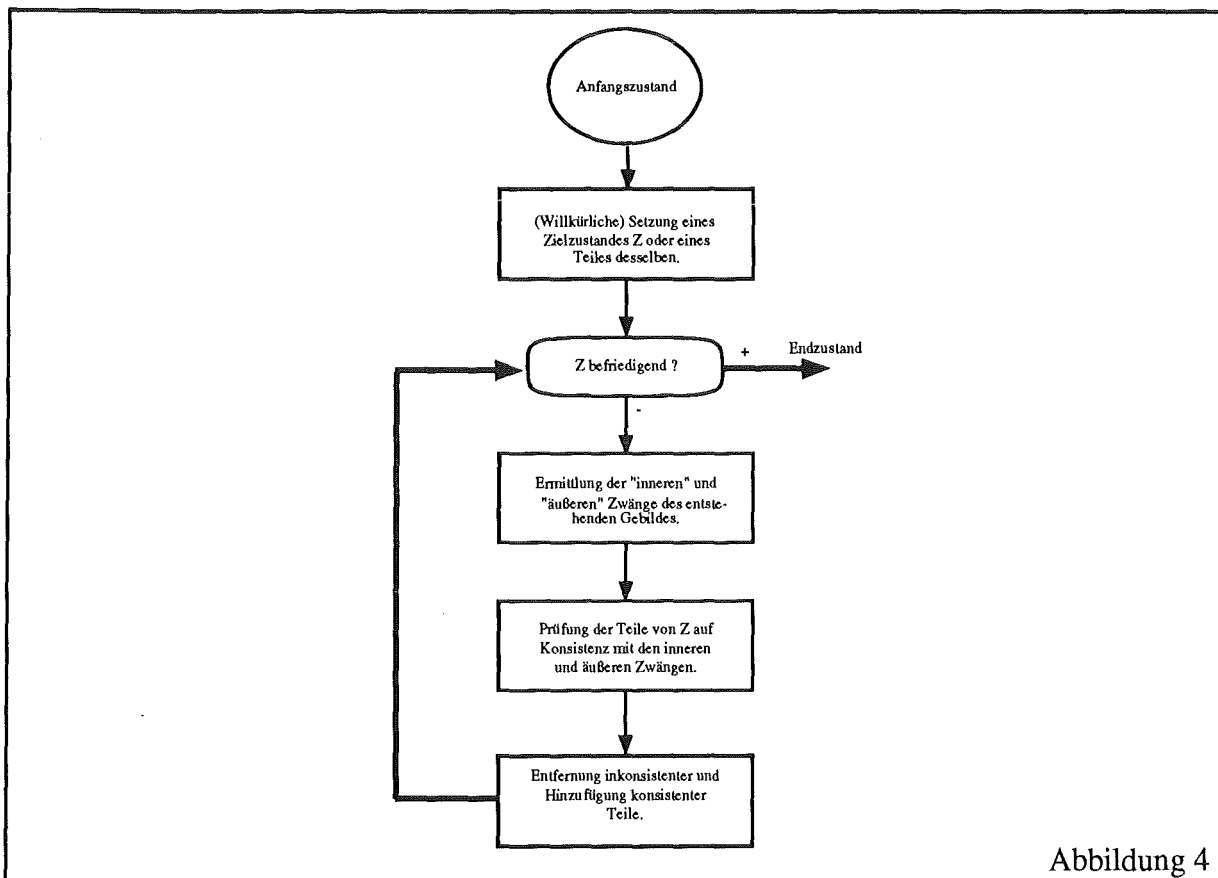
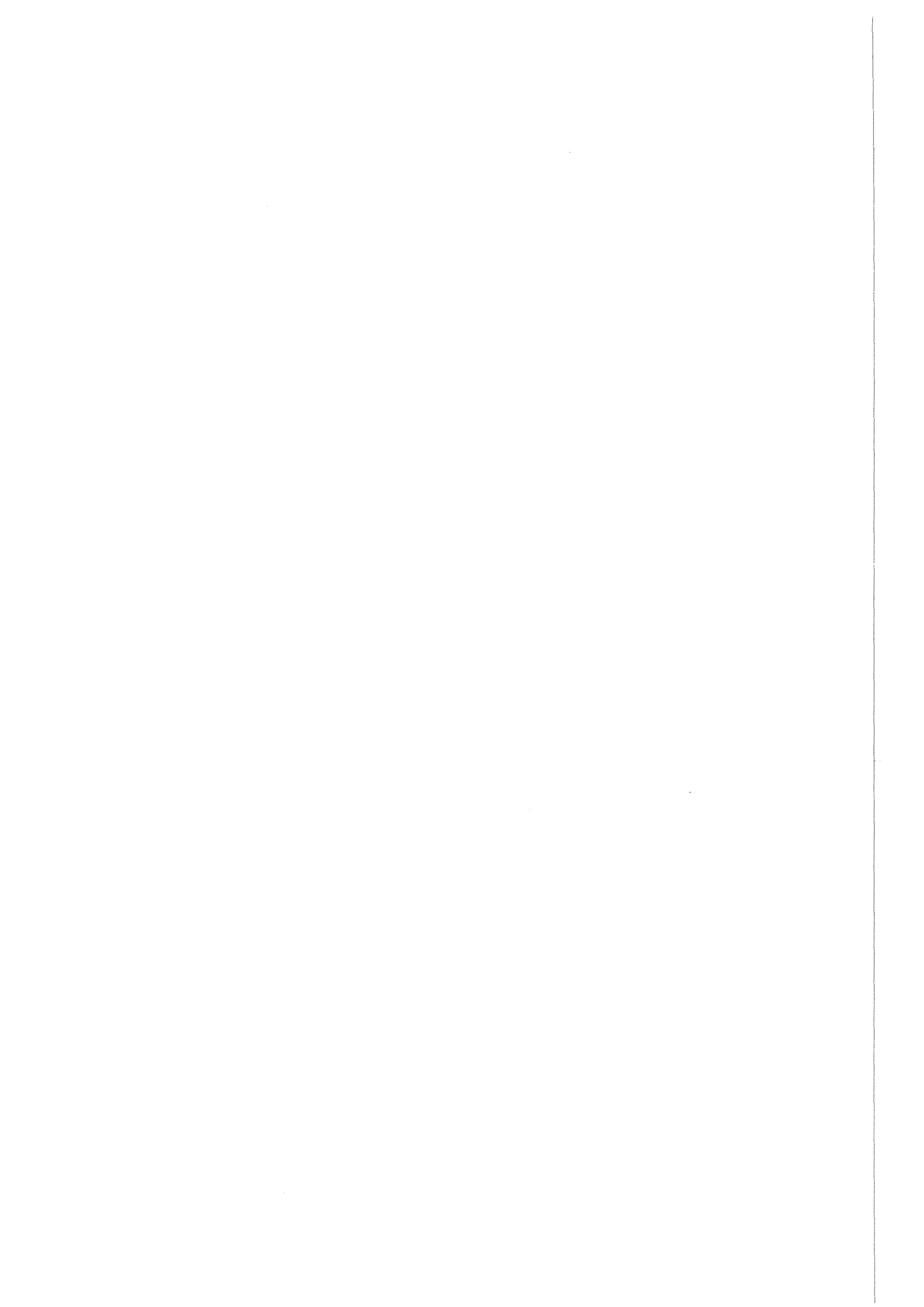


Abbildung 4

Diese Unterscheidung der Prüfprozesse ist für die Steuerung des Einsatzes von Operatoren bedeutsam; systemimmanente Prüfprozesse ziehen je nach Ausgang den Einsatz von Tausch-, Weglaß- oder Wandlungsoperatoren nach sich, systemtranszendente Prüfprozesse den Einsatz von Anfügeoperatoren (vgl. Kapitel 3).



5 Die Grundelemente der Informationsverarbeitung

Da ein wichtiges Merkmal kognitiver Prozesse ihre Veränderbarkeit ist, widmet man sich der Frage, aus welchen Elementarprozessen die Informationsverarbeitung beim Problemlösen zusammengesetzt ist. Der Überblick über die Elemente vereinfacht dann die Untersuchung der Veränderung von Denkformen.

Ein solches System kognitiver Elementaroperationen wurde bislang vergeblich gesucht. Im folgenden werden die drei verschiedenen Ansätze dargestellt, wobei die ersten Beiden nur zur Vervollständigung dienen.

5.1 Der Assoziationismus

Nach der Auffassung des Assoziationismus besteht die Denktätigkeit darin, daß Gedächtnisinhalte sich aufgrund ihrer assoziativen Verknüpfung wechselseitig aufrufen. Assoziative Verknüpfungen bestehen aufgrund von Gleichzeitigkeit, aufgrund von Ähnlichkeit, aufgrund des Kontrastes oder aufgrund räumlicher Kontiguität.

Die Ausbreitung der Assoziationen wird mit Hilfe der **Konstellationstheorie des geordneten Denkablaufes** beschrieben. Danach breiten sich Assoziationen nicht ziellos gemäß obiger assoziativer Verknüpfungen aus, vielmehr werden sie durch die "Konstellationswirkung" des psychischen Gesamtzustandes in eine bestimmte Richtung gelenkt. Der psychische Gesamtzustand wirkt bahrend und hemmend auf das assoziative Umfeld eines bestimmten Inhaltes und bewirkt so, daß der Assoziationsprozeß in eine bestimmte Richtung abläuft.

Kritiker dieser Theorie führen an, daß sie bei solchen geistigen Anforderungen in Schwierigkeiten gerät, die rein gedächtnismäßig nicht lösbar sind.

Durch eine Präzisierung der Konstellationstheorie wie z. B. durch Einführung eines übergeordneten Steuersystemes lassen sich diese Bedenken möglicherweise aus dem Weg schaffen. Damit könnte man vielleicht die wichtigste Grundidee des Assoziationismus, daß kognitive Prozesse allein darin bestehen, daß Gedächtniselemente einander wechselseitig aktivieren und hemmen, retten.

Als Elementarprozesse des Assoziationismus kann man ansehen:

- aktivieren,
- hemmen,
- verknüpfen,
- entknüpfen.

Dörner /4/ hat gezeigt, daß man alle Teilprozesse eines Heurismus für interpolatives Problemlösen auf diese vier Elementarprozesse zurückführen kann. Eine weitere Verallgemeinerung dieser Aussage ist bisher noch nicht gelungen.

5.2 Der faktorenanalytische Ansatz

Es werden hier nur die wesentlichen Ansätze in aller Kürze dargestellt. Genauere bzw. weiterführende Ansätze findet man in Dörner /4/ und Kail/Pellegrino /7/.

Der faktorenanalytische Ansatz des Versuchs, Grunddimensionen der menschlichen Verstandestätigkeit zu finden, hat seinen Ursprung im Bereich der Intelligenzdiagnostik. Dieser Ansatz diente und dient zur Bestimmung von "Intelligenzleistungen" einzelner oder Gruppen von Individuen wie z. B. der Bestimmung des Intelligenzquotienten (IQ).

Hierfür werden Tests aus Subtests zusammengestellt, die jeweils einzelne Grundfähigkeiten umfassen. Die Testauswertung erfolgt dann mit Hilfe statistischer Methoden wie z. B. der Faktorenanalyse Bortz /3/.

5.3 Kognitive Operationen

Der assoziations-theoretische Ansatz ist in der bislang vorliegenden Form zu undifferenziert und der faktorenanalytische Ansatz ist weitgehend inhaltsleer, da die Interpretation der errechneten Faktoren über eine Art der Benennung kaum je hinausging.

Ein weiterführender Ansatz ist der Ansatz einer Lehre der kognitiven Prozesse. Dieser ist mehr phänomenal orientiert und aus der präzisen Beobachtung von Denkprozessen hervorgegangen.

5.3.1 Der Ansatz von Selz (1913)

Nach Selz (1913) unterscheidet man die folgenden elementaren kognitiven Prozesse:

- **Komplexreduktion:**
Vergleich eines sensorischen Eingangs mit einem gespeicherten Inhalt, wobei zugleich der Kontext aktiviert wird.
- **Komplexergänzung:**
Zu Teilen wird das zugehörige Ganze assoziiert.

- Schemaergänzung:
Konkretisierung eines abstrakten Suchbildes.
- Änderung des Gedächtnisbildes durch Abstraktion, d. h. Entfernung bestimmter Merkmale aus dem Gedächtnisbild.
- Änderung des Gedächtnisbildes durch Differenzierung, d. h. Hinzufügen von Merkmalen (Konkretisierung).
- Komplexbildung, d. h. Verknüpfung bislang nicht verbundener Gedächtnisinhalte zu einer neuen Einheit.

5.3.2 Der Ansatz von Lompscher (1972)

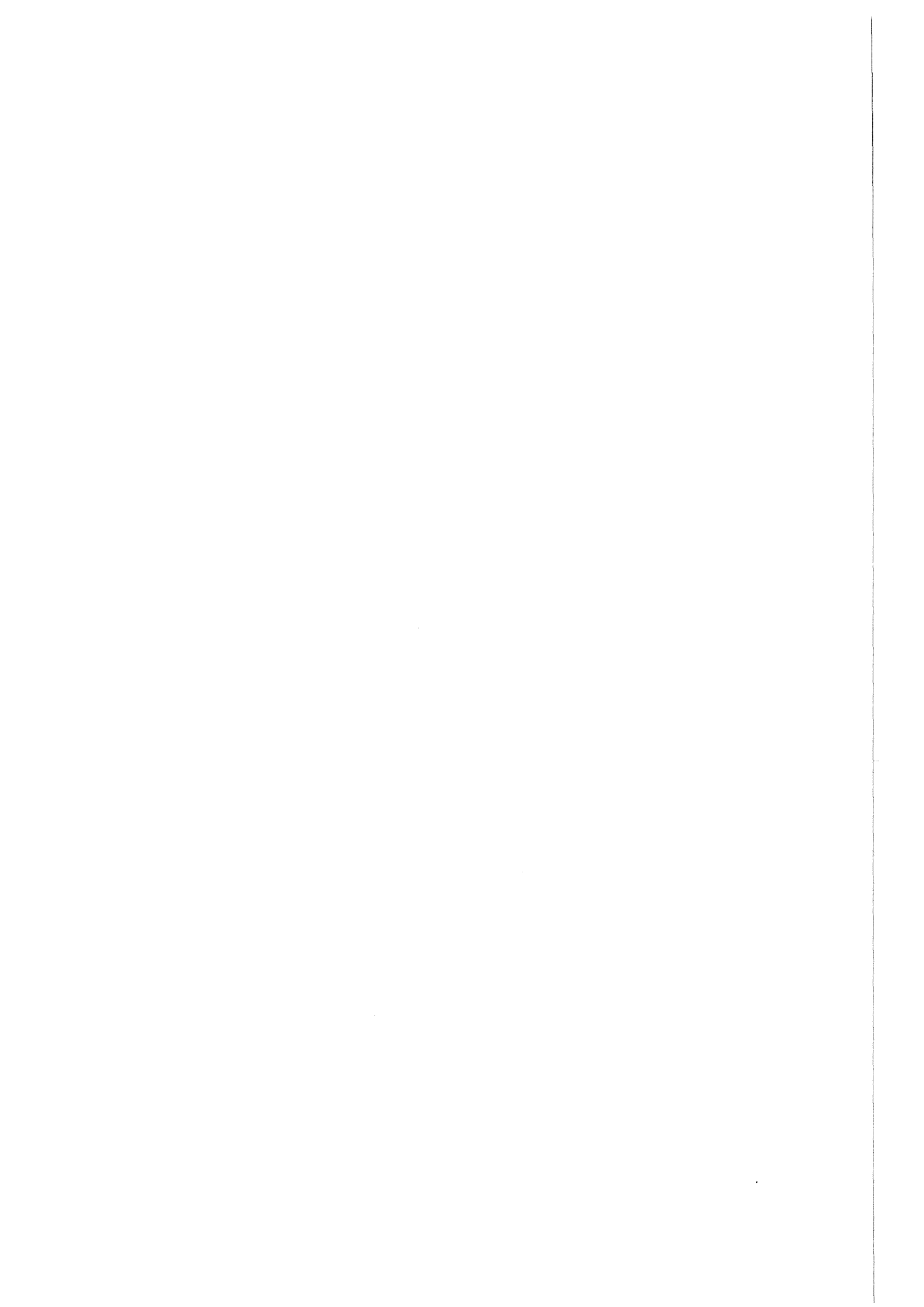
Ein zweiter Ansatz elementarer kognitiver Prozesse stammt von Lompscher (1972); dieser unterscheidet die folgenden elementaren kognitiven Prozesse:

- Zergliedern eines Sachverhaltes in seine Teile.
(Woraus besteht X?)
- Erfassen der Eigenschaften eines Sachverhaltes.
(Welche Merkmale hat X?)
- Vergleichen von Sachverhalten hinsichtlich einem oder mehrerer Merkmale.
- Ordnen einer Reihe von Sachverhalten hinsichtlich einem oder mehrerer Merkmale.
- Abstrahieren als Erfassen der in einem bestimmten Kontext wesentlichen Merkmale sowie das Vernachlässigen der unwesentlichen Merkmale eines Sachverhaltes.
- Verallgemeinern als Erfassen der einer Reihe von Sachverhalten gemeinsamen und wesentlichen Eigenschaften.
- Klassifizieren als Einordnung eines Sachverhalts in eine Klasse.
- Konkretisierung als Übergang vom Allgemeinen zum Besonderen.

Nach Lompscher realisieren diese Operationen jede geistige Tätigkeit. Zumeist treten sie nicht isoliert, sondern als Komponenten komplexerer Prozesse auf. Sie sind in schwer durchschaubarer Weise ineinander geschachtelt und setzen einander voraus bzw. enthalten einander wechselseitig.

Die Operationen "Erfassen von Eigenschaften" und "Zergliedern in Teile" sieht Lompscher als Grundoperationen an, da sie letztlich in allen anderen Operationen wiederkehren.

Aufgrund der oben genannten Nachteile sind diese Operationen sicherlich nicht die endgültige Antwort auf die Frage nach den Elementaroperationen des menschlichen Geistes.



6 Die Entwicklung der Problemlösefähigkeit (Lernen)

Geht man davon aus, daß zum einen die vorhandene Wissensstruktur stabil, präzise und übersichtlich organisiert ist und zum anderen das Vorwissen und das angestrebte Ziel in einem Zusammenhang stehen, so gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten die Problemlösefähigkeit eines Individuums in einem bestimmten Bereich zu verbessern:

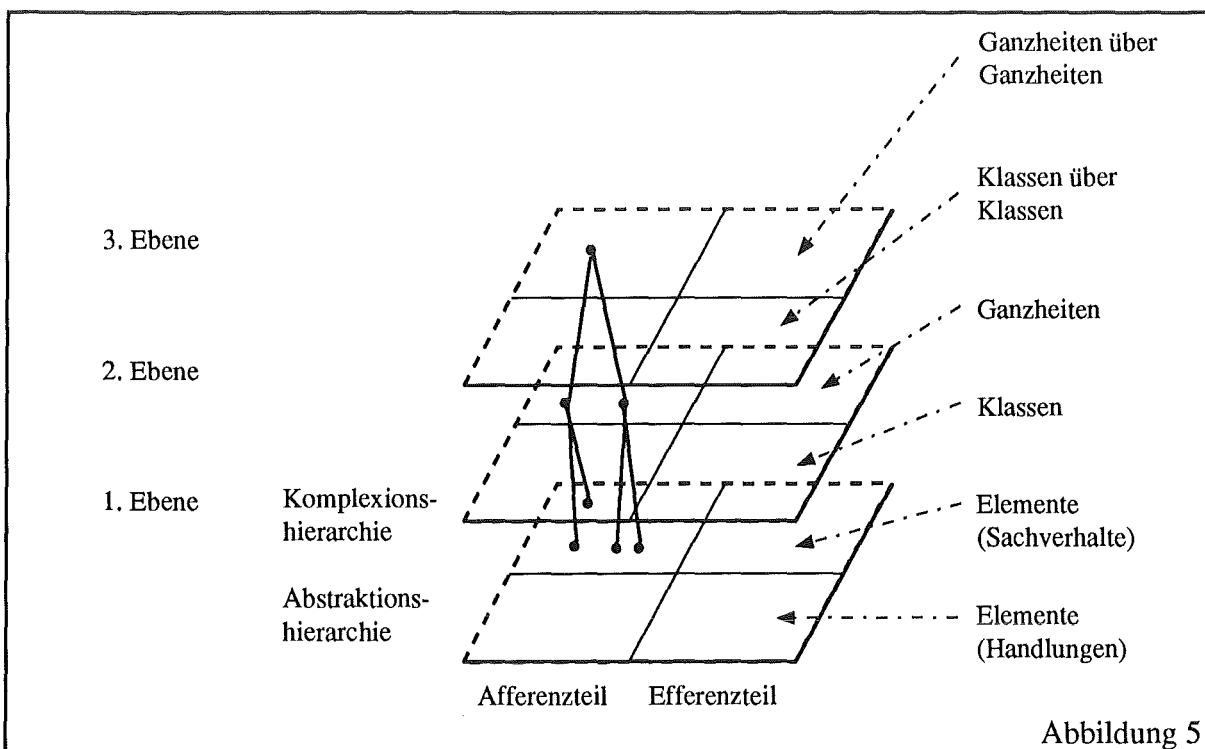
- (1) Verbessere das Wissen über den entsprechenden Bereich (Ansatzpunkt ES).
- (2) Verbessere die heuristische Struktur.

Diese beiden Möglichkeiten schließen einander nicht aus. Eine Verbesserung der Problemlösefähigkeit eines Individuums tritt aufgrund der Veränderung der Wissensstruktur deshalb ein, weil der "Denkapparat" mit besserem Material arbeiten kann und nicht deshalb, weil der "Denkapparat" selbst verändert wurde.

Bei einer fachspezifischen Verbesserung besteht die Gefahr, daß die allgemeine Problemlösefähigkeit zu kurz kommt und unter Umständen sogar verkümmert.

6.1 Die Fortentwicklung der epistemischen Struktur

Eine ES besteht aus einem **Afferenzteil**, einem Gedächtnis für Sachverhalte, und einem **Efferenzteil**, einem Gedächtnis für Handlungen, mit deren Hilfe sich die Sachverhalte des jeweiligen Realitätsbereichs in andere Sachverhalte umwandeln lassen.



Die Entwicklung der Problemlösefähigkeit (Lernen)

Diese beiden **Teilgedächtnisse** sind zweischichtig aufgebaut; es gibt eine **Komplexionshierarchie** und eine **Abstraktionshierarchie**, in denen die Elemente der nächst niederen Schicht zu **Ganzheiten (Komplexionen)** oder zu **Klassen** zusammengefaßt werden. Diese Vorgänge werden bei Joerger /5/ im wesentlichen unter Begriffsbildung bzw. Begriffslernen zusammengefaßt.

Nach Joerger /5/ bestehen Zusammenhänge zwischen dieser hierarchischen Struktur und der Piagetschen Theorie der Entwicklungsstufen (vgl. Abschnitt 1.2.3.2); d. h. man identifiziert Ebenen mit Entwicklungsstufen.

In der ES können folgende Veränderungen eintreten:

- Komplexionsbildung:
Es können Elemente einer niederen Komplexionsschicht zu einer neuen Komplexion zusammengefaßt werden. Man lernt, daß bestimmte Komponenten in bestimmter Relation zueinander eine bestimmte "Ganzheit" bilden.
- Komplexionszerlegung:
Es werden einem Element einer Komplexionsschicht Teilelemente untergeordnet; diesen Vorgang bezeichnet man häufig als **Analyse**.
- Bildung von Abstrakta:
Elemente einer Schicht werden zu Klassen zusammengefaßt.
- Zerlegung von Abstrakta:
Einem Element der Abstraktionshierarchie werden Elemente einer niederen Schicht zugeordnet.

Durch diese vier Arten von Veränderungsprozessen kann aus einer einfachen und undifferenzierten ES eine komplizierte und differenzierte Struktur werden. Im folgenden werden diese Veränderungen etwas genauer untersucht.

Gegenüber dem Ansatz von Lindsay, Norman und Rumelhart (vgl. Abschnitt 7.2.3) wirkt das hier dargestellte Modell ökonomischer und übersichtlicher, weil hier eine gleichartige Beschreibung der Abbildung von Sachverhalten und von Maßnahmen zu ihrer Veränderung vorgesehen ist, Tergan /17/.

Wie in Abbildung 5 dargestellt sind zur adäquaten Repräsentation von Wissensstrukturen der ES dreidimensionale Strukturen notwendig, diese werden jedoch bereits bei etwas komplexeren Sachverhalten leicht unübersichtlich, Tergan /17/.

6.1.1 Veränderungen der Komplexionshierarchie

Hierzu werden wir zunächst einmal die Bildung einer höheren Komplexionshierarchie an einem Beispiel illustrieren. Wenn ein Schachspieler lernt, auf dem Schachbrett nicht mehr nur einzelne Figuren, sondern Figurenkonfigurationen zu sehen, dann hat er seiner Komplexionshierarchie eine Ebene höherer Ordnung angefügt. Dies hat große Vorteile, da dadurch die Komplexität einer Situation reduziert wird.

Die Bildung von Komplexionen höherer Ordnung spielt nicht nur im Afferenzteil sondern auch im Efferenzteil der ES eine wichtige Rolle. Sie führt dort zur Bildung von **Makrooperatoren**, d. h. zu in raum-zeitlich organisierten Gebilden höherer Ordnung zusammengefaßten Operatoren. Dies bedeutet nichts anderes, als daß bei der Lösung eines Problems die Problemlösungsmethode "mitgelernt" wird.

Der Vorteil von Makrooperatoren besteht darin, daß man mit bewährten Sequenzen von Operatoren, anstatt einzelner Operatorelemente, hantiert. Nachteilig wirkt sich aus, daß sie unter Umständen das Auffinden einer anderen (leichteren) Lösung erschweren; man beachte hierzu die sogenannten Luchins Experimente (Stichworte: "Schemalösungen", "Einstellungseffekt"), die Vorteile überwiegen jedoch!

Die hier behandelte Bildung von Makrooperatoren ist im Grunde nur eine Spezialform desjenigen Vorgangs, der auch z. B. bei der Entwicklung der Motorik die Hauptrolle spielt; Gehen lernen besteht aus der raum-zeitlichen Koordination von Einzelbewegungen, die zu einer Einheit zusammengefaßt werden.

Die Zerlegung von Komplexionen spielt bei der Fortentwicklung der ES ebenfalls eine große Rolle. Wird nämlich ein Sachverhalt als zusammengesetzt erkannt, so kann man seine einzelnen Komponenten beeinflussen und ist nicht mehr darauf angewiesen ihn als "Ganzes" zu behandeln. Bislang sind jedoch keine Untersuchungen bekannt, die zu Gesetzmäßigkeiten bei der Auflösung von Komplexionen geführt haben.

6.1.2 Veränderung der Abstraktionshierarchie

Die Bildung von abstrakten Inhalten stellt sich als ein Prozeß, der zwischen allzu abstrakten und allzu konkreten Inhalten hin und her oszilliert, dar. Dabei sind sowohl die Ersetzung eines konkreten Inhalts durch einen abstrakten, als auch die Umkehrung dieses Prozesses wichtige Teilprozesse. Bei der Bildung abstrakter Gedächtnisinhalte geht es im wesentlichen um den **Erwerb von Klassifikationssystemen**.

Beim Aufbau eines Klassifikationssystems handelt es sich um den Erwerb eines sensorischen Schemas, welches mit einem Reaktionsprogramm verknüpft wird. Durch diese **Reiz-Reaktions-Verknüpfung** wird ein Gedächtnisinhalt repräsentiert.

Einen solchen Gedächtnisinhalt nennen wir **Hypothese**, da während des Aufbaus des Klassifikationssystems eine solche Reiz-Reaktions-Verknüpfung zunächst hypothetisch ist.

Die Entwicklung der Problemlösefähigkeit (Lernen)

Sensorische Schemata können anders als "reale" Reize **Unbestimmtheits-** und **Unschärfestellen** beinhalten.

- Eine Unbestimmtheitsstelle auf einer Reizdimension bedeutet, daß man nicht genau weiß, welche Eigenschaften der Reiz auf dieser Dimension haben muß, um mit der entsprechenden Reaktion beantwortet zu werden.
- Eine Unschärfestelle auf einer Reizdimension bedeutet, daß diese Dimension wesentlich oder unwesentlich (Vergessen) irrelevant ist. Abstraktion bedeutet daher, wesentliche Generierung von Unschärfestellen.

Man kann sich den Klassifikationsvorgang aufgrund von sensomotorischen Schemata wie folgt vorstellen: Bei jedem Reiz wird geprüft, ob er in das entsprechende sensorische Schema paßt, d. h. ob alle Reizmerkmale im sensorischen Schema entweder als "feste" Merkmale oder als Unschärfestellen auftreten.

Grob gesprochen erfolgt die Bildung abstrakter sensorischer Schemata in einem Wechselspiel von Abstraktions- und Spezifikationsprozessen.

Im folgenden werden einige Strategien zur Bildung abstrakter sensorischer Schemata beschrieben:

- Strategie des Fokussierens:
Man nimmt das erste Signal (Reiz) mit allen seinen Merkmalen als Brennpunkt (Fokus) und schneidet dann die negativen Erfahrungen sukzessive heraus, indem man diese durch Unschärfestellen ersetzt. Es besteht hierbei jedoch die Gefahr, daß man über das einfache Ziel "hinausschießt" (Übergeneralisierung).
- Auswählen und Testen:
Wähle Merkmale und teste sie auf Relevanz; erweist sich ein ausgewähltes Merkmal als irrelevant, so kann es verworfen und ein anderes ausgewählt werden. Eine andere Möglichkeit liegt in der Bildung einer "disjunkten Hypothese" durch Oder-Verketzung einzelner Merkmale.
- Das sukzessive Scanning:
Hierunter versteht man eine aufeinanderfolgende Prüfung einzelner Merkmale auf ihre Relevanz.
- Spezifizierung einer Hypothese:
Man kann eine Hypothese beispielsweise dadurch spezifizieren, indem man eine Unschärfestelle durch eine, im momentanen Reiz angetroffene Eigenschaft ersetzt.
- Einengung oder Erweiterung der Hypothese.

Zum Umbau sensorischer Schemata kann man die folgenden Operationen verwenden:

- Ersetzung eines festen Merkmals durch ein anderes.
- Spezifizierung (Ersetzung einer Unschärfestelle durch ein festes Merkmal).
- Abstraktion (Ersetzung eines festen Merkmals durch eine Unschärfestelle).

Hierzu betrachte man die folgende erschöpfende Liste sinnvoller Informationsverarbeitungsschritte beim Hypothesenumbau:

- (1) Bei falscher Hypothesenreaktion, d. h. das sensorische Schema "paßt" auf ein Signal, auf das es nicht passen dürfte, muß das sensorische Schema eingeschränkt oder verändert werden. Als Informationsverarbeitungsschritte kommen hierzu in Frage:
 - Ersetzung,
 - Spezifizierung,
 - Dimensionswechsel,
 - Disjunktionsvermeidung.

- (2) Bei falscher Gegenreaktion, d. h. das sensorische Schema "paßt" nicht auf ein Signal, auf das es passen sollte, muß das sensorische Schema erweitert oder auf eine andere Art und Weise verändert werden.

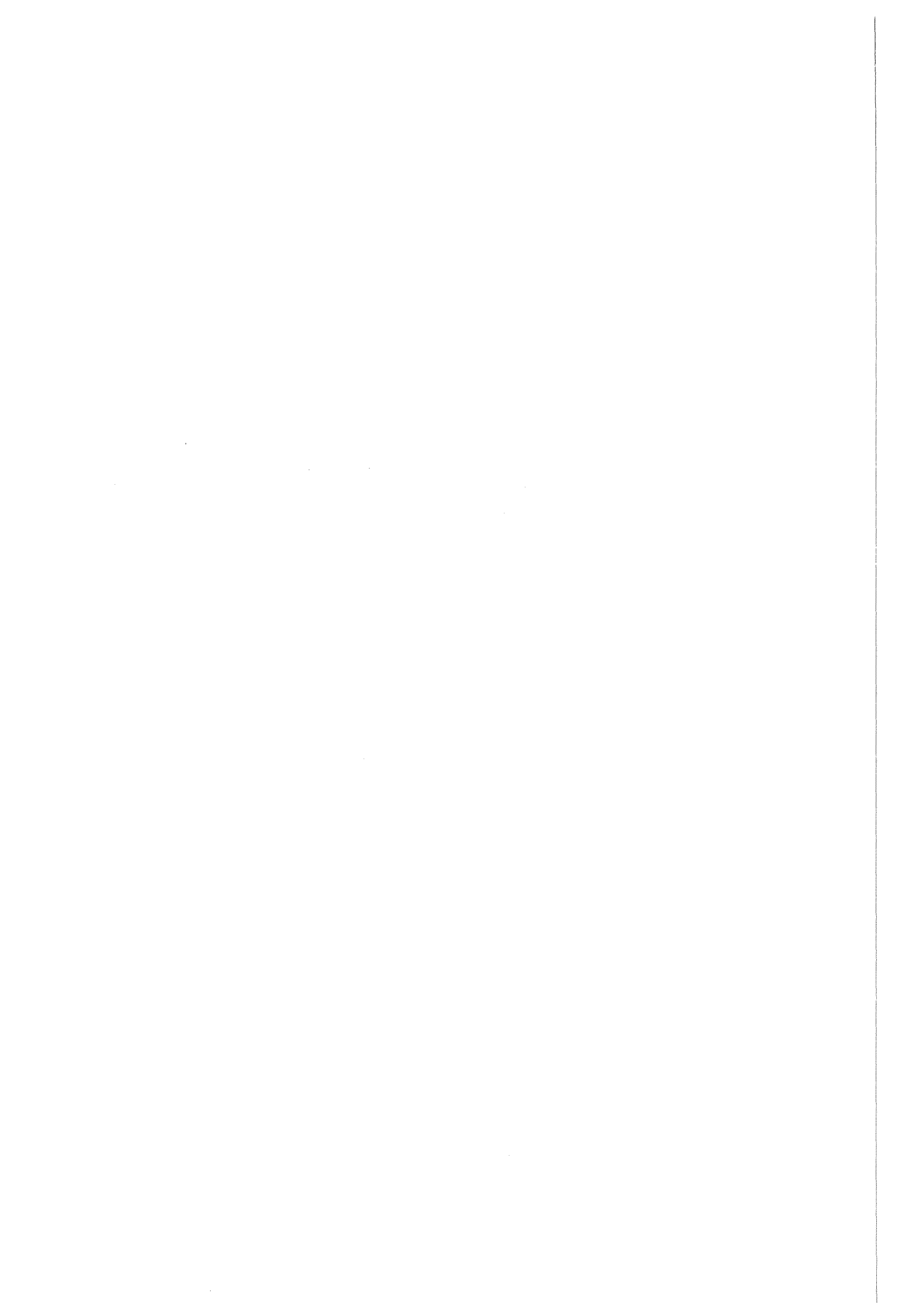
Als Informationsverarbeitungsschritte kommen hierzu in Frage:

- Ersetzung,
- Abstraktion,
- Dimensionswechsel,
- Disjunktionsvermehrung.

Diese einzelnen Informationsverarbeitungsprozesse werden vom Individuum nicht wahllos, sondern integriert in einem mehr oder minder festen Heurismus verwendet.

Als Trainingsformen der heuristischen Struktur unterscheidet man:

- Übungstraining,
- taktisches Training,
- strategisches Training.



7 Der Wissenserwerb; vier verschiedene theoretische Ansätze

7.1 Einleitung

Im wesentlichen wurden in den bisherigen Kapiteln nur Vorgänge, Strukturen und Modelle untersucht, die sich den allgemeinen Oberbegriffen des Problemlösens und der Wissensrepräsentation zuordnen lassen. Dieser Abschnitt befaßt sich vorwiegend mit dem Wissenserwerb, d. h. dem Erwerb und der Modifikation symbolischer Wissensstrukturen und mentaler Modelle.

Dabei handelt es sich um semantisch reichhaltiges Wissen, das Konzepte, deren Bedeutung und Beziehung untereinander sowie zur Außenwelt umfaßt. **Wissenserwerb in diesem Sinne** ist definiert als Erlernen neuer symbolischer Informationen, gekoppelt mit der Fähigkeit, diese Informationen in effektiver Weise anzuwenden.

Wissenserwerb im erweiterten Sinne kann auch die graduelle Verbesserung kognitiver Fertigkeiten, wie z. B. Sprachfertigkeit durch Übung angesehen werden. Der Erwerb semantischen Wissens darüber, wie diese Fertigkeiten auszufüllen sind, stellt nur die Anfangsphase in der Ausbildung solcher Fertigkeiten dar.

Der Hauptteil des Lernprozesses besteht aus der Glättung und Verfeinerung der Fertigkeit durch wiederholte Übung sowie der Korrektur von Abweichungen. Obwohl das Wissen, das bei dieser Form des Lernens erworben wird beim Lernenden nicht ohne weiteres bewußt verfügbar ist, beispielsweise kann er im allgemeinen nicht angeben, wie er beim Sprechen Laute formt, soll auch in diesem Fall von Wissenserwerb gesprochen werden. Die erhöhte Performanz dient hierbei als Ausdruck der Verbesserung des Wissensstandes.

Im folgenden werden vier für die Wissenspsychologie relevante theoretische Ansätze des Wissenserwerbs, entsprechend der zugrundeliegenden Form der Wissensrepräsentation, ohne auf die unterliegenden spezifischen Lernstrategien, wie z. B. Lernen durch Beispiele etc. (vgl. Michalski et al. /12/) einzugehen, untersucht.

7.2 Der propositional orientierte Ansatz zum Wissenserwerb

Bei den im folgenden behandelten Modellen steht die Wissensrepräsentation im Vordergrund, da jedoch auch ansatzweise auf den Wissenserwerb eingegangen wird, werden sie in diesem Kontext behandelt. Die Ausführungen basieren im wesentlichen auf Tergan /17/.

In Systemen zur Repräsentation von Wissen ist die propositionale Darstellung eine allgemein übliche Darstellungsweise von Wissensinhalten. Die propositionale Darstellungsform

gründet formal auf der **Prädikatenlogik** (vgl. Puppe /13/). Dargestellt werden semantische Bedeutungseinheiten in Form von Prädikat-Argument-Strukturen. Das Prädikat (P) einer Proposition (meist ein Verb im Sinne eines Handlungskonzeptes) stiftet eine Verbindung zwischen einem oder mehreren **Argumenten** (a,b,...,n), formal $P(a,b,...,n)$. Unter Argumenten versteht man dabei die Art von Begriffen, die innerhalb von Prädikaten Verwendung finden können (z. B. Objekt-, Zeitbegriffe).

Eine **Proposition** ist ein Prädikat, dessen unabdingbare Variablen (Argumente) durch Begriffe ausgefüllt sind. Die Werte in einer propositionalen Form der Darstellung haben dabei die Funktion von Stellvertretern für die durch sie bezeichneten Konzepte.

Propositionale Darstellungen eignen sich zur **Repräsentation des semantischen Gehalts sprachlicher Inhalte**, unabhängig von deren spezifischer Ausdrucksform. Man verwendet daher die propositionale Darstellungsform häufig dann, wenn man die Bedeutung von Wörtern, Aussagen und wahrgenommenen Informationsinhalten, nicht aber die Wörter selber, den Wortlaut von Aussagen oder die Wahrnehmungsinhalte repräsentieren will.

Die am häufigsten verwendete Struktur der Darstellung ist die **Netzwerkform** (semantisches Netzwerk); eine weitere ist die **Propositionsliste**. Die Propositionsliste entspricht einer sequentiellen Darstellung aufeinanderfolgender Propositionen. Beide Darstellungsformen sind prinzipiell kompatibel und ineinander überführbar.

Modelle propositionaler Systeme auf Netzwerkbasis und verwandte Ansätze der symbolischen Logik unterscheiden sich zum einen hinsichtlich der Art der darin abbildbaren Wissensinhalte, der theoretischen Annahmen über die Strukturen des jeweils akzentuierten Wissens sowie hinsichtlich der Art akzentuierter Knoten und Relationen (Johnson-Laird et al. /6/). Ein weiterer Unterschied besteht in der Auffassung über die Funktionsweise des kognitiven Systems bezüglich der Art der Verarbeitung, der Speicherung und des Zugriffes auf relevante Wissensinhalte.

Als gemeinsames Merkmal moderner Repräsentationstheorien, die von ihren Autoren als Formalisierung klassischer Annahmen über die als assoziativ verstandenen Verknüpfungen zwischen Wissens-elementen bezeichnet werden, und zur Unterscheidung dieser Theorien gegenüber klassischen Assoziationstheorien, wird die differenziertere Theoriebildung in bezug auf die Art der zwischen Konzepten bestehenden Relationen herausgestellt.

Das bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Modell des Langzeitgedächtnisses von Dörner /4/ ist ebenfalls dem propositionellen Ansatz zuzurechnen (speziell die Abschnitte 3.1 und 6.1). Im folgenden werden drei weitere Ansätze umrissen.

7.2.1 Der Ansatz von Quillian sowie traditionelle Ansätze

Traditionelle Ansätze der Repräsentation von Wissen im Gedächtnis betreffen den Versuch, semantisches Wissen über Konzepte darzustellen. Die Art der beobachteten Konzepte ist dabei weitgehend auf solche Objekte (z. B. Vogel, Fisch) beschränkt, die natürlichen Kategorien (z. B. Tiere, Lebewesen) zugeordnet werden können.

Eines der ersten und einflußreichsten Repräsentationsmodelle für semantisches Wissen auf propositionaler Basis, der TCL (Teachable Language Comprehender) wurde von Quillian 1968 entwickelt. Das Modell wurde als sprachverstehendes System konzipiert, in dem ein Wissensgebiet in Form eines Netzwerkes repräsentiert wird. Repräsentiert werden semantische Bedeutungen von Begriffen im Sinne von Begriffsdefinitionen. Begriffe werden definiert, indem die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Begriffsklasse (Kategorie) sowie wesentliche Merkmale des Begriffes herausgestellt werden. Begriffe und Eigenschaften stellen innerhalb des Netzwerkes **Knoten** dar; man unterscheidet hierbei zwei verschiedene **Knotenarten** (Johnson-Laird et al. /6/):

- **type-Knoten** (Typ-Knoten), die Konzepte repräsentieren und
- **token-Knoten** (Merkmals-Knoten), die Instanzen von Konzepten repräsentieren.

Die Art der zwischen Begriffen und Eigenschaften bestehenden Relationen entsprechen den **Kanten** des Netzwerkes. Relationen werden durch gerichtete Kanten dargestellt. Man unterscheidet die folgenden beiden **Relationsarten**:

- (1) Oberbegriff-Relationen:
Die Kanten weisen von einem bestimmten Begriff zum dazugehörigen Oberbegriff.
- (2) Eigenschafts-Relationen:
Die Kanten verweisen von dem betreffenden Begriff zu den dazugehörigen Begriffseigenschaften. Bei der Repräsentation wird dabei zwischen dem Begriff selbst und dem Wort, mit dem dieser bezeichnet wird, unterschieden. In einem **mentalen Lexikon** sind die phonetischen und graphischen Merkmale der Wörter gespeichert. Vom Lexikon aus bestehen Assoziationen zum entsprechenden Begriffsknoten.

Quillian geht aufgrund von Ergebnissen gedächtnispsychologischer Untersuchungen in seinem Modell davon aus, daß die Repräsentation der Eigenschaften von Begriffen **hierarchisch** erfolgt. Entsprechend dem **Prinzip der kognitiven Ökonomie** wird angenommen, daß eine Repräsentation der Eigenschaft eines Oberbegriffs nur in Verbindung mit diesem Oberbegriff, nicht aber auch in sämtlichen Unterbegriffen vorliegt. Es werden beispielsweise Eigenschaften, die spezifisch für Kanarienvögel sind (sind gelb) in Verbindung mit dem Konzept Kanarienvogel gespeichert, solche die spezifisch für Vögel sind (haben Federn) in Verbindung mit dem Konzept Vogel.

Als Beziehungen zwischen Konzepten werden ausschließlich Über-Unterordnungs-(Klassen)-Relationen sowie Eigenschaftsbeziehungen betrachtet. Untergeordnete Konzepte in der Konzepthierarchie enthalten jeweils zum einen Merkmale des Oberbegriffs, zum anderen die eigenen, sie spezifizierenden Merkmale.

Aufgrund des auf die gedächtnismäßige Repräsentation von Konzepten ausgerichteten Ansatzes kann man das TCL-Modell als **klassischen Repräsentationsansatz** bezeichnen.

Fragen nach der Repräsentation von Konzeptbedeutungen werden in den sogenannten **Merkmalsansätzen** offen gelassen: Konzeptbedeutungen werden nicht als solche repräsentiert, sondern werden auf der Grundlage von Merkmalen und einem Vergleich von Merk-

malssätzen erschlossen. Werden im TCL-Modell Oberbegriff-Relationen direkt gespeichert, so werden sie im Merkmalsmodell aus den Eigenschaften der Begriffe erschlossen.

Die theoretischen Annahmen von Merkmalsmodellen betreffen primär Merkmalsvergleichs-Operationen und deren Einfluß auf bestimmte Verhaltensparameter (z. B. Ähnlichkeits-schätzungen, Verifikationszeiten).

Eine Gemeinsamkeit des TCL-Ansatzes und des Merkmalsansatzes besteht darin, daß sich die Konzeptbedeutung analog dem "**Alles-oder-Nichts-Prinzip**" ergibt; entweder ein Konzept kann mit den Merkmalen einer Kategorie zutreffend beschrieben werden, dann ist das durch das betreffende Wort beschriebene Konzept Bestandteil der Kategorie oder aber die Merkmale beschreiben das betreffende Konzept nur unzureichend, dann ist eine entsprechende Kategoriezugehörigkeit nicht gegeben und der diese Kategorie umschreibende Begriff inadäquat.

Eine **Schwäche des Merkmalsansatzes** besteht darin, daß sich Konzepte nicht immer eindeutig einer Kategorie zuordnen lassen.

Um empirischen Untersuchungen, die zeigen, daß die Kategoriezugehörigkeit bestimmter Konzepte schneller und zutreffender bestimmt werden kann als dies bei anderen Konzepten der Kategorie der Fall ist, gerecht zu werden, wurden alternative Modelle entwickelt. Als Ursache für diese Unterschiede wird eine unterschiedliche Gewichtung der Merkmale dieser Kategorie entsprechend ihrer Relevanz für die Konstituierung der Bedeutung der ihr zugeordneten Konzepte angenommen.

Die Bedeutsamkeit der Merkmale ergibt sich aus der Häufigkeit, mit der diese im Verlauf der Erfahrung als konstitutiv für ein bestimmtes Konzept wahrgenommen werden. Exemplare einer Kategorie, die relativ viele Merkmale mit anderen Exemplaren einer Kategorie gemeinsam haben, werden als **Prototypen** bezeichnet. Unter einem Prototyp versteht man dabei ein hypothetisches Konstrukt, dem bestimmte natürliche Exemplare einer Kategorie entsprechen können aber nicht notwendigerweise müssen.

Merkmals-theorien, die vor allem auf dem Aspekt der Typikalität von Konzepten für die Beurteilung der Kategoriezugehörigkeit gründen, werden als **Prototypentheorien** bezeichnet.

Ein zentraler Einwand gegenüber den genannten Ansätzen der Repräsentation von Konzeptbedeutungen besteht darin, daß in diesen Ansätzen Wissensstrukturen unter dem Blickwinkel der Kategoriezugehörigkeit von Konzepten betrachtet werden. Konzeptwissen wird ausschließlich als Wissen über Ober-Unterbegriff- und Merkmalsrelationen verstanden. Das Wissen um den Umgang mit den durch die Begriffe bezeichneten Objekte in realen Erfahrungszusammenhängen (Kontext) bleibt in diesem Ansatz unberücksichtigt.

7.2.2 Bewertung des Ansatzes von Quillian sowie traditioneller Merkmalstheorien

Folgende Punkte werden an den oben dargestellten Ansätzen kritisiert:

(1) Pro:

- Sie sind relativ gut geeignet, um Fragen der Ähnlichkeit von Konzepten in semantischer und definitorischer Hinsicht zu behandeln.
- Bezogen auf die Bearbeitung wissensdiagnostischer Fragestellungen stellen die beschriebenen Repräsentationsmodelle immer dann ein adäquates theoretisches Gerüst dar, wenn im Vordergrund der Wissensdiagnose die Erfassung von Begriffswissen steht und dieses Wissen über Kategorisierung von Begriffen unter Hervorhebung vor allem linguistischer Kategorisierungsaspekte (im Sinne von Wörterbuchdefinitionen) verstanden werden kann.

(2) Kontra:

- Die vorgestellten Modelle sind als theoretische Grundlage empirischer Ansätze dann ungeeignet, wenn die persönliche Erfahrung des Probanden mit den durch die Begriffe bezeichneten Objekte eine zentrale Rolle spielt.
- Die Zuordnung von Konzepten zu Kategorien nach dem "Alles-oder-Nichts-Prinzip" steht nicht im Einklang mit den Ergebnissen empirischer Untersuchungen. Diese favorisieren eher eine Zuordnung nach fuzzy, d. h. "unscharfen" Gesichtspunkten.
- Die Gültigkeit dieser Modelle ist auf einfache nominale Konzepte, in der Regel "natürliche Kategorien", beschränkt.
- Für Konzepte, die Sachverhalte und Ereignisse betreffen, haben derartige Modelle nur begrenzte Aussagekraft.

7.2.3 Der Ansatz von Lindsay, Norman und Rumelhart (LNR)

Bei diesem Ansatz handelt es sich um ein Netzwerkmodell, das mehr als nur semantische Bedeutungen von Begriffen abbilden will.

Ausgehend von der Annahme, daß menschliches Wissen im Gedächtnis in propositionaler Form gespeichert wird, konzipierten Lindsay, Norman und Rumelhart ein Repräsentationsmodell in Form eines sogenannten **aktiven strukturellen (semantischen) Netzwerkes**, das sogenannte LNR-Netzwerk, in dem sowohl Daten, als auch Prozesse für den Umgang mit diesen Daten gespeichert sind. Ihr Ansatz, dem eine einheitliche Repräsentationsform zu-

grundeliegt, unterscheidet sich dadurch von dem anderer Gedächtnismodelle, in denen deklaratives und prozedurales Wissen in unterschiedlichen, miteinander interagierenden Systemen abgebildet wird (vgl. Abschnitt 6.1).

Die Knoten des Netzwerkes stehen für Konzepte, die Kanten für gerichtete, benannte Relationen. Im LNR-Netzwerk werden dabei vier Arten von Knoten unterschieden (Johnson-Laird et al. /6/):

- (1) **Begriffsknoten (Concept Nodes):**
Ein Begriffsknoten repräsentiert ein Konzept. Die wesentlichen Kanten um es zu definieren sind: **Isa** (als Mengeninklusion), **ist** (für Attributeigenschaften) und **hat** (um einzelne Attribute zu erreichen). Zu manchen Konzepten gibt es keine einfachen linguistischen Entsprechungen.
- (2) **Primär- (type) Knoten (Primary Node):**
Diese Knoten beziehen sich auf ein Wort der Sprache und können über eine Definition des Wortes verbunden sein.
- (3) **Sekundär- (token) Knoten (Secondary Node):**
Sie repräsentieren eine spezielle Verwendung eines Primär-Knotens. Folglich besteht bei der Unterscheidung in Primär- und Sekundär-Knoten eine Verbindung zu Quillians Unterscheidung in type- und token-Knoten.
- (4) **Ereignisknoten (Event Nodes):**
Ereignisse haben einen speziellen Status im Netzwerk. Sie werden durch Ereignisknoten repräsentiert und sind mit den Aktionen, Personen und Objekten, die am Ereignis beteiligt sind, verbunden.

Als Relationen zur näheren Bestimmung von Handlungen werden zwischenbegriffliche Relationen (d. h. Benennungen an Kanten ausgehend von Knoten) verwendet, die sich an der von Fillmore (1968) entwickelten **Kasusgrammatik** orientieren.

Ähnlich wie Fillmore gehen auch Lindsay, Norman und Rumelhart davon aus, daß das Verb in der grammatikalischen Struktur von Sätzen eine zentrale Rolle spielt. Propositionen werden entsprechend dieser Auffassung als **Prädikat-Argument-Strukturen** angesehen. Das Prädikat einer Proposition stiftet eine Verbindung zwischen einem oder mehreren Argumenten.

Entsprechend der im LNR - Modell verwendeten **Argumenttypen**

- Agent,
- Erfahrender,
- Instrument,
- Objekt,
- Ursprung,
- Ziel,

- Lokation und
- Zeit

ergeben sich im Bezug auf das jeweilige Prädikat Relationsarten, wie z. B. Handlungsträger-Relation oder eine Relation, durch die Agent und Handlung miteinander verknüpft werden.

Veränderungen von Wissensstrukturen im Modell des aktiven, strukturellen Netzwerkes ergeben sich unter anderem auf der Grundlage der folgenden beiden zentralen Prozesse:

- (1) Generalisierung:
Die Generalisierung betrifft den Prozess der Suche nach gemeinsamen Merkmalen gespeicherter Konzepte und die Bildung von allgemeineren Klassen und Objektbegriffen.

Die Annahme ist dabei die, daß wie bei Quillian die gemeinsamen Merkmale nur noch in Verbindung mit dem jeweiligen Oberbegriff und die nicht gemeinsamen Merkmale in Verbindung mit dem jeweiligen Unterbegriff gespeichert werden (Prinzip der kognitiven Ökonomie).

- (2) Differenzierung:
Differenzierung erfolgt dann, wenn z. B. zu zwei Konzepten eines gemeinsamen allgemeinen Konzepts sich widersprechende Informationen vorliegen und Subkategorien zur Auflösung dieses Widerspruchs gebildet werden müssen.

7.2.4 Bewertung des Ansatzes von Lindsay, Norman und Rumelhart

Folgende Punkte werden an diesem Ansatz kritisiert:

- (1) Kontra:
 - Im LNR-Modell wird deklaratives und prozedurales Wissen in gleicher propositionaler Form repräsentiert. Diese Art der Repräsentation wird dem von Ryle (1949) genannten Unterscheidungskriterium der unterschiedlichen Verbalisierbarkeit beider Wissensformen nicht gerecht.
 - Es gibt kaum Hinweise auf eine psychologische Angemessenheit des Modells.
 - Die Spezifität der verwendeten Relationsarten, die Unterscheidung in Primär- und Sekundär-Knoten sowie die Netzwerkdarstellung selbst, in der jeder Begriff nur einmal repräsentiert ist, wirken sich nachteilig auf die Handlichkeit des Repräsentationssystems aus. Daher genügt das Modell kaum der Forderung nach einer ökonomischen und übersichtlichen Form der Wissensrepräsentation.

7.2.5 Der Ansatz von Graesser (1981)

Bei dem Verfahren von Graesser handelt es sich um ein Verfahren zur Textanalyse. Graesser will mit dem von ihm entwickelten Repräsentationssystem sowohl die in einem Text enthaltenen elementaren Aussagen und deren Relationen, als auch das Hintergrundwissen, das zur Bildung von Inferenzen und damit zum tieferen Verstehen dieser Aussagen notwendig ist, abbilden. Zur Erfassung von Hintergrundwissen verwendet Graesser eine Frage-Antwort-Technik.

Dieser Ansatz unterscheidet sich von den bisher betrachteten, da bei ihm zum ersten Mal "Umweltwissen" einfließt und damit erstmalig eine Erweiterung bestehender Ansätze nicht nur durch die Einführung neuer, von der "Umwelt" isolierter Knoten- bzw. Kantentypen realisiert wird.

Graesser unterscheidet sechs Kategorien von Konzeptknoten sowie fünf Kategorien benannter gerichteter Relationen:

(1) Knoten-Kategorien:

- (1.1) Äußerer Zustand (Physical State):
Aktueller Zustand der physikalischen oder sozialen Umwelt.
- (1.2) Äußeres Ereignis (Physical Event):
Zustandsänderung der physikalischen oder sozialen Umwelt.
- (1.3) Innerer Zustand (Internal State):
Aktueller Zustand des Wissens, der Attitude, des Gefühls, der Meinung einer Person.
- (1.4) Inneres Ereignis (Internal Event):
Zustandsänderung des Wissens, der Attitude, des Gefühls, der Meinung einer Person.
- (1.5) Handlungsziel (Goal):
Erreichter oder angestrebter Zustand.
- (1.6) Stil, Art und Weise (Style):
Merkmale einer Handlung oder eines Ereignisses.

(2) Relationen-Kategorien:

- (2.1) Ziel-Teilziel-Relation (Reason).
- (2.2) Setzung eines Zieles in Abhängigkeit von einer Gegebenheit (Initiate).
- (2.3) Konsequenz eines Zustands-, Handlungs- oder Ereignisknotens (Consequence).
- (2.4) Art und Weise der Verknüpfung von Handlungen oder Ereignissen mit ihren Merkmalen (Manner).

- (2.5) Attribution, d. h. Verknüpfung eines Konzeptes mit entsprechenden Zustandsangaben (Property).

Die Darstellung der individuellen Wissensstruktur über die im Text behandelten Inhalte erfolgt wiederum in Form eines Graphen. Hierfür wird ein gegebener Text zunächst in seine elementaren Aussagen (Propositionen) zerlegt. Die Aussagen werden anschließend in der von der Sequenz des Gedankenflusses induzierten Anordnung in einem Graphen einschließlich der zwischen ihnen bestehenden benannten, gerichteten Relationen dargestellt.

Zur Vervollständigung des Graphen durch die für das Verstehen notwendigen Hintergrundinformationen und zur Aufdeckung sogenannter propositionaler Inferenzen (dies sind die für die zur Konstruktion der Textbasis notwendigen Inferenzen, die über die lexikalische Ebene hinausgehen) und pragmatischer Inferenzen (dies sind schemageleitete Inferenzen, die über die lexikalische Ebene hinausgehen) werden anschließend an die Textlektüre Fragen nach dem "Warum", "Wie" etc. gestellt.

Die auf der Grundlage des Textes und die via Frage-Antwort-Technik ermittelten Propositionen werden dann in einem vollständigen Graphen integriert.

Aus dieser Darstellung ist dann einerseits der lexikalische Textinhalt rekonstruierbar, zum anderen wird relevantes Hintergrundwissen einbezogen, das für das Textverstehen bedeutsam ist.

7.2.6 Bewertung des Ansatzes von Graesser

Folgende Punkte werden an dem oben dargestellten Ansatz von Graesser kritisiert:

(1) Pro:

- Es lassen sich auf dieser Grundlage auf vergleichbar ökonomische Weise Handlungsstrukturen beschreiben und identifizieren.
- Über eine Analyse der Art der dominierenden Kategorien von Knoten und Relationen lassen sich dabei Substrukturen identifizieren, die sowohl einen qualitativen und quantitativen Vergleich von Wissensstrukturen verschiedener Probanden, als auch eine Analyse der Veränderungen dieser Strukturen im Verlauf von Informationsverarbeitungsprozessen ermöglichen.
- Das Interessante an dem von Graesser vorgestellten Ansatz besteht weniger in der Art des verwendeten Repräsentationssystems zur Abbildung von Textinformationen, sondern in der Art und Weise der Erhebung relevanter Strukturdaten.
- Dieser Ansatz verweist auf konkrete Möglichkeiten, wie Inferenzen und damit relevantes Hintergrundwissen offengelegt und im Kontext des Re-

präsentationssystem zur differenzierteren Abbildung der interessierenden Wissensstrukturen beitragen können.

- Bei den hier dargestellten Ansätzen bildet der Ansatz von Graesser in punkto Einbeziehung von Umweltwissen die höchste Stufe. Es wird hier zumindest ein Versuch unternommen, Umweltwissen in das Netzwerk einzubringen.

Dieser Punkt ist wesentlich, da durch Hintergrund oder Umweltwissen Probleme wie z. B. Mehrdeutigkeiten oder "unsinnige" Zusammenhänge zumindest ansatzweise erkannt werden können.

(2) Kontra:

- Weniger geeignet erscheint das System für eine Erfassung semantischen Wissens über die Elemente eines Realitätsbereichs. Hierzu fehlen dem System sowohl entsprechende Knotenkategorien (z. B. Oberbegriff/Unterbegriff) wie auch Spezifikationen angemessener Relationen-Kategorien (z. B. Element-Klassen-Relationen, Teil-Ganzes-Relationen).
- Die Gültigkeit dieses Repräsentationssystems für die Bearbeitung wissensdiagnostischer Fragestellungen erscheint aufgrund der Art der einbezogenen Knoten- und Relationen-Kategorien vor allem auf die Erfassung episodischen Wissens begrenzt.

7.2.7 Bewertung des propositional orientierten Ansatzes zum Wissenserwerb

Folgende Punkte werden am propositional orientierten Ansatz kritisiert:

(1) Pro:

- Die Repräsentation von Wissensinhalten in Form von Propositionen ist in der kognitiven Gedächtnistheorie weit verbreitet.
- Die Form der propositionalen Darstellung hat sich im großen und ganzen dort bewährt, wo es um die Repräsentation verbal codierter Gedächtnisinhalte geht und Aussagen über Verstehensprozesse getroffen werden sollen.
- Weiterführende Ansätze versuchen Wissensstrukturen differenzierter, reflektierter und unter Einbeziehung von "Umweltwissen" umfassender zu ermitteln, als dies in den traditionellen Ansätzen der Fall ist.

Dies ist möglich, da das erkennende Subjekt am Entscheidungsprozeß über Angemessenheit der inhaltlichen und strukturellen Eigenschaften

einer aus Strukturdaten generierten Repräsentation des in Frage stehenden Erkenntnisobjektes (der mentalen Repräsentation des interessierenden Realitätsaspektes) beteiligt wird.

- Der propositionalen Repräsentationsform wird von einzelnen Autoren gedächtnispsychologische Realität zuerkannt, andere Autoren sehen darin nicht mehr als ein Vehikel, mit dem sich deklaratives Wissen und dessen Veränderung sinnvoll darstellen läßt.

(2) Kontra:

- Da bei der propositionalen Darstellung in Netzwerkform Wissen über Begriffe, Sachverhalte, Ereignisse immer nur unter Verwendung einer Vielzahl von Knoten und Relationen möglich ist, wobei jedes Konzept nur einmal dargestellt wird, erscheinen Wissensrepräsentationen nicht nur unökonomisch und unübersichtlich, sondern auch psychisch wenig angemessen.
- Propositionale Darstellungsformen z. B. von sprachlichen Äußerungen können nicht die gesamte Bedeutung, die hinter dieser Äußerung steckt, erfassen. Propositionen eignen sich vor allem zur Akzentuierung formallogischer Strukturen; sprachliche Äußerungen betreffen jedoch mehr als nur formal logische Aspekte.
- Ein grundsätzliches Problem der propositionalen Darstellungsweise besteht darin, daß aufgrund der unterschiedlichen Notationsweisen nicht für jede Aussage eine einheitliche Form der propositionalen Darstellung möglich ist.
- Bei der Repräsentation deklarativen Wissens von großer interner Kohärenz ist die propositionale Darstellung in Netzwerkform, aufgrund der großen Anzahl an Relationen, weniger geeignet.
- Probleme ergeben sich ferner bei der Repräsentation prozeduralen Wissens, bei der gelegentlich eine Wissensrepräsentation in Form von Produktionen (vgl. Abschnitt 7.4) sinnvoller erscheint.

7.2.8 Resümee

Da der proportional orientierte Ansatz zum Wissenserwerb auf der Prädikatenlogik erster Ordnung beruht, vereint er sowohl deren großen Vorteil einer streng formalen Darstellung, als auch deren Nachteil der "flachen" Struktur in sich.

Dieser Ansatz eignet sich besonders zur Repräsentation des semantischen Gehaltes sprachlicher Inhalte und wird aus diesem Grund auch häufig durch ein semantisches Netz model-

liert. Er beschränkt sich jedoch weitgehend auf Objekte, die sich natürlichen Kategorien zuordnen lassen; Wissenserwerbsprozesse werden vernachlässigt.

Aufgrund der vorgegebenen Relationenarten ergibt sich eine begrenzte, geringe Vernetzungsdichte zwischen den einzelnen Knoten; dies entspricht sicherlich nicht der gedächtnismäßigen Realität.

Da es sich bei allen hier behandelten Ansätzen um Repräsentationen mehr oder minder formaler Aspekte handelt, werden z. B. persönliche Erfahrungen mit den durch die Begriffe bezeichneten Objekte vernachlässigt. Kontextinformation kann zwar über Umwege eingebracht werden, in der Verarbeitung ist jedoch eine Berücksichtigung verschiedener Kontexte im Sinne von Ein- bzw. Ausblenden relevanter bzw. nicht-relevanter Kontexte nicht möglich.

7.3 Der schematheoretische Ansatz zum Wissenserwerb

Wie bereits in Abschnitt 1.2.3.1 angedeutet, handelt es sich bei Schemata um Wissensstrukturen, in denen aufgrund von Erfahrungen typische Zusammenhänge eines Realitätsbereiches repräsentiert werden.

In den Schemata sehen viele Kognitionspsychologen jene ineinander verschachtelten und miteinander vernetzten Bausteine des Denkens, der Sprache, des Gedächtnisses und der Wahrnehmung, die sich zur Beschreibung und Erklärung komplexer Phänomene der menschlichen Informationsverarbeitung eignen.

Im Zusammenhang mit dem Wissenserwerb kann man Schemata sowohl als Ergebnis, als auch als Voraussetzung sehen. Die beiden Fragen - Erwerb von Schemata und Wissenserwerb mit Hilfe von Schemata - gehören daher eng zusammen. In diesem Zusammenhang darf man jedoch nicht vergessen auf die wichtige Funktion der Schemata bei der Validierung von bestehendem und erworbenem Wissen hinzuweisen.

7.3.1 Die Grundzüge des Schemakonstruktes

Im folgenden werden die Grundzüge des Schemakonstruktes zusammengefaßt dargestellt:

- Schemata sind kognitive Strukturen, in denen allgemeines Wissen im Gedächtnis repräsentiert ist. Das Wissen über typische Zusammenhänge in einem Realitätsbereich und auch das Wissen über häufig wiederkehrende Handlungs- bzw. Ereignisfolgen (vgl. Keller et al. /9/) ist in Schemata organisiert.

- Schemata enthalten somit sowohl deklaratives, als auch prozedurales Wissen.
- Schemata sind die elementaren Bedeutungs- und Verarbeitungseinheiten des menschlichen Informationsverarbeitungssystems.
- Schemata weisen **Leerstellen** (Slots) auf, da verschiedene Merkmale in Abhängigkeit vom jeweiligen Kontext unterschiedliche Werte annehmen können. Sofern keine spezifischen Informationen aus der Umwelt (Kontext) vorliegen, können diese Leerstellen auch mit **Standardwerten** (Default Values) belegt werden. Die Variablen eines Schemas liegen in einem durch Erfahrung **festgelegten Wertebereich**.
- Schemata können ineinander eingebettet sein: Elementare Schemata können in Schemata höherer Ordnung (Hierarchie) eingebettet sein (Schemata über Schemata).
- Schemata sind aktive, miteinander in Wechselbeziehung stehende Wissensstrukturen, die aktiv am Verständnis einlaufender Information beteiligt sind und die Ausführung der Verarbeitungsoperationen steuern (→ stark vernetzte Struktur der Schemata).
- Schemata enthalten sowohl **generisches**, als auch **episodisches Wissen**. Das Konzept der **Schemainstantiierung** wurde eingeführt, um das Zusammenwirken generischen und episodischen Wissens bei der Informationsverarbeitung darzustellen: Wird einer Variablen (Verweis auf eine allgemeine Klasse oder Konzept, der durch einen aktuellen Wert ersetzt werden kann) eines Schemas ein bestimmter Wert, z. B. durch Information aus der Umgebung, zugewiesen, so gilt das Schema als instantiiert.

Die episodische Information wird als Bestandteil des instantiierten Schemas gespeichert. Voraussetzung hierfür ist, daß sich die episodische Information mit einem der gespeicherten Schemata mehr oder minder überlappt, d. h. daß sie **prototypisch** für das Schema ist. Bei der Schemainstantiierung, insbesondere bei der Zuweisung von Standardwerten zu Leerstellen, spielen **inferentielle Prozesse** eine wesentliche Rolle.

- Schemata unterliegen einem ständigen Wandel, indem sie sich entsprechend der je gegebenen Informationsverarbeitungs-Anforderung **adaptieren** und **umstrukturieren**. In Abschnitt 1.2.3.1 wurde dieser Wandel durch die Prozesse der Assimilation und Akkommodation bereits beschrieben.

Im Verlaufe der Schemaentwicklung erfolgt eine zunehmende Veränderung des Schemas in Richtung auf eine größere Differenziertheit (Tergan /17/).

- Schemata haben nicht nur eine **Struktur-**, sondern auch eine ausgeprägte **Prozeßkomponente**: Sie beinhalten eine ganze Reihe von Kontrollprozessen, sie bewerten ihre Passung bzw. Kongruenz mit einlaufenden Informationen (Validierung), sie rufen evtl. andere Schemata auf etc..

Dies schlägt sich im Zusammenspiel zwischen **datengeleiteten** (bottom up) und **schemageleiteten** (top down) Verarbeitungsprozessen nieder. Einlaufende Informationen aktivieren bestimmte Schemata (bottom up), die aktivierten Schemata führen ihrerseits zu bestimmten Hypothesen bzgl. der zu erwartenden Information (top down).

Bei der Entscheidung darüber, welches Schema für die Interpretation der aktuellen Information angemessen ist, kommen ebenfalls inferentielle Prozesse ins Spiel.

- Schemata repräsentieren das Wissen unterschiedlichster Wissensbereiche.
- Allgemeine Schemata werden durch den Prozeß der Verallgemeinerung von speziellen Instanzen gebildet; spezielles Wissen wird aus den in den allgemeinen Schemata enthaltenen Prinzipien abgeleitet.

Ein zentraler Punkt bei obigem besteht darin, daß Schemata als elementare kognitive Struktur nicht nur das Wissen selbst enthalten, sondern auch Information darüber, wie dieses Wissen einzusetzen ist. Schemata sind damit nicht statische, sondern **dynamische Wissens-einheiten**, die in aktiviertem Zustand auch Inferenzprozesse steuern (Tergan /17/) und deren strukturelle Sicht kontextabhängig ist (Keller /8/).

7.3.2 Der Erwerb und die Modifikation von Schemata

Zum Erwerb und zur Modifikation von Schemata gibt es Ansätze von Rumelhart et al /15/ und von Abelson /1/. Bei Abelson liegt der Schwerpunkt auf den Anfangs-, Zwischen- und Endprodukten des Prozesses der Schemabildung.

Rumelhart und Norman gehen davon aus, daß durch graduellen Zuwachs von Information, durch die Feinabstimmung bereits bestehenden Wissens und durch die Umstrukturierung bereits bestehenden Wissens Lernen möglich ist. Diese drei schematheoretisch begründeten Modi des Lernens werden im folgenden in ihren Grundzügen näher erläutert:

- (1) Wissenszuwachs (Accretion):
Der Wissenszuwachs ist ein **assimilativer Prozeß** (vgl. Abschnitt 1.2.3.1), bei dem das Schema, unter das die Information subsumiert wird, selbst nicht verändert wird, d. h. es findet im informationsverarbeitenden System selbst keine strukturelle Veränderung statt. Als Ergebnis dieser Art des Lernens werden Instantiierungen bereits vorhandener Schemata gespeichert, d. h. man fügt neue Daten zur bestehenden Datenbank hinzu und hält sich dabei an die bestehende Organisation.
- (2) Umstrukturierung (Restructuring):
Umstrukturierung findet dann statt, wenn zur Interpretation neuer Informationen neue Strukturen konstruiert werden müssen und diese eine neue Organisation des bereits gespeicherten Wissens erforderlich machen. Umstrukturierung führt zu grundlegenden Veränderungen bzw. zum Neuaufbau von Schemata.

Diese neuen Strukturen lassen dann neue Interpretationen des Wissens, andere Zugänge zum Wissen und Veränderungen in der Interpretation des Wissens und daher die Akquisition neuen Wissens zu.

Rumelhart et al. sehen dies als einen zumeist langfristigen und seltenen Prozeß, für den möglicherweise zunächst eine kritische Masse an aufgestauter Information erforderlich ist. Es ist demnach die Unhandlichkeit und die unzureichende Passung dieses aufgestauten Wissens, in bezug auf die betreffende Struktur und die vorhandenen Anforderungen, woraus die Notwendigkeit für eine Umstrukturierung erwächst. Die Ergebnisse fundamentaler Untersuchungen weisen darauf hin, daß ein solcher grundlegender Umbau bestehender Schemata durch Wissensvermittlung nur schwer zu erreichen ist. Die Umstrukturierung von Schemata kann auf folgende Arten geschehen:

- Durch den Prozeß der Schemainduktion:
Schemainduktion ist eine Form des Lernens durch Kontiguität (zeitliches Zusammentreffen von Reiz und Reaktion). Die Wahrnehmung von Sachverhalten bzw. Ereignisfolgen, die häufig zusammen auftreten, führt zur Umstrukturierung bestehender bzw. zum Aufbau neuer Schemata, unter die die neue Information subsumiert wird

Die Schwierigkeiten bei der Induktion bestehen im Entdecken solcher Regularitäten. Schemainduktion wurde bisher vorwiegend in natürlichen, eher **inzidentiellen** (d. h. auf die Details einer Sache bezogenen) **Lernsituationen**, z. B. beim Erwerb des Wissens von Kindern über häufig wiederkehrende Ereignisfolgen im Verlauf ihrer Entwicklung, untersucht.

- Durch den Prozeß des Mustervergleichs:
Dabei wird neue Information auf ein bereits bestehendes Schema abgebildet. In den übereinstimmenden Teilen wird das alte Schema beibehalten, in den nicht übereinstimmenden wird es modifiziert. Die einfachste Form aufgrund eines Mustervergleichs ein neues Schema zu erzeugen besteht in der Verwendung von Analogien. Man erzeugt damit ein Schema, indem man ein anderes bereits bestehendes Schema verallgemeinert.

Dieser Prozeß spielt bei **intentionalen** (d. h. zielgerichteten) **Lernprozessen** eine Rolle. Hierbei handelt es sich z. B. um das Erlernen komplexer schulischer Lehrstoffe.

Der Prozeß des Mustervergleichs kann sowohl die Generalisierung, als auch die Differenzierung eines bereits bestehenden Schemas bewirken. Man vermutet, daß der Großteil des Lernens durch Erzeugung neuer Schemata durch den Prozeß des Mustervergleichs ausgelöst wird.

- (3) Feinabstimmung (Tuning):
Während die Umstrukturierung die Erzeugung vollständig neuer Gedächtnisstrukturen beinhaltet, umfaßt die Feinabstimmung "nur" die Entwicklung bestehender Gedächtnisstrukturen in neue.

Die Feinabstimmung ist jene Lernform, bei der ein Schema kleinere Änderungen erfährt, um seine Anwendbarkeit zu optimieren. Dabei werden den Leerstellen des betreffenden Schemas feste Werte zugewiesen.

Auch die Feinabstimmung kann zur Generalisierung oder Differenzierung eines bestehenden Schemas führen, indem die Wertebereiche von Variablen dieses Schemas erweitert oder eingeschränkt werden.

Lernen durch Analogie (vgl. z. B. Michalski et al. /12/) ist beispielsweise eine Form bei der bestehende Schemata auf neue Sachverhalte generalisiert werden.

Sowohl Umstrukturierung, als auch Feinabstimmung sind **akkommodative Prozesse**, die dazu führen, daß ein Schema, das für die Verarbeitung neuer Information genutzt wird, selbst eine Veränderung erfährt. Ohne diese beiden Lernprozesse könnten keine neuen Konzepte aufgebaut werden.

Der (graduelle) Unterschied zwischen Umstrukturierung und Feinabstimmung besteht darin, daß bei der Umstrukturierung das Ausgangsschema um eine Leerstelle erweitert wird, während bei der Feinabstimmung lediglich einigen der bereits vorhandenen Leerstellen bestimmte Werte zugewiesen werden.

7.3.3 Die Stufen des Schemaerwerbs

Anlaß für den Prozeß der Schemainduktion ist in vielen Fällen die Wahrnehmung von Regularität und Ordnung in der Umwelt. Abelson unterscheidet in diesem Prozeß die folgenden drei Stufen einer zunehmend abstrakteren Repräsentation von Skriptwissen:

- Die Stufe der episodischen Repräsentation:
Wird eine bestimmte Ereignisfolge zum ersten Mal erlebt, so ist sie als Episode repräsentiert.
- Die Stufe der kategorischen Repräsentation:
Die wiederholte Erfahrung mit ähnlichen Episoden führt zu einer zunehmenden Verallgemeinerung.
- Die Stufe der hypothetischen Repräsentation:
Auf dieser Stufe ist Skriptwissen als eine komplexe kausale Struktur mit vielen hypothetischen Wenn-Dann-Beziehungen repräsentiert, d. h. als semantisches Netz modellierbar.

Die Ergebnisse von Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, daß der Aufbau von Skripten keineswegs gradlinig im Abelsonschen Sinne verläuft; zum einen wurde festgestellt, daß nur wenige Versuchspersonen die postulierte dritte Stufe (hypothetische Skripten) erreichen, die sich durch die Verwendung hochabstrakter Substantive und entsprechender grammatikalischer Formen (Konditional etc.) auszeichnet. Dies bestätigt die Ansicht, daß abstraktes Denken, d. h. Denken das sich vorwiegend auf formale Relationen bezieht, selten ist und häufig spezifisches Training voraussetzt.

7.3.4 Die Funktion von Schemata für den Wissenserwerb

In Abschnitt 7.3.2 wurde der Wissenserwerb als Aufbau und Modifikation von Schemata beschrieben. Im folgenden wird dargestellt, wie bereits vorhandene Schemata den weiteren Wissenserwerb beeinflussen.

- Schemata steuern die Verteilung der Aufmerksamkeit auf schemabezogene und nicht-schemabezogene Informationen.

Die **Hypothese der selektiven Aufmerksamkeit** besagt, daß schemarelevante Information mehr Aufmerksamkeit erfährt, als nicht-schemarelevante. Einmal aktivierte Schemata lösen Erwartungen aus (top-down-Prozeß); vgl. Abschnitt 7.3.1, die dazu führen, daß gezielt nach jenen Informationen gesucht wird, die eröffnete Leerstellen ausfüllen.

Die schemabezogene Information erfährt dadurch erstens mehr Aufmerksamkeit und wird zweitens auch besser behalten.

Gegen diese Hypothese werden folgende Überlegungen vorgetragen: Wenn durch ein Schema Leerstellen eröffnet und diese durch neue Information aufgefüllt werden, so benötigt dies keinen erhöhten Aufwand an Aufmerksamkeit, da ein Vorteil schemageleiteter Informationsverarbeitung gerade darin besteht, daß sie ökonomisch ist und den Verarbeitungsaufwand reduziert.

Daraus resultiert unter anderem die These, daß die erhöhte Aufmerksamkeit allenfalls auf **kognitive Prozesse** (z. B. einen kognitiven Konflikt, vgl. Abschnitt 1.2.3.3) hinweist, die es zu untersuchen gelte, um nähere Informationen über die Verteilung der Aufmerksamkeit zu erhalten. Daher liegt es nahe, bei zukünftigen Untersuchungen auf die Randbedingungen zu achten, die die aufmerksamkeitssteuernde Wirkung von Schemata moderieren.

- Schemata wirken bei der Enkodierung neuer Informationen als verständnis- und kohärenzstiftende Rahmen, die die Integration neuen Wissens in die bestehende Wissensbasis erleichtern. Dadurch wird die neue Information erstens besser verstanden und zweitens auch besser behalten.

Beispielsweise wird durch die Vorgabe eines sinnstiftenden Rahmens (z. B. einer Überschrift) ein Schema aufgerufen; dessen Leerstellen werden durch die darauffolgenden Informationen (z. B. ein Text) instantiiert.

Die Überlegungen zur **Integrationsfunktion eines Schemas** sind denen zur Wirkungsweise eines **advance Organizers** sehr ähnlich. Für den Fall, daß der Lernende mit dem Lehrmaterial noch nicht vertraut ist, gibt es Empfehlungen dem Lehrstoff **expositorische Organizer** voranzustellen, unter die der Lernende das neue Wissen subsumieren kann.

Der **Integrationseffekt von Schemata** konnte experimentell bestätigt werden. Die Integrationsfunktion von Schemata kommt auch in Situationen zum Tragen, in denen eine Person bereits über geeignete Schemata zur Verarbeitung der neuen Informationen verfügt, was ebenfalls experimentell, im Kontext des Experten-Nicht-Experten

(Novizen)-Paradigmas, in dem der verständnis- und behaltensfördernde Einfluß von Vorwissen auf den Erwerb neuer Informationen untersucht wird, nachgewiesen wurde.

Allerdings ist gerade bei solchen Untersuchungen nicht immer deutlich zu entscheiden, ob die behaltensfördernde Wirkung von Schemata auf einen Integrations-effekt während der Enkodierung oder eher auf die Nutzung des Schemas als Abrufhilfe zurückzuführen ist.

Untersuchungen haben ergeben, daß Schemata in Wiedergabesituationen auch als Abrufpläne genutzt werden, die die systematische Suche nach schemarelevanter Information im Gedächtnis steuern.

Obiges zeigt, daß die verständnisfördernde Funktion von Schemata auf den Erwerb neuer Information experimentell gut belegt ist. Die Frage nach der behaltensfördernden Wirkung von Schemata muß hingegen differenzierter beantwortet werden: Ein kurzfristig behaltensfördernder Effekt von Schemata bei der Enkodierung neuer Information kommt vorwiegend schema-atypischer, nicht jedoch schema-typischer Information zugute. Dies liegt daran, daß in der Wiedergabesituation schemakonsistente Informationen wiedergegeben werden, die jedoch in der ursprünglich zu erlernenden Informationsmenge nicht enthalten waren. Bei langen Behaltensintervallen wird jedoch die schema-typische Information besser behalten, wobei man bei diesen Untersuchungen eine Abhängigkeit von der Modalität der Behaltensprüfung berücksichtigen muß.

Des weiteren können Schemata den Erwerb neuen Wissens auch beeinträchtigen. Dies passiert beispielsweise dann, wenn die Schemata, über die eine Person verfügt, unangemessen oder stark verfestigt sind.

- Schemata beeinflussen auch den **Abruf** (retrieval) und die **Rekonstruktion von Wissen aus dem Gedächtnis** und dessen Ausgabe (Output Editing).

Da der Schwerpunkt dieses Kapitels auf dem Wissenserwerb liegt, wird dieser Aspekt hier nicht näher behandelt.

7.3.5 Bewertung des schematheoretischen Ansatzes zum Wissenserwerb

Folgende Punkte werden am schematheoretischen Ansatz kritisiert:

(1) Pro:

- Die begriffliche Schwäche und die Vagheit. Der Vagheitsvorwurf kann jedoch entkräftet werden, indem man die Schematheorie bereichsspezifisch einschränkt. Damit erhält man einen zumindest mit anderen psychologischen Theorien vergleichbaren Exaktheits- und Detaillierungsgrad.

- Es erfolgt keine strikte Trennung von deklarativem und prozeduralem Wissen.
- Obwohl der Übergang von der unbewußten zur bewußten Informationsverarbeitung problematisch ist (siehe unten) handelt es sich prinzipiell um einen Ansatz, der der Strukturiertheit und Organisiertheit menschlichen Wissens, sowohl als Voraussetzung, als auch als Folge von Wissenserwerbsprozessen, Rechnung zu tragen versucht.
- Die Frage, wie Schemata als bereits ausgebildete kognitive Strukturen den Wissenserwerb beeinflussen wurde bereits recht intensiv untersucht, was sich auch in Abschnitt 7.3.4 widerspiegelt.

(2) Kontra:

- Es fehlt eine angemessene Repräsentation von Begriffsbedeutungen in Schemata. Daher empfiehlt sich eine Darstellung als neuronales Muster.
- Der Übergang von der unbewußten zur bewußten Informationsverarbeitung ist problematisch. Hierzu ist der Aufbau eines Fehlermodelles im Sinne einer (kontext-sensitiven) Restriktion des bestehenden Modelles sinnvoll.
- Der Hauptkritikpunkt betrifft die allumfassende und letztendlich schwer falsifizierbare Wirkung von Schemata, die einer heuristischen oder statistischen Vorgehensweise entspricht.
- Die theoretische und empirische Analyse des Erwerbs und des Aufbaus von Schemata wurde aus den bisherigen Untersuchungen weitgehend ausgeklammert. Dies liegt in der Tatsache begründet, daß die Basis-Relationen auf einer neuronalen Ebene (ererbte, angeborene) angesiedelt sind.

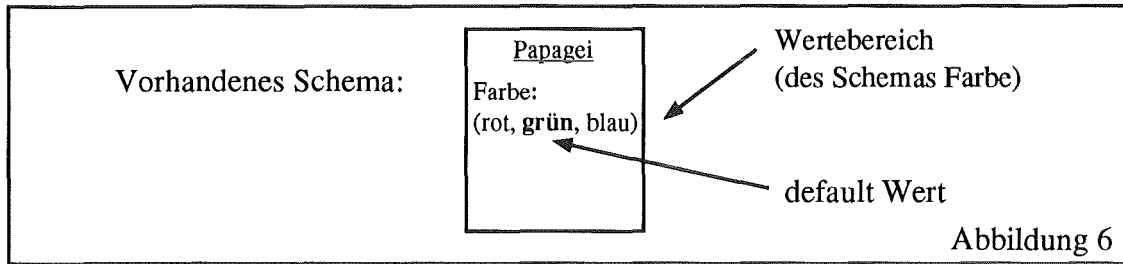
Dies gilt auch für die in Abschnitt 7.3.2 dargestellten Überlegungen von Rumelhart et al., die aus dieser Sicht allenfalls heuristisch fruchtbare Interpretationen bekannter Lernpläne, wie Generalisierung und Diskriminierung, mit dem Vokabular der Schematheorie sind.

7.3.6 Resümee

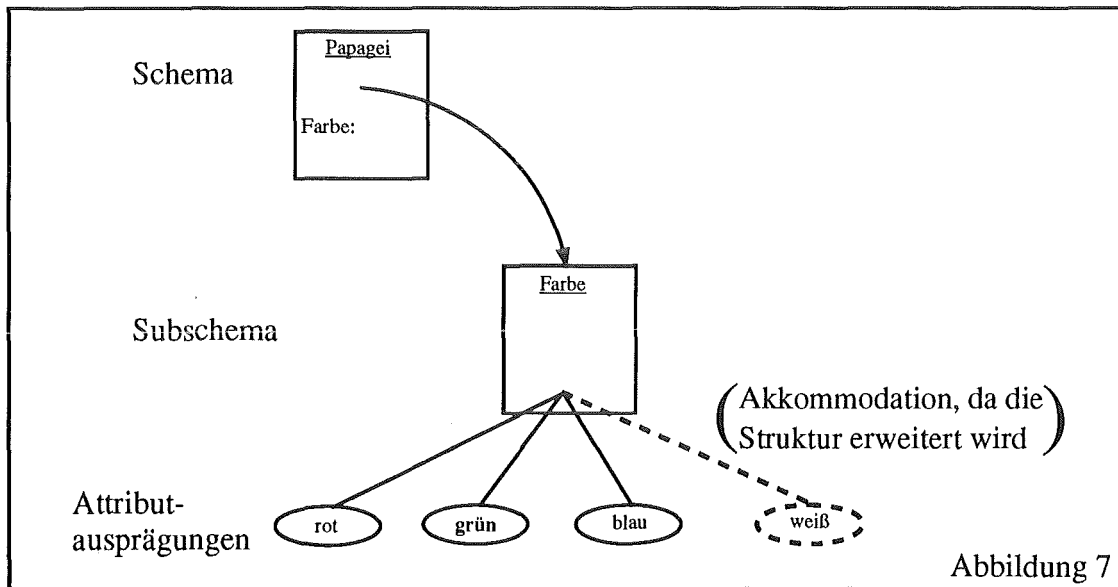
Bei der Begriffsbildung ist es sinnvoll eine Abgrenzung zu Rumelhart et al. /15/ durchzuführen, da dort der Begriff der Feinabstimmung in akkommodativer Weise und nicht, wie es praktikabler erscheint, in assimilativer Weise verwendet wird.

Man muß hierbei berücksichtigen, daß es sich bei der Feinabstimmung eigentlich um einen zweistufigen Prozeß handeln kann, der sowohl eine assimilative, als auch eine akkommodative Komponente besitzt.

Beispiel:



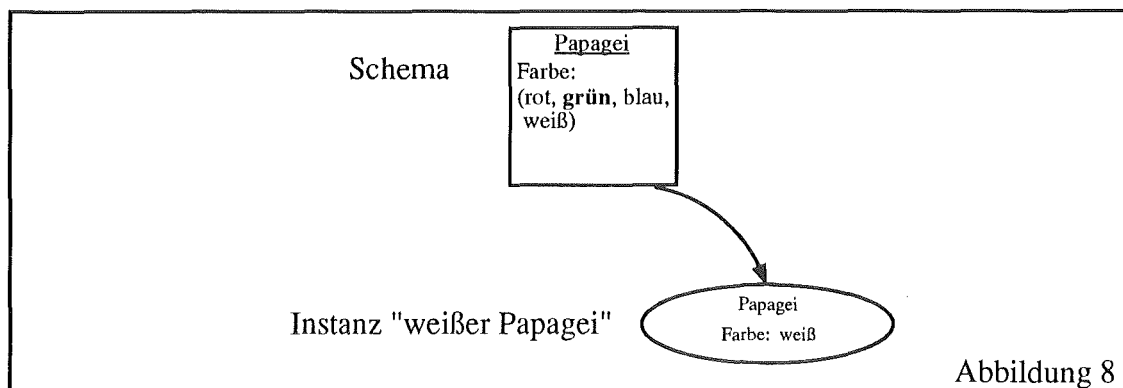
Wird nun ein weißer Papagei angetroffen, so müssen in der Struktur die folgenden Änderungen erfolgen:



Der Wertebereich des allgemeinen Schemas Farbe wurde (akkommodativ) um ein abstraktes Subschema weiß, als Prototyp, erweitert. Im Rahmen eines assimilativen Vorgangs wird dann dem Schema Papagei das modifizierte Schema Farbe als Subschema zugewiesen.

Die Aufnahme des angetroffenen weißen Papagei in die (dann) bestehende Struktur, d. h. das Erzeugen des Objektes (der Instanz) weißer Papagei ist dann wiederum nur noch ein assimilativer Vorgang.

Das Resultat dieser Vorgehensweise wird in Abbildung 8 dargestellt:



Grundsätzlich scheint es sinnvoll diesen Ansatz weiterzuverfolgen, da er in seiner Struktur und Organisation versucht dem Vorbild menschlichen Wissens sehr nahe zu kommen und gegenüber den anderen Ansätzen besonders in puncto Mächtigkeit und Flexibilität deutlich überlegen ist. Die in Abschnitt 7.3.5 angeführten Argumente gegen den schematheoretischen Ansatz zum Wissenserwerb sind eigentlich keine richtigen Gegenargumente, sie stellen vielmehr die speziellen Eigenarten dieses Ansatzes heraus.

Die Mächtigkeit und Flexibilität dieses Ansatzes äußert sich besonders in der Vielfalt der Interpretationsmöglichkeiten (**Sichtweisen**) des dargestellten Wissens. Gemäß dem weiter unten erläuterten Prinzip des "operator operandum" kann das gleiche Wissen einmal als Operator und zum anderen als Operation aufgefaßt werden. Des weiteren kann in diesem Ansatz das Wissen kategorisch, instantiell oder analog, je nach Sichtweise, interpretiert werden. Aus der möglichen Betrachtungsweise kategorisch - instantiell ergibt sich als wesentliche Folgerung, daß die Wissensverarbeitung sowohl hierarchisch, als auch attributgesteuert erfolgen kann.

Das Argument, es finde hier keine strikte Trennung von deklarativem und prozeduralem Wissen statt, ist eigentlich nicht ganz richtig; im Grunde werden diese beiden Wissensformen in diesem Ansatz nicht unterschieden, sondern es findet eher eine Unterscheidung zwischen prozeduralem und kategorischem Wissen aufgrund des "operator operandum" - Prinzips, Arnold /2/, statt.

Unter dem Prinzip des "operator operandum" versteht Arnold, daß der Operator einer Ebene Gegenstand neuen Operierens einer "höheren" Ebene werden kann; d. h. die primären Operatoren müssen in einer Planungsebene, in der sie verknüpft werden können, zu Gegenständen neuen, sekundären Operierens werden, um so zur Entwicklung von hierarchischen Strategien zu gelangen, welche das Erreichen gesteckter Ziele (besonders im Rahmen der Lösung von Interpolationsproblemen) ermöglichen.

Das angestrebte Konzept kognitiver Schemata (Keller /8/) geht über das "operator-operandum" - Prinzip von Arnold hinaus. Dieses Konzept kann man sich graphisch etwa wie in Abbildung 9 dargestellt vorstellen.

Ausgehend von der gesamten Wissensstruktur, die in Form von Schemata sämtliche Problemlösungsmethoden, Transformationen und das gesamte Wissen umfaßt wird durch Anwendung einer Transformation, kontextabhängig eine "Sicht" erzeugt. Diese "Sicht" stellt den Bereich erhöhter Aufmerksamkeit im Zuge der Problemlösung dar. Sie umfaßt nicht nur den Problembereich, sondern auch die zugehörigen Problemlösungsmethoden.

Grundsätzlich kann man im Zusammenhang mit der "Sicht" drei Prozesse unterscheiden:

- Verschiebung des Punktes höchster Aufmerksamkeit innerhalb der aktuellen "Sicht" (Änderung des Betontheitsreliefs (vgl. Abschnitt 4.3.1)); dies ist, bzgl. der Schemata, ein assimilativer Prozeß.
- Erweiterung oder grundlegender Umbau der Struktur der Schemata innerhalb der aktuellen "Sicht"; dabei handelt es sich, bzgl. der Schemata, um akkommodative Prozesse, die z. B. durch einen Wechsel der Problemlösungsstrategie ausgelöst werden können.

- Verwerfen der aktuellen "Sicht". Durch eine Rückkopplung wird ein neuer Transformationsprozeß ausgelöst, der eine andere "Sicht" erzeugt.

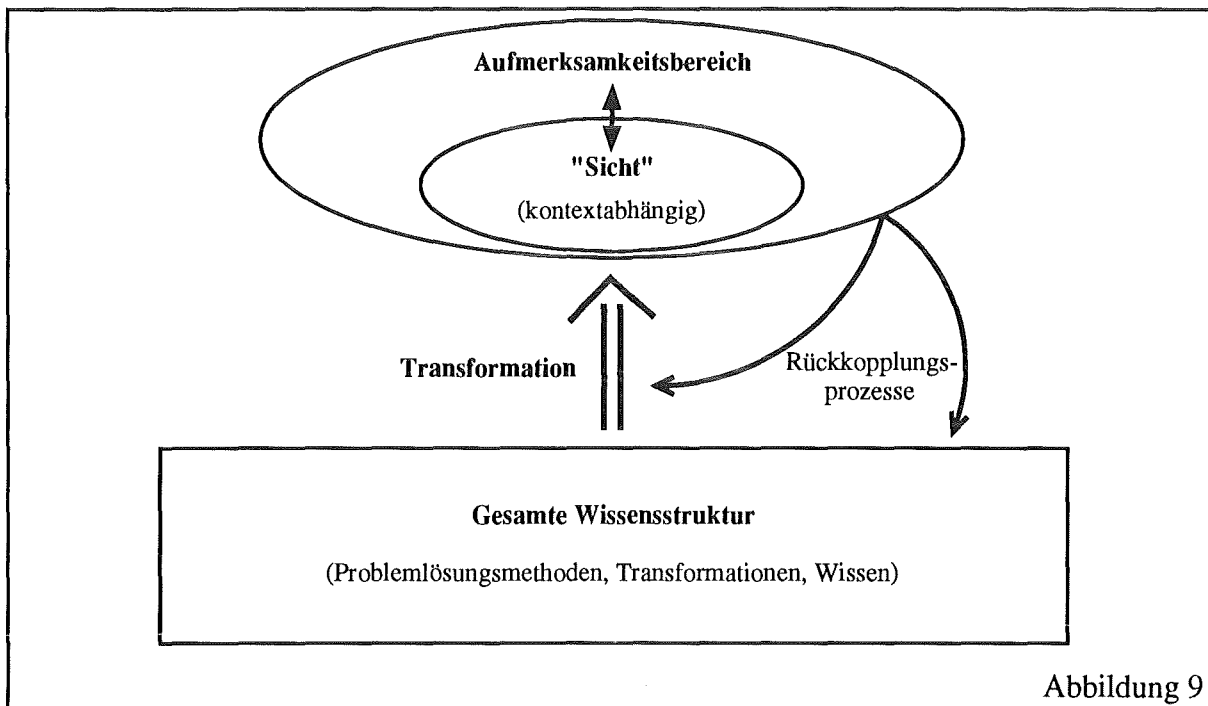


Abbildung 9

Durch das Verwerfen einer "Sicht" und die darauffolgende neue Transformation wandelt sich auch der Aufmerksamkeitsbereich, der als transitive Hülle der "Sicht" aufgefaßt werden kann.

Die im Zusammenhang mit der "Sicht" erläuterten Prozesse können Rückkopplungsprozesse auslösen, die im Rahmen von Reflexion und Erfolgsprotokollierung wiederum zu Veränderungen der Transformation oder der gesamten Wissensstruktur führen können.

Dieses Konzept geht über den Arnoldschen Ansatz deutlich hinaus, da es unterschiedliche, dynamisch veränderbare Interpretationen des Wissens ermöglicht, den Prozeß der Selbstreflexion, der sowohl interpretative, als auch strukturelle Veränderungen hervorrufen kann, z. B. durch Rückkopplungsprozesse simuliert und durch zahlreiche Interpretationsmöglichkeiten nicht nur hierarchische Problemlösungsansätze berücksichtigt, sondern auch attributgesteuert oder musterorientiert vorgehen kann. Beim Ansatz von Arnold liegt die Flexibilität im wesentlichen nur in der Interpretation der Operatoren während die Struktur auf der sie agieren eher starr ist.

Die allumfassende Wirkung von Schemata beinhaltet den eher positiven Aspekt, daß sich dahinter die wichtigen Prozesse der Erfahrung und Reflexion verbergen.

Gerade in dem speziellen Bereich wissensbasierter Systeme, dem Maschinellen Lernen, bieten sich, aufgrund der Mechanismen zum Erwerb und der Modifikation von Schemata, sowie deren Funktionen beim Wissenserwerb (vgl. die Abschnitte 7.3.2 und 7.3.4) zahlreiche Möglichkeiten für den konkreten Einsatz eines auf dem Konzept kognitiver Schemata entwickelten Systems. Eine Konkretisierung dieses Ansatzes, aus der Sicht des Maschinellen Lernens wird in Weinberger et al. /18/ dargestellt.

7.4 Der Ansatz der Produktionssysteme zum Wissenserwerb

Produktionssysteme als Ansatz der Kognitionspsychologie gehen auf einen in der Automatentheorie zur Darstellung von Prozessen entwickelten Formalismus zurück, der von der Psychologie aufgegriffen und zur Beschreibung von Verhaltensabläufen und mentalen Operationen verwendet wird.

Diese Arbeiten führen zu Computersimulationen von Prozessen menschlicher Informationsverarbeitung mit starken Bezügen zur Künstlichen Intelligenz (vgl. auch Keller et al. /9/).

Ein Produktionssystem besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

- (1) Produktionsregeln:
Eine Produktionsregel besitzt eine Bedingungsseite (WENN-Teil) und eine Aktionsseite (DANN-Teil).
- (2) Arbeitsspeicher (deklaratives Gedächtnis):
Damit eine Regel ausgeführt werden kann, müssen die Voraussetzungen im Arbeitsspeicher vorliegen. Die auf der Aktionsseite einer Regel auszuführenden Operationen fügen entweder Daten zum Inhalt des Arbeitsspeichers hinzu oder löschen Daten aus dem Inhalt des Arbeitsspeichers oder sie bewirken ein externes Verhalten.
- (3) Interpreter:
Der Interpreter vergleicht die Regeln mit den im Arbeitsspeicher befindlichen Daten (Auswertung), selektiert zutreffende Regeln bzw. Regel-Instantiierungen (Auswahl) und führt diese aus (Ausführung).

Ein Produktionssystem operiert in **Auswertungs-Auswahl-Ausführungs-Zyklen**. In jedem Zyklus werden die Bedingungen einer jeden Produktionsregel mit dem gegebenen Zustand des Arbeitsspeichers verglichen. Regeln bzw. Regel-Instantiierungen, für die sich eine Übereinstimmung ergibt, werden zur Ausführung ausgewählt. Wenn eine Produktion ausgeführt wird, verändert ihre Aktion den Zustand des Arbeitsspeichers, worauf evtl. neue Produktionsregeln zutreffen. Diese Zyklen werden fortgesetzt bis keine Regeln mehr zutreffen oder ein Stoppkommando aufgerufen wird.

Auf der Grundlage dieses Formalismus werden kognitive Prozesse und ihr Zusammenwirken mit dem Ziel der Entwicklung kognitiver Architekturen modelliert.

Aufgrund der **Modularität der Produktionsregeln** eines Systems eignen sich Produktionssysteme besonders für die Modellierung von Wissenserwerbsprozessen. Eine Beschreibung des Wissenserwerbsprozesses erfolgt durch Einfügen neuer oder durch Löschen und Modifizieren bestehender Regeln. Da diese Regeln die Verkettung und den Ablauf von mentalen Operationen oder Prozeduren darstellen, wird der Wissenserwerb unter der Perspektive des Erwerbs und der Veränderung von kognitiven Fertigkeiten beschrieben. Die verschiedenen Formen der Veränderungen von Produktionsregeln, d. h. Lernmechanismen, werden im folgenden im Zusammenhang mit der Andersonschen ACT - Theorie dargestellt.

7.4.1 Die Theorie des Wissenserwerbs von Anderson

Die ACT - (Adaptive Control of Thought) Theorie, von Anderson in der Zeit von 1974 bis 1983 entwickelt, ist einer der am weitesten entwickelten Ansätze auf der Basis von Produktionssystemen. In ihrem Rahmen werden differenzierte Aussagen zum Prozeß des Wissenserwerbs gemacht. Sie stellt ein Modell der kognitiven Architektur dar, das einer Vielzahl grundlegender Phänomene menschlicher Informationsverarbeitung gerecht werden soll.

Theoretischer Ausgangspunkt der Andersonschen Theorie des Wissenserwerbs ist die **Unterscheidung zwischen einem prozeduralen und einem deklarativen Wissenszustand.**

Der Prozeß des Wissenserwerbs durchläuft die folgenden Phasen:

(1) Phase der Enkodierung von Wissen in deklarativer Form:

In dieser Phase des Wissenserwerbs wird eine Information deklarativ enkodiert und in Form eines semantischen Netzwerkes oder Schemas im Gedächtnis gehalten.

Obwohl dieser Theorie eine Netzwerkstruktur zugrundeliegt, wird dieser Ansatz üblicherweise nicht den propositional orientierten Ansätzen zum Wissenserwerb zugeordnet. Begründet wird dies durch die Akzentuierung prozeduraler Wissenskomponenten und die Verwendung von Produktionen zur Repräsentation prozeduralen Wissens, Tergan /17/.

Die Interpretation deklarativen Wissens in der ersten Phase des Wissenserwerbs bringt zwar beträchtliche Kosten hinsichtlich Zeit- und Platzbedarf im Arbeitsgedächtnis mit sich, hat aber, nach Anderson entscheidende Vorteile für das lernende System.

(2) Phase der interpretativen Anwendung deklarativen Wissens:

Auf das deklarative Wissen werden allgemeine interpretative Prozeduren angewendet, über die der Lernende bereits verfügt und die aus dem Produktionsgedächtnis abgerufen werden.

Der Einfluß deklarativen Wissens auf das Verhalten ist durch ein interpretatives System gefiltert, so daß neues Wissen, das sich als fehlerhaft erweist, als solches auch erkannt und ausgeschieden werden kann. Dadurch wird der sehr viel schwierigere Vorgang, eine fehlerhafte Prozedur zu korrigieren, vermieden.

(3) Phase der Wissenskompilierung:

Im weiteren Verlauf des Lernens werden spezielle Prozeduren gebildet, in denen das deklarative Wissen zusammen mit den darauf auszuführenden Operationen enthalten ist. Diese speziellen Prozeduren führen zu einer zügigen Wissensanwendung, so daß in Analogie zur Computerprogrammierung von einer Kompilierung gesprochen wird.

Im Rahmen der Wissenskompilierung werden zwei Prozesse unterschieden:

- **Kombination (Verkettung):**
Diese tritt auf, wenn Produktionen in einer festen Sequenz angewendet

werden. Daraus wird dann eine neue Produktion erzeugt, die den Effekt der Sequenz in einem einzigen Schritt verkörpert.

Es werden nur solche Produktionen zusammengeführt, die durch eine gemeinsame Zielsetzung miteinander verbunden sind. Die zusammengesetzte Produktion umfaßt in ihrem Bedingungsteil alle Bedingungen der einzelnen Produktionen, mit Ausnahme jener, die Ergebnis der Aktion früherer Produktionen in der Sequenz sind.

Die Größe einer zusammengesetzten Produktion hat Grenzen. Je größer eine solche Produktion ist, desto mehr Informationen setzt sie bezüglich des Schemas, als Ergebnis der ersten Phase, das aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen und im Arbeitsgedächtnis gehalten werden muß, voraus.

- **Prozeduralisierung:**
Dieser relativ langsam fortschreitende Prozeß erzeugt spezialisierte Versionen von Produktionen. Die deklarative Information, die normalerweise aus dem Langzeitgedächtnis hätte abgerufen werden müssen, wird direkt in Form spezialisierter Versionen von Produktionsregeln enkodiert. Damit wird der Abruf deklarativer Information aus dem Langzeitgedächtnis überflüssig.

Der Effekt des Prozeduralisierungsprozesses besteht darin, daß die Anwendung größerer Produktionen möglich wird, weil die prozeduralisierten Produktionen, wie oben erläutert, nicht durch die Erfordernis des Abrufs von Informationen aus dem Arbeitsgedächtnis begrenzt sind.

Während des Kompilierungsprozesses begrenzen die folgenden Faktoren die Größe von Produktionen:

- Man kann davon ausgehen, daß es zu umfangreiche Produktionen aufgrund der begrenzten Kapazität des Arbeitsspeichers und aufgrund der Tatsache, daß sie keine Übereinstimmung mit dem Arbeitsgedächtnis finden, nicht geben kann.
- Kombinationen größerer Produktionssequenzen sind weniger wahrscheinlich, da ihre exakte Anwendung bei anderen Problemen weniger häufig sein wird.

Ein wesentlicher Punkt zusammengesetzte Produktionen betreffend ist der, daß sie nicht die Komponenten bzw. die Produktionen, aus denen sie gebildet sind, ersetzen; ansonsten wären "Teilprobleme", im Sinne von Problemen, die durch Teilsequenzen zusammengesetzter Produktionen lösbar sind, entweder nicht mehr lösbar oder die entsprechenden zusammengesetzten Produktionen müssten wieder aufgespaltet werden, was auch Konsequenzen für die Reihenfolge der Behandlung verschiedener Probleme hätte.

(4) Phase der Wissensoptimierung:

Nachdem das für die Ausführung einer Prozedur erforderliche Wissen in kompilierter Form erworben wurde, kommt es zu einer fortlaufenden Verbesserung der Fertigkeit, wenn der Lernprozeß weitergeführt wird. Die Ausführung der Fertigkeit gelingt immer besser, komplexe Aufgaben werden immer schneller gelöst.

Die zu beobachtende Wissensoptimierung kann nicht durch Mechanismen der Wissenskompilierung erklärt werden. Nach Anderson führen in dieser Phase die folgenden Prozesse zur Optimierung von Produktionsregeln:

- Generalisation:

Durch diesen Prozeß werden Produktionsregeln auf weitere Fälle erweitert. Die grundlegende Funktion dieses Prozesses besteht darin, daß neue Produktionsregeln, die das erfassen, was einzelne Produktionen gemeinsam haben, unter Beibehaltung der ursprünglichen Produktionen, gebildet werden.

- Diskrimination:

Dieser Prozeß schränkt den Bereich der Anwendung übermäßig allgemeiner Prozeduren ein. Dadurch wird die Anwendung von Produktionen auf die geeigneten Umstände beschränkt. Voraussetzung dazu ist, daß Beispiele für korrekte, wie auch für nicht korrekte Anwendungen der Prozedur vorliegen und diese miteinander verglichen werden.

Dadurch kann der Lernende Merkmale unterscheiden, die sich für die fehlerhafte Anwendung der Produktion als kritisch erwiesen haben. Diese können in eine neue Produktionsregel eingehen, welche nun für eine spezifische Situation gilt.

- Verstärkung:

Dies ist ein weiterer Lernmechanismus, den Anderson in der Phase der Wissensoptimierung annimmt. Er besteht darin, Produktionsregeln entsprechend der Häufigkeit ihrer erfolgreichen oder nicht erfolgreichen Anwendung mit bestimmten Werten der Stärkung bzw. Schwächung zu versehen. Stärkere Produktionen kommen schneller zur Anwendung als schwächere. Ein Vorteil des Verstärkungsmechanismus besteht darin, daß mögliche Übergeneralisierungen oder nutzlose Diskriminationen im Zuge des Lernprozesses ausgeschieden werden können, d. h. er bildet eine Art Steuerungsfunktion.

7.4.2 Das Modell des Verstehens deklarativer Information von Kieras und Bovair, 1986

Der Aspekt der Annahme von Verstehensprozessen im Zuge des Aufbaus der deklarativen Repräsentation, den Anderson vernachlässigte, wurde von Kieras und Bovair in die Theorie eingebracht. Kieras und Bovair sehen ihr Modell als einen ersten Vorschlag zur Ergänzung der Andersonschen Theorie, der durch weitere Untersuchungen empirisch validiert werden muß.

Die wichtigste Folgerung aufgrund ihrer Untersuchungsergebnisse besteht darin, daß der anfängliche Erwerb einer Prozedur, d. h. die Enkodierung in deklarativer Form, auf komplexen Verstehensprozessen beruht, noch bevor die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Prozesse der Wissenskompilierung und Wissensoptimierung einsetzen.

Aus Untersuchungen, bei denen die zu lernende Prozedur schriftlich vorgegeben wurde, folgerten Kieras und Bovair, aus den erhobenen Lesezeiten, daß beim Lesen der Instruktion **Transferprozesse** stattfinden. Prozeduren, die einander ähnlich sind, werden sehr viel schneller aufgefaßt, als gänzlich neue Prozeduren. Kieras und Bovair vermuten hier einen Vorgang analog der Generalisation, welche von Anderson im Rahmen der Wissensoptimierung angenommen wird.

Die beobachteten Lesezeiten geben Anlaß zur Annahme, daß diese Generalisierung ebenso schnell abläuft, wie das Wiedererkennen einer Prozedur. Nach Kieras und Bovair entspricht dieser Vorgang den **Makroprozessen**, die beim Verstehen angenommen werden und die im Zuge des Lernprozesses komplexe propositionale Repräsentationen aufbauen, miteinander vergleichen und modifizieren.

Kieras und Bovair unterscheiden die folgenden drei Verstehensprozesse, die zum Aufbau einer deklarativen Repräsentation führen:

- (1) Prozeß der Prozedur-Übersetzung (Procedure Translation):
Es wird der semantische Inhalt einer Instruktion in die deklarative Repräsentation einer Produktionsregel überführt. Dabei werden die Aktionen explizit gespeichert, während die Bedingungen als implizite Information zum Kontext der Ausführung gespeichert werden.
- (2) Transferprozeß im Sinne einer Generalisierung:
Dieser Prozeß tritt auf, wenn die neue Regel mit einer alten Regel identisch oder sehr ähnlich ist, so daß letztere modifiziert werden kann. Die neue Regel muß dann weder im Arbeitsgedächtnis repräsentiert sein, noch in das Langzeitgedächtnis enkodiert werden. Die Modifikation ist allerdings sehr klein, Vermutungen belaufen sich auf eine oder zwei Propositionen.
- (3) Prozeß der Überwachung des Wissenserwerbs (Acquisition Monitoring):
Dieser Prozeß überwacht den Ausführungserfolg einer jeden Prozedur in der deklarativen Repräsentation und bestimmt, welcher Satz (bezogen auf die experimentelle Situation des Textverstehens) noch einmal gelesen werden muß und welcher übersprungen werden kann.

7.4.3 Bewertung des Ansatzes der Produktionssysteme zum Wissenserwerb

Folgende Punkte werden am Ansatz der Produktionssysteme zum Wissenserwerb kritisiert:

(1) Pro:

- Die Theorie konnte eine Reihe empirischer Befunde, wie etwa die Tatsache, daß geistige Fertigkeiten im automatisierten Stadium kaum mehr belastend sind oder den von Luchins gefundenen Einstellungseffekt (vgl. Abschnitt 6.1.1) erklären.
- Anderson behandelt ausführlich die interpretative Phase der Anwendung deklarativen Wissens sowie die Phasen der Wissenskompilierung und Wissensoptimierung. Er analysiert jedoch nur unzureichend den Aufbau der deklarativen Repräsentationen. Die in Abschnitt 7.4.2 beschriebenen Überlegungen von Kieras und Bovair bilden eine interessante Ergänzung, die jedoch einer Überprüfung bedarf.
- Interessante Anwendungen beziehen sich auf die Simulation von Wissenserwerbsprozessen im Bereich des Maschinellen Lernens, vgl. z. B. Michalski et al. /12/, die für die Wissenspsychologie neue Perspektiven und Anregungen darstellen könnten.

(2) Kontra:

- Ein grundlegendes Problem dieser Lerntheorie bezieht sich auf die Unterscheidung von deklarativem und prozeduralem Wissen sowie die Frage, inwieweit der postulierte Übergang einer deklarativen in eine prozedurale Repräsentation im Zuge des Lernprozesses tatsächlich psychologische Realität besitzt.
- Die Prozesse der Entwicklung und Verfeinerung prozeduralen Wissens sind bisher kaum empirisch fundiert und besitzen daher vor allem heuristischen Charakter.
- Die methodische Überprüfung der Andersonschen Theorie dürfte schon aus der in der Phase der Wissenskompilierung enthaltenen Annahme, daß das Wissen im Zuge des Lernprozesses zwar in immer geeignetere Formen überführt wird, auf der jeweiligen Stufe jedoch in der ursprünglichen Form erhalten bleibt, Schwierigkeiten bereiten.
- Da dieser Ansatz stark an Aufbau und Arbeitsweise von Computern orientiert ist, schränkt er die Behandlung des Wissens auf diesen Aspekt von kognitiven Fähigkeiten ein und es stellt sich die grundsätzliche Frage, inwieweit er eine Grundlage für die Untersuchung psychischer Fragen der Wissensrepräsentation sowie des Erwerbs und der Veränderung von Wissen darstellt.
- Der hier vorgestellte Ansatz besitzt für die Modellierung mentaler Prozesse eine große Attraktivität, jedoch muß die Gefahr einer unkritischen Übernahme der Computermetapher für die Erklärung kognitiver Strukturen und Prozesse gesehen werden.

7.4.4 Resümee

Die herausragenden Eigenschaften von Produktionssystemen im Wissenserwerb bestehen sicherlich in der Modularität der Produktionsregeln, die eine unproblematische Erweiterung der Wissensbasis ermöglicht und in der Tatsache, daß sich Produktionsregeln wie in Abschnitt 7.4.1 beschrieben leicht miteinander verknüpfen lassen.

Die Modularität der Produktionsregeln bringt jedoch auch den Nachteil mit sich, daß dadurch die Menge der Produktionsregeln und damit die Wissensbasis nur eine geringe bzw. gar keine ("horizontale", semantische) Struktur, wie z. B. Frames (vgl. Schmauch /16/) aufweist. Dieser Nachteil äußert sich, aufgrund der zumeist großen Anzahl an Produktionsregeln, besonders stark in der vom Interpretierer durchzuführenden Regelauswahl, die sich zumeist als komplexer Suchvorgang (vgl. z. B. Puppe/13/), der häufig zu einer kombinatorischen Explosion führt, darstellt.

Die ("vertikale") Struktur der Regelmenge ist flach, da nur die Regel-Auswahlstrategie einen Einfluß auf die Verarbeitungsreihenfolge der Regeln ausübt. In analoger Weise wie beim propositional orientierten Ansatz zum Wissenserwerb (vgl. Abschnitt 7.2) ist es zwar möglich durch zusätzliche Regeln Kontextwissen, im Sinne von Kontrollwissen zur Regelverarbeitung einzubringen, eine Unterscheidung nach unterschiedlichen Kontexten ist jedoch nicht realisierbar, da der eingebrachte Kontext universell wirkt und daher bei der Regelauswahl ständig berücksichtigt wird. Die nur unzureichende Einbindung von Kontextwissen kann auch zu Interpretationsproblemen bei der Aufnahme neuer Informationen führen.

Problematisch ist ebenfalls die Behandlung von vagem Wissen, d. h. Wissen, das mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist, mit Hilfe von Regeln. Die Problematik liegt hierbei weniger in der Darstellung des vagen Wissens, als in Ableitung von Schlußfolgerungen; zumindest wenn eine solche Ableitung über mehrere Schritte erfolgen muß.

Da dieser Theorie eine Netzwerkstruktur zugrundeliegt, ist sie von der Mächtigkeit äquivalent zu propositional orientierten Ansätzen und besitzt somit auch deren Vor- bzw. Nachteile (vgl. Keller et al. /9/).

7.5 Der Ansatz mentaler Modelle zum Wissenserwerb

Einen umfassenden kognitionspsychologisch orientierten Ansatz über mentale Modelle, im Sinne einer Theorie menschlichen Denkens, konzipierte Johnson-Laird. Die zentrale Annahme dieser Theorie besagt, daß **Menschen interne Modelle der äußeren und inneren Realität aufbauen.**

Ein mentales Modell stimmt in seiner Realitätsstruktur mit einem Realitätsausschnitt - je nach Funktion für das Individuum - mehr oder weniger überein. Durch Mentale Modelle

wird es dem Individuum möglich Inferenzen zu ziehen, Vorhersagen zu machen, Phänomene zu verstehen, Entscheidungen über Handlungen zu treffen und ihre Ausführung zu überwachen, sowie - als herausragendes Merkmal - Ereignisse stellvertretend zu erfahren.

Mittels mentaler Modelle ist es möglich, das **Verhalten dynamischer Systeme** sowie Handlungsvollzüge im Umgang mit diesen Systemen intern zu **simulieren**. Schlußfolgerungen spielen dabei eine zentrale Rolle.

Kennzeichnend für mentale Modelle ist eine stark erfahrungsmäßige Komponente. Dies zeigt sich darin, daß mentale Modelle in der Regel visuelle Vorstellungsbilder des jeweiligen Gegenstandsbereiches implizieren. Derartige Vorstellungsbilder variieren von "naiven" Repräsentationen beim Novizen, bis hin zu Repräsentationen struktureller und funktionaler Aspekte beim Experten, d. h. sie werden mit zunehmendem Vorwissen abstrakter.

Johnson-Laird sieht mentale Modelle als Form einer analogen Repräsentation. Die Struktur eines mentalen Modells ist analog der Struktur des korrespondierenden Sachverhalts - so, wie dieser wahrgenommen oder vorgestellt wird.

Die analoge Struktur eines mentalen Modells kann je nach Komplexität der Modelle beträchtlich variieren. Für Johnson-Laird ist eine Repräsentation durch mentale Modelle sowohl in ihrer Struktur, als auch in ihrer Funktion grundsätzlich verschieden von einer propositionalen Repräsentation, die aus einer Menge von diskreten Informationseinheiten besteht.

Will man erfolgsversprechende Untersuchungen zum Aufbau und Erwerb mentaler Modelle durchführen, so müssen folgende Schritte einbezogen werden:

- (1) Es muß eine präzise Vorstellung davon entwickelt werden, was von einer Person beim Umgang mit einem dynamischen System zu lernen ist. Hiermit korrespondiert die Notwendigkeit einer detaillierten Analyse des dem System zugrundeliegenden Wissensinhaltes.
- (2) Für das angestrebte Ziel müssen die relevanten Begriffe, Konzepte und Techniken aufgearbeitet werden, wie sie innerhalb der kognitiven Psychologie zur Modellierung psychischer Prozesse und Strukturen entwickelt wurden.
- (3) Die unter (1) und (2) durchgeführten Analysen und Überlegungen müssen in ein Computermodell umgesetzt werden. Dies erfordert eine computergerechte Formalisierung der Annahmen, die das mentale Modell definieren, wie kognitive Strukturen und die auf ihnen operierenden Prozesse.
- (4) Im Anschluß daran soll eine empirische Überprüfung des Computermodells auf der Grundlage detaillierter Analysen geeigneter Daten zum Informationsverarbeitungsprozeß von Individuen erfolgen.

Diese Untersuchungsschritte sind notwendig, um spezifische mentale Modelle zu entwickeln und empirisch zu überprüfen, um auf dieser Grundlage den Ansatz mentaler Modelle weiterzuentwickeln.

Im folgenden werden zwei Ansätze, die sich mit dem Wissenserwerb als Aufbau und Verfeinerung mentaler Modelle im physikalischen Gegenstandsbereich befassen, dargestellt.

Beide wurden schwerpunktmäßig im Bereich der KI-Forschung unabhängig vom Ansatz Johnson-Lairds entwickelt.

7.5.1 Der Ansatz von de Kleer und Brown, 1983

Die Forschungsarbeiten von de Kleer und Brown zum Aufbau und Erwerb mentaler Modelle orientieren sich am Ansatz der **qualitativen Physik**. In diesem Ansatz wird die Funktionsweise physikalischer Systeme und Ereignisse in qualitativer Form beschrieben und erklärt. Grundlegend ist dabei die Annahme, daß physikalisches Wissen in Form qualitativer Vorstellungen mental repräsentiert ist.

Menschen bedienen sich qualitativer Größen, wenn sie Schlußfolgerungen über die Funktionsweise eines Systems ziehen. Die qualitative Physik bietet gegenüber der **klassischen Physik** einen alternativen Weg zur Beschreibung physikalischer Phänomene. Sie will physikalische Sachverhalte auf der Basis kausalen Denkens beschreiben. Ein wichtiges Ziel ist die formale Darstellung qualitativer Denkprozesse für die Entwicklung computerunterstützter Expertensysteme in der Physik.

Ziel des Ansatzes von de Kleer und Brown ist die Entwicklung eines theoretischen Rahmens, der den Aufbau mentaler Modelle von technischen Systemen erklären soll. Der Aufbau eines mentalen Modells erfolgt auf der Grundlage komplexer Schlußfolgerungsprozesse, in deren Verlauf aufgrund mentaler Repräsentation der strukturellen Eigenschaften des Systems auf der Grundlage einzelner Komponenten, dessen funktionale Eigenschaften erschlossen werden. Dieser Vorgang wird als **qualitative Simulation** bezeichnet und ist ein zentraler Vorgang des Wissenserwerbs.

Grundlage für die mentale Simulation zur Erlangung von Wissen über die Funktionsweise einer physikalischen Vorrichtung ist die **topologische Struktur**. Sie umfaßt die einzelnen relevanten Komponenten der physikalischen Vorrichtung; für jede einzelne Komponente wird ein Komponentenmodell erstellt, das die qualitativen Zustände, in denen sich die betreffende Systemkomponente jeweils befindet, beschreibt. Ein Zustand wird durch einen **Definitionsteil** und einen **Transitionsteil** beschrieben.

Die Verhaltensmöglichkeiten der einzelnen Systemkomponenten werden nicht als stetige Größen abgebildet, sondern in qualitativer Form beschrieben. Sie bilden die Grundlage für den Prozeß der qualitativen Simulation, die auch als **Envisioning** bezeichnet wird.

Dieser Prozeß entspricht einem komplexen Schlußfolgerungsprozeß, in dessen Verlauf auf der Grundlage der topologischen Struktur und der Verhaltensmöglichkeiten der Komponentenmodelle die funktionalen Eigenschaften des Gesamtsystems erschlossen werden.

Ergebnis einer qualitativen Simulation ist die mentale Repräsentation der Funktionsweise eines Gesamtsystems auf der Grundlage der Beschreibung der Zustände und Zustandsänderungen seiner Systemkomponenten in einem kausalen mentalen Modell.

Der Wissenserwerb; vier verschiedene theoretische Ansätze

Im allgemeinen stellen kausale Modelle von Experten sehr komplexe Gefüge dar. So kann ein Ereignis viele andere verursachen und es ist sehr schwierig zu identifizieren, welche der Verhaltensmöglichkeiten tatsächlich eintreten werden.

Nach de Kleer und Brown soll ein Kausalmodell den folgenden Kriterien genügen:

- Es soll **konsistent**, d. h. frei von internen Widersprüchen, sein. Zwei Komponentenmodelle dürfen nicht unterschiedliche Werte für das gleiche Attribut bei einem bestimmten Komponentenzustand aufweisen.
- Es soll zum Verhalten der physikalischen Vorrichtung **korrespondent** sein. Damit ein Kausalmodell dieses Kriterium erfüllt, müssen das durch die qualitative Simulation abgeleitete Verhalten und das durch Beobachtung des aktuellen Systems festgestellte Verhalten gleich sein.
- Es soll **robust** sein, d. h. es soll auch in anderen Kontexten bei ähnlichen Systemen mit Erfolg zur Erklärung und Vorhersage verwendet werden können.

Neben dem bisher behandelten Wissenserwerb auf der Grundlage der qualitativen Simulation nennen de Kleer und Brown die folgenden Teilprozesse:

- Im Fortgang des Lernens wird versucht, die Verbindung zwischen Struktur und Funktion robuster zu machen.

Das mentale Modell des Lernenden umfaßt stets viele implizite Annahmen, die richtig oder falsch sein können. Im voranschreitenden Lernprozeß identifiziert der Lernende diese Annahmen und macht sie explizit.

Der Wissenserwerb schreitet voran, indem der Lernende Verletzungen der Konsistenz, der Korrespondenz und der Robustheit entdeckt.

- Ein fortgeschrittenes Stadium des Lernens ist dann erreicht, wenn die explizit gemachten Annahmen mentaler Modelle bei Bedarf abgerufen werden können. Die Ergebnisse des reflektierten Problemlösens werden gespeichert, indem der Lernende die Aspekte des Komponentenmodells festhält, die er aktuell in dem korrekten Kausalmodell über die physikalische Vorrichtung benutzte.

Mit diesem Wissen kann der Lernende neue **idiosynkratische** (d. h. gegenüber Reizen aus der Umwelt überempfindliche) **Komponentenmodelle** herstellen und Ambiguitäten (Mehrdeutigkeiten) früherer Modelle eliminieren.

Im allgemeinen beruht die mentale Repräsentation einer physikalischen Vorrichtung auf einer kleinen Anzahl von Regeln einer Komponente; der Lernende kann diese kleine Anzahl identifizieren (wenn er den richtigen Kausalmechanismus identifiziert hat) und sie in ein einfaches aber idiosynkratisches Komponentenmodell umformen.

7.5.2 Der Ansatz von Forbus und Genter, 1986

Das von Forbus und Genter 1985 vorgelegte **Stufenmodell des Erwerbs physikalischen Wissens** orientiert sich an der **qualitativen Prozeßtheorie** und der **Struktur-Abbildungstheorie**.

Dieser Ansatz wird dem **Maschinellen Lernen** (vgl. z. B. Michalski et al. /12/ oder Weinberger et al. /18/) zugeordnet aber aufgrund der Modellorientiertheit hier behandelt.

Das (in weiter Ferne liegende) Ziel Maschinellen Lernens besteht darin, Computerprogramme zu entwickeln, die ebensogut lernen wie Menschen. Dazu ist es notwendig zu verstehen, wie menschlicher Wissenserwerb abläuft, was differenzierte Überlegungen zum Wissenserwerb voraussetzt.

Im folgenden werden zunächst die beiden oben erwähnten theoretischen Ansätze vorgestellt:

- (1) Die qualitative Prozeßtheorie:
Sie untersucht qualitatives Denken in physikalischen Gegenstandsbereichen und versucht Vorstellungen über physikalische Prozesse zu formalisieren.

Eine zentrale Annahme besagt, daß beim Denken über physikalische Sachverhalte der Prozeßaspekt im Vordergrund steht. Prozeßvorstellungen ermöglichen es, grundlegende Zusammenhänge eines physikalischen Gegenstandsbereiches zu verstehen.

Die qualitative Prozeßtheorie richtet sich darauf, diese Prozesse zu beschreiben und die entsprechende Wissensrepräsentation des Lernenden zu untersuchen.

Das Ziel der qualitativen Prozeßtheorie ist die Erfassung von Denkvorgängen in formalisierter Weise, um entsprechende Computerimplementationen von Expertensystemen vornehmen zu können.

- (2) Die Struktur-Abbildungstheorie:
Sie betrachtet den Vergleich als zentralen Vorgang des Wissenserwerbs. Die Theorie beschreibt Regeln, wie Strukturen eines Basisbereiches in einen Zielbereich überführt werden können.

Die grundlegende Annahme besteht darin, daß die Grundstruktur eines Gegenstandsbereiches (**Basisbereich**) auf einen anderen Gegenstandsbereich (**Zielbereich**) übertragen werden kann.

Hierfür unterscheidet man vier Arten des Vergleichs. In aufsteigender Reihenfolge, entsprechend des Schwierigkeitsgrades für den unerfahrenen Lernenden, sind dies:

- **Tatsächliche Ähnlichkeit:**
Dieses (Vergleichs-) Modell geht davon aus, daß die Ähnlichkeit zwischen Basis- und Zielbereich mit der Größe der Schnittmenge der vom Basis- in den Zielbereich übernommenen Objekteigenschaften und Beziehungen steigt.

- **Analogie:**
Darunter versteht man den Vergleich, bei dem die Relationen zwischen Objekteigenschaften des Basisbereiches in den Zielbereich übernommen werden. Von den Eigenschaften der Objekte selbst aber weitgehend abgesehen wird.
- **Bloßer Anschein:**
Hierunter versteht man den Vergleich, bei dem die Eigenschaften von Objekten des Basis- und Zielbereiches als passend erkannt werden, von der Beziehungsstruktur aber abgesehen wird - es handelt sich folglich um das Gegenteil der Analogie.
- **Abstrakte Abbildung oder Abstraktion:**
Sie beruht auf einem Vergleich, bei dem als Basisbereich eine abstrakte Beziehungsstruktur grundlegend ist.

Wie im Fall der Analogie werden auch hier Relationen übertragen. Die abstrakte Abbildung unterscheidet sich von der Analogie allerdings dadurch, daß der Basisbereich kaum noch Objekteigenschaften enthält. Die Anwendung einer Regel auf eine Situation ist ein Beispiel für eine abstrakte Abbildung.

Die Verwendung des Vergleichs beim Wissenserwerb hängt von **Zugänglichkeit**, d. h. von der Wahrscheinlichkeit, daß eine Übereinstimmung überhaupt bemerkt wird, ab. Notwendig dafür ist eine Vertrautheit mit dem Basisbereich und der Grad der Übereinstimmung zwischen Basis- und Zielbereich.

Eine weitere Voraussetzung für die Verwendung des Vergleichs ist der Nutzen, der sich aus der Übereinstimmung ziehen läßt. Des weiteren spielt die Analyzierbarkeit, d. h. die Leichtigkeit oder Schwierigkeit, mit der eine Übereinstimmung erkannt und ausgedrückt werden kann, eine Rolle.

Untersuchungen bei Kindern zeigen eine Entwicklung von reichhaltigen, konkreten Anschauungen zu abstrakten, mehr auf Regeln gestützten Denkinhalten.

Die Befunde aus der Experten-Novizenforschung zeigen, daß Experten bei Vergleichen tieferegehende und abstraktere Kriterien anlegen während sich Anfänger mehr auf oberflächliche Merkmale beziehen.

Vor dem Hintergrund der beiden oben dargestellten Theorien beschreiben Forbus und Gentner den Erwerb physikalischer Sachverhalte unter entwicklungspsychologischer Perspektive.

Ihr Stufenmodell des Wissenserwerbs umfaßt die vier aufeinander aufbauenden, vom Konkreten zum Abstrakten fortschreitenden Modelle:

- (1) Prototypische Erfahrung (Protohistories):
Prototypische Erfahrungen werden als einfache mentale Modelle einer physikalischen Domäne angesehen. Die Bildung prototypischer Erfahrungen beinhaltet, daß Erfahrungen entsprechend der wahrgenommenen tatsächlichen Ähnlich-

keit in **Klassen** eingeteilt werden, über die jeweils im Sinne einer Zusammenfassung abstrahiert wird.

Prototypische Erfahrungen werden unbewußt gebildet, verhalten sich wie zusammengesetzte Konzepte, sind sensitiv für Ereignisse auf dem Gebiet der Wahrnehmung und zeigen die **Identifikationskraft** sowie andere psychologische Eigenschaften von Prototypen.

(2) Ursachen-Annahmen (Causal Corpus):

Auf der Grundlage von prototypischen Erfahrungen werden Ursachen-Annahmen gebildet. Ursache wird hier als Näherungskonzept betrachtet und drückt die Ansicht aus, daß irgendein Mechanismus existiert, der durch die Theorie erklärt wird.

Die meisten Ursache-Annahmen sind binäre Beziehungen zwischen zwei Variablen. Sie sind sehr einfach, die angenommenen Kausalbeziehungen müssen weder explizit noch in sich schlüssig sein. Die Bildung von Ursache-Annahmen dient drei Zwecken:

- Reduktion des vorhandenen Datenmaterials.
- Erzeugung heuristischer Kriterien, mit denen Schlüsse gezogen werden können.
- Man kann eine Sammlung von Ursachen-Annahmen dazu verwenden, um nach umfassenden Theorien eines Teilgebietes zu suchen.

Ursachen-Annahmen deuten Verbindungen zwischen vielen Aspekten eines Teilgebietes an, die eine umfassende Theorie dann entweder bestätigen oder ausschließen.

(3) Naive physikalische Theorie:

Ursachen-Annahmen werden durch Theorien über Mechanismen von Veränderungen ersetzt. Die Auffassung über einen Sachverhalt wird durch die Einbeziehung von Prozessen zur Beschreibung beobachteter Veränderungen erweitert. Sie umfaßt auch Eigenschaften und Zustände, die nicht direkt sichtbar sind sowie neue Beziehungen, die zu ihrer Beschreibung nötig sind.

Ein wichtiger Vorzug dieser Modelle ist es, daß sie erlauben **per exclusionem zu argumentieren**. Anders als in vorhergehenden Stufen enthalten selbst falsche Vorhersagen noch Informationen über das Problem.

Die Hauptschwierigkeit beim Erwerb naiver physikalischer Theorien besteht darin, eine Sprache zur Beschreibung der Prozesse zu finden, die Erfahrungen widerspruchsfrei abbildet. Der Lernende muß zum einen unwichtige Aussagen aus den beiden vorangegangenen Bereichen ausschließen und zum anderen kann es notwendig sein, daß er die Existenz nicht direkt beobachtbarer Gegenstände, Zustände oder Eigenschaften annimmt.

(4) Expertenwissen:

Die Beschränkungen der bisher behandelten drei Modelle liegen in der Natur der qualitativen Repräsentation und im Fehlen gegenstandsunabhängiger Generalisierungen. Diese Beschränkungen sollen in dieser Stufe überwunden werden.

Beim Übergang von naivem physikalischem Wissen zu Expertenwissen werden die bestehenden qualitativen Repräsentationen in quantitative Aussagen überführt, wobei als Sprache die Mathematik dient.

Durch die Übertragung einer physikalischen Theorie in ein mathematisches Modell gewinnt der Lernende die Fähigkeit, präzise Vorhersagen zu treffen und wirksame Verallgemeinerungen leichter zu erkennen.

Zum Expertenwissen gehören auch allgemeine Regeln, die nicht nur Wissen umfassen, was möglich ist, sondern auch Wissen darüber, was wahrscheinlich ist. Der Lernende muß herausfinden, welche durch qualitative Betrachtungen gefundenen Ergebnisse wahrscheinlich oder unwahrscheinlich sind und welche möglichen Wechselwirkungen ignoriert werden können.

Weiterhin wird angenommen, daß einige generelle Regeln auf der Grundlage prototypischer Erfahrungen gebildet werden.

7.5.3 Bewertung des Ansatzes mentaler Modelle zum Wissenserwerb

Folgende Punkte werden am Ansatz des Wissenserwerbs mit Hilfe mentaler Modelle kritisiert:

(1) Pro:

- Der inhaltliche Schwerpunkt der hier dargestellten mentalen Modelle liegt im physikalischen Gegenstandsbereich, da physikalische Systeme im Vergleich zu vielen sozialwissenschaftlichen Domänen einen überschaubaren und klar strukturierten Problemraum umfassen und somit das Verstehen und der Erwerb von Wissen leichter modelliert werden kann.
- De Kleer und Brown haben den hier beschriebenen Ansatz jedoch noch erweitert, indem sie für die Simulation generischen Verhaltens physikalischer Geräte das Konzept der **qualitativen Differentialgleichungen** einführten.

(2) Kontra:

- Die Überprüfung der getroffenen Modellannahmen durch Computersimulation befindet sich noch in den Anfängen.

- Der Erwerb mentaler Modelle wird im Ansatz von de Kleer und Brown sehr stark unter funktionalen Aspekten des jeweiligen physikalisch technischen Systems betrachtet.

Dazu sind differenzierte strukturelle und funktionale Analysen des Gegenstandsbereiches notwendig.

7.5.4 Resümee

Die mit dem Ansatz mentaler Modelle verfolgte Grundidee, daß sie es ermöglichen sollen das Verhalten dynamischer (physikalischer) Systeme zu simulieren, kann man auch als ein fortgeschrittenes Stadium der Repräsentation der strukturellen und vorallem prozessualen Aspekte beim Wissenserwerb und der Wissensverarbeitung auffassen.

Das fortgeschrittene Stadium bezieht sich hierbei auf die Komplexität und Abstraktheit des durch den Ansatz mentaler Modelle erworbenen Wissens, das den Aufbau einer Grundstruktur z. B. durch den schematheoretischen Ansatz oder den Ansatz der Produktionssysteme nahelegt.

Für eine Grundstruktur nach dem schematheoretischen Ansatz spricht z. B. die Art und Weise, nach der der Wissenserwerb, wie ihn De Kleer und Brown beschreiben voranschreitet bzw. ausgelöst wird. Sie vertreten den Standpunkt, daß der Wissenserwerb voranschreitet, wenn der Lernende eine Verletzung der Konsistenz, Korrespondenz oder Robustheit entdeckt, indem er versucht diese zu beseitigen. Dies ist jedoch letztlich nichts anderes als ein kognitiver Konflikt (vgl. Abschnitt 1.2.3.3), den es zu lösen gilt, um den angestrebten Gleichgewichtszustand zu erreichen.

Allerdings darf dabei nicht übersehen werden, daß sich der Ansatz mentaler Modelle zum Wissenserwerb nur dann eignet, wenn es sich um die Erschließung kausaler, explizierbarer Beziehungen handelt. Der sehr häufige und daher wichtige Fall analoger Beziehungen wird ebenso wenig erfaßt, wie widersprüchliche Beobachtungen.

7.6 Abschließende Bemerkungen zu den behandelten theoretischen Ansätzen zum Wissenserwerb

Jeder der vorgestellten Ansätze definiert sich seinen Gegenstandsbereich unter seiner spezifischen Perspektive:

- Der **Merkmalsansatz** läßt im wesentlichen nur Abbildungen von Wortbedeutungen auf der Definitionsebene zu, der **Prädikatenkalkül-Ansatz** ist auf die Abbildung von Wissen fokussiert, das sich in einem einzelnen Satz ausdrücken läßt und der **traditionelle Netzwerkansatz** zielt darauf ab, Wissen über Wort- und Satzbedeutungen mit einem auf Konzeptabhängigkeiten gründenden Formalismus abzubilden.

Der **propositional orientierte Ansatz** hat sich als Wissensrepräsentationsform dort bewährt, wo es um Repräsentation verbal codierter Gedächtnisinhalte geht und Aussagen über Verstehensprozesse getroffen werden sollen. Der Schwerpunkt liegt in der strukturierten graphischen Darstellung des Wissens; Wissenserwerbsprozesse werden vernachlässigt.

- Der **schematheoretische Ansatz** bezieht sich in erster Linie auf den strukturellen Aspekt beim Erwerb von Wissen.
- Der **Ansatz der Produktionssysteme** stellt den prozeduralen Aspekt in den Vordergrund und betrachtet den Wissenserwerb unter dem Aspekt des Erwerbs kognitiver Fertigkeiten.
- Der **Ansatz der mentalen Modelle** berücksichtigt sowohl strukturelle, als auch prozessuale Aspekte und eröffnet die Möglichkeit einer integrierten Sichtweise, wobei der Wissenserwerb als Aufbau und Verfeinerung mentaler Modelle aufgefaßt wird.

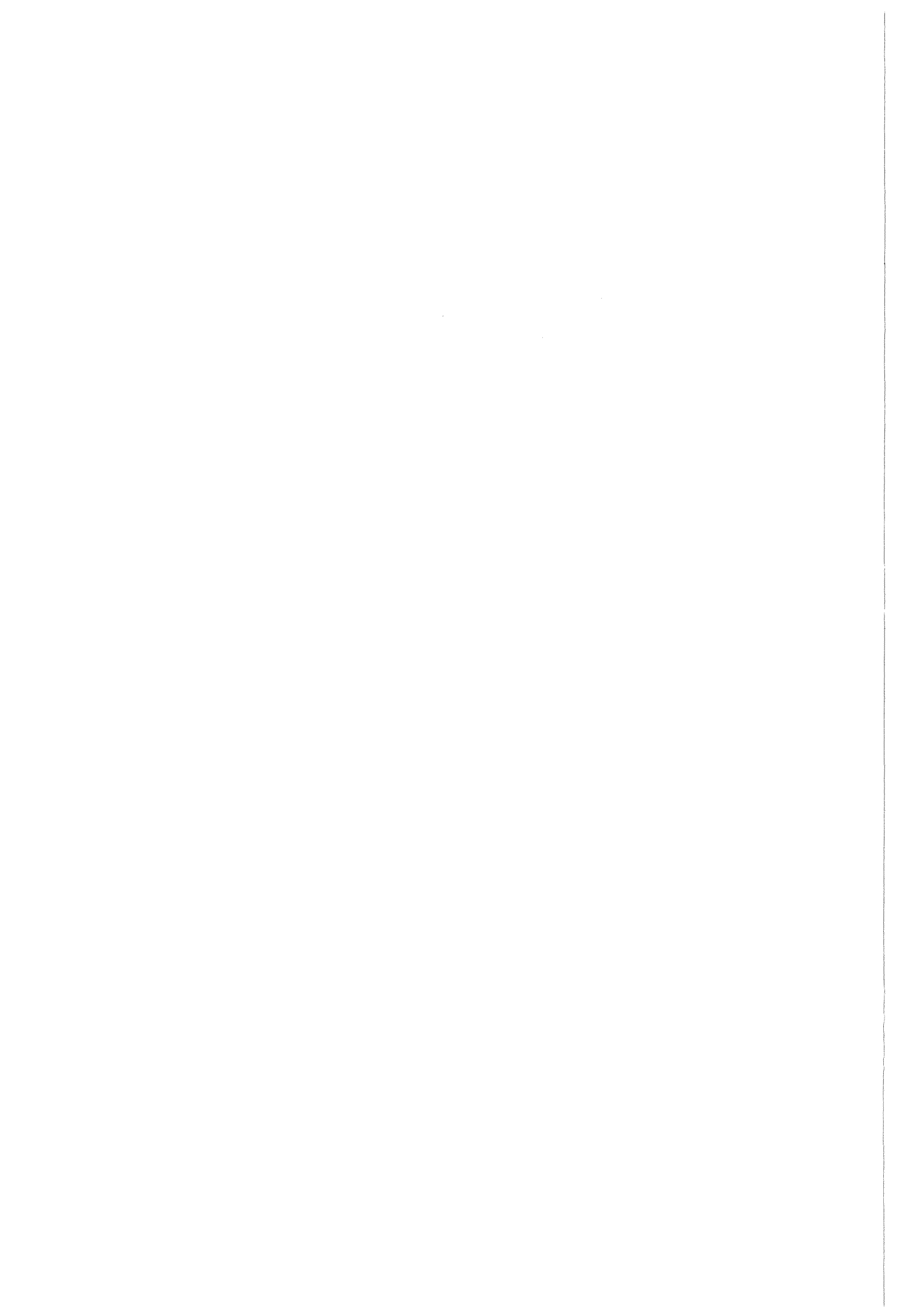
Insgesamt gesehen richten sich die letzten drei Ansätze unter der Perspektive der Wissenspsychologie auf Phänomene des Lernens, wie Verallgemeinerung und Transfer oder Spezialisierung und Festigung von Wissen.

- In der **Schematheorie** sind Umstrukturierung und Feinabstimmung die zentralen theoretischen Konstrukte, mit denen Generalisierung und Spezialisierung von Wissen beschrieben wird. Der Schwerpunkt bisheriger Untersuchungen liegt eher auf der Wissensrepräsentation, als auf der Verarbeitung von Wissen; hierzu wurden jedoch durch das Konzept kognitiver Schemata weiterführende Ansatzpunkte vorgestellt.
- Im **Ansatz der Produktionensysteme** stehen hierfür die Wissenskompilierung und die Verfeinerung durch Generalisation, Diskrimination und Verstärkung von Produktionsregeln.
- Im **Ansatz der mentalen Modelle** ist der Erwerb und die Verfeinerung im Sinne des "Robuster-machens" interner Modelle und ihre Ausdifferenzierung über verschiedene Entwicklungsstadien hervorzuheben.

Für eine mögliche Integration dieser Ansätze bietet sich am ehesten der Ansatz mentaler Modelle an.

Die Ansätze sind vorwiegend kognitivistisch orientiert, wobei eine zunehmend stärkere Orientierung an der KI-Forschung und Computersimulation festzustellen ist. Der Gewinn für die Lernpsychologie liegt in einer präziseren Beschreibungsmöglichkeit, die zur Erhöhung der internen Konsistenz von Theorien beitragen kann.

Die Gefahr liegt allerdings in der unreflektierten Übernahme von Methoden der KI-Forschung auf den psychologischen Gegenstandsbereich unter Vernachlässigung der empirischen Überprüfung von Modellannahmen.



Literatur

- /1/ R. P. Abelson,
"Skript processing in attitude formation and decision making,"
Aus: J. S. Carroll & J. W. Payne (Eds.),
"Cognitive and social Behavior,"
Erlbaum, Hillsdale N. J., S. 33-46, 1976.
- /2/ Hans J. Arnold,
"Zur mathematischen Beschreibung zielgerichteter Handlungen des Menschen an
technischen Systemen,"
Schriftenreihe des Fachbereiches Mathematik, Universität Duisburg, SM-DU-173,
1990.
- /3/ Jürgen Bortz,
"Statistik - Für Sozialwissenschaftler,"
Springer Verlag, 3. Auflage, 1989.
- /4/ Dietrich Dörner,
"Problemlösen als Informationsverarbeitung,"
Kohlhammer Standards Psychologie, dritte Auflage, 1987.
- /5/ Konrad Joerger,
"Einführung in die Lernpsychologie,"
Herderbücherei, Pädagogik, 13. Auflage, 1989.
- /6/ P. N. Johnson-Laird, D. J. Herrmann, R. Chaffin,
"Only connections: A critique of semantic networks,"
Psychological Bulletin Vol. 96, No. 2, S. 292-315, 1984.
- /7/ Robert Kail, James W. Pellegrino,
"Menschliche Intelligenz,"
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH & Co., 1985.
- /8/ Hubert B. Keller,
Bisher unveröffentlichte Arbeiten,
Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1989-1991.
- /9/ Hubert B. Keller, Eugen Kugele, Thomas Weinberger,
"Wissensbasierte Systeme - Darstellungs- und Verarbeitungsmodelle,"
KfK - Bericht in Vorbereitung.
- /10/ Heinz Mandl, Helmut Felix, Aemilian und Friedrich Hron,
"Theoretische Ansätze zum Wissenserwerb,"
Universität Tübingen, FB 41.

Literatur

- /11/ Marilyn McCord Nelson, W. T. Illingworth,
"A practical Guide to Neural Nets,"
Addison-Wesley Publishing Company, Inc. N.Y., 1990.
- /12/ Ryszard S. Michalski, Jaime G. Carbonell, Tom M. Mitchell (Eds.),
"Machine Learning,"
Springer Verlag 1983.
- /13/ Frank Puppe,
"Einführung in Expertensysteme"
Studienreihe Informatik, Springer Verlag, 1988.
- /14/ Irvin Rock, Stephen Palmer,
"Das Vermächtnis der Gestaltpsychologie,"
Spektrum der Wissenschaft, S. 68 - 75, Februar, 1991.
- /15/ David E. Rumelhart, Donald A. Norman,
"Accreation, Tuning and Restructuring: Three Modes of Learning,"
Semantic Factors in Cognition, Cotton & Klatzky (Eds.), Hillsdale N.J., S. 37-53,
1978.
- /16/ Cosima Schmauch,
"Wissensrepräsentation, Grundkurs,"
Aus: Thomas Christaller (Ed.),
5. KIFS 87, Interne Fachberichte 202,
Springer Verlag, 1987.
- /17/ Sigmar-Olaf Tergan,
"Diagnose von Wissensstrukturen,"
DIFF, Forschungsbericht 30, 1984.
- /18/ Thomas Weinberger,
"Maschinelles Lernen - "klassische", konnektionistische und kognitive Konzepte,"
KfK - Bericht in Vorbereitung.

Stichwortverzeichnis

A

Abelson, 54, 56
 Abstraktion
 Abstraktionshierarchie, 18, 36
 Möglichkeiten, 28
 ACT-Theorie, 63
 Adaption, 13, 53
 Akkommodation, 9, 11, 16, 18, 23, 53, 56
 Alles-oder-Nichts-Prinzip, 6, 44
 Analogie, 55
 Analogieschluß, 27
 Teilschritte, 27
 Analyse, 36
 Anderson, 64, 67, 68
 Anfangszustand, 13
 Ansatz
 der mentalen Modelle, 78
 der Produktionssysteme, 78
 schematheoretischer, 78
 Äquilibration, 9, 13
 Argumente, 42
 Arnold, 61
 Assimilation, 9, 11, 16, 18, 23, 53, 54
 Assoziationismus
 Assoziationsprozeß, 31
 Elementarprozesse, 31
 Grundidee, 31
 Konstellationstheorie, 31
 Aufgabe, 13
 Aufmerksamkeitsbereich, 62

B

Barriere, 13
 Basisbereich, 73
 Begriffsinhalte, 18
 Berlyne, 11

C

Computersimulation, 76, 79

D

datengeleitet (bottom up), 53
 de Kleer & Brown, 71, 76
 Differenzierung, 47, 55

Diskriminierung, 59
 Doppelhierarchie, 18
 Dörner, 1, 13, 42

E

Effektgesetz, 5
 Elementarismus, 7
 Endzustand, 13
 Envisioning, 71. *Siehe auch* qualitative
 Simulation
 epistemische Neugier, 11
 epistemische Struktur, 15, 19, 22, 35, 37
 Afferenzteil, 35
 Efferenzteil, 35
 Veränderungsprozesse, 36
 Experten-Novizen-Paradigma, 57

F

Fachblindheit, 17
 faktorenanalytischer Ansatz, 32
 Fillmore, 46
 Forbus & Genter, 73, 74
 Frage-Antwort-Technik, 48, 49
 Frequenz-Gesetz, 5

G

Gedächtnisstruktur, 17
 General-Problem-Solver (GPS), 26
 Methoden, 26
 Generalisierung, 47, 55, 59
 Gestaltpsychologie, 7
 Gestalt, 7
 Haupthehrtsatz, 7
 physische Gestalten, 8
 Gleichgewicht, 8
 Gordonsche Synektik, 28
 Graesser, 48
 Guthrie, 5

H

Heurismus, 15, 20, 21, 27
 determinierende Tendenzen, 25
 Makroheurismus, 21

Stichwortverzeichnis

heuristische Struktur, 15, 19, 21, 22, 35
 Bestandteile, 22
 Trainingsformen, 39
Hierarchie, 53
hierarchische Struktur, 15, 43
Hintergrundwissen, 49
Homöostase, 9, 13
Hypothese, 20, 37
 Umbau, 39

I

idiosynkratisch, 72
inferentielle Prozesse, 53
Intelligenzdiagnostik, 32
Intelligenzquotient, 32
Interpolationsproblem, 14
Interpolationsproblem, 23, 24, 25, 61
Isomorphie, 8

J

Joerger, 1, 36
Johnson-Laird, 42, 46, 69, 70, 71

K

Kanten, 43, 46, 48
Kaskadenorganisation, 21
Kasusgrammatik, 46
Kategoriensystem, 9
Kausalmodell, 72
 konsistent, 72
 korrespondent, 72
 robust, 72
Kieras und Bovair, 67, 68
Klassen, 36, 75
Klassifikationssystem
 Erwerb, 37
klassische Physik, 71
klassisches Konditionieren, 5
Knoten, 43, 46
 Knoten-Kategorien, 48
 Knotenarten, 43
Koffka, 7
Kognition, 6
 Elementaroperationen, 31
 kognitive Ökonomie, 43
 Kognitive Operationen, 32
 kognitive Prozesse, 32, 57
 elementare, 32, 33
 kognitive Strategie, 21
 kognitive Struktur, 8, 9, 59
 kognitiver Konflikt, 11, 57

Köhler, 7
Komplexion, 18, 36
Komplexionshierarchie, 36
 Bildung, 37
Komponentenmodell, 72
Kontext, 52, 53, 69
Kontiguitätsgesetz, 6
konzept-sensitiv, 8
Künstliche Intelligenz, 63
Kurzzeitgedächtnis, 17, 19, 20

L

Langzeitgedächtnis, 17, 20, 42, 65
latentes Lernen, 7
Lernen, 78
 durch Analogie, 56
 Feinabstimmung, 55
 Lernprozeß
 Hauptteil, 41
 Lernübertragung, 27
 Umstrukturierung, 54
 Mustervergleich, 55
 Schemainduktion, 55
 Unterscheidungslernen, 28
 Wissenszuwachs, 54
Lernprozeß, 12
Lernpsychologie, 8
Lindsay, Norman & Rumelhart, 36
LNR-Netzwerk
 Argumenttypen, 46
Lompscher, 33
Luchins Experiment, 37, 68
 Schemalösungen, 37

M

Makroprozesse, 67
Mandel, 1
Maschinelles Lernen, 8, 62, 68, 73
 conceptual Clustering, 8
mentales Lexikon, 43
Merkmalsansatz, 43, 78
 Schwäche, 44
Modell, 28
 kausales, 71
 mathematisches, 76
 mentales, 41, 69, 70, 71, 78

N

Netzwerk, 15
 LNR-Netzwerk, 45
 traditioneller Netzwerkansatz, 78

semantisches Netzwerk, 17, 64
 strukturelles Netzwerk
 Veränderungen, 47
 neuronale Netze, 8

O

operantes Konditionieren, 6
 Operation, 10, 15, 21
 Operator, 15, 21
 Anfügeoperatoren, 17
 Anwendungsbereich, 16
 Auswahlkriterien, 24
 Einsatz, 29
 Elementaroperatoren, 17
 Kosten, 17
 Makrooperatoren, 17, 37
 Bildung, 37
 Nachteil, 37
 Vorteil, 37
 Operatoranwendung
 Erfolgsanalyse, 24
 Operatorgedächtnis, 19
 Operatorsuche, 24
 Reversibilität, 16
 Tauschoperatoren, 17
 Trennoperatoren, 17
 Wandlungsoperatoren, 17
 Wirkungsgrad, 16
 Wirkungssicherheit, 16
 operator operandum, 61
 Orientierungslernen, 7

P

Pawlow, 5
 Piaget, 8, 9, 11, 13, 16, 19, 23, 36
 Stufenlehre, 9
 Objektkonstanz, 10
 Prädikat-Argument-Struktur, 42, 46
 Prädikatenkalkül-Ansatz, 78
 Prädikatenlogik, 42
 Problem, 13, 23
 Problemlösen, 41
 Problemlöser, 27
 Problemlösungsverhalten
 Phasen, 23
 Problemtyp, 14
 dialektischer, 14
 charakteristisches Merkmal, 29
 interpolatorischer, 14
 Strategien zur Lösung, 24
 synthetischer, 14, 27
 Problemwechsel, 21
 Produktionssystem, 63, 64

Arbeitsspeicher, 63
 Interpretier, 63
 Produktionsregeln, 63
 Modularität, 63
 Wissenserwerbs, 63
 Zyklen, 63

Proposition, 42
 propositional orientierter Ansatz, 78
 Propositionsliste, 42
 Prototyp, 44, 75
 Prototypentheorie, 44
 Prüfprozesse
 systemimmanente, 29
 systemtranszendente, 29

Q

qualitative Differentialgleichungen, 76
 qualitative Physik, 71
 qualitative Prozeßtheorie, 73
 qualitative Simulation, 71
 Ergebnis, 71
 Quillian, 42

R

Realitätsbereich, 15, 19, 21, 35, 52
 Reflexion, 62
 Relation
 Relationen-Kategorien, 48
 Relationsarten, 43
 Repräsentation
 analoge, 70
 deklarative, 67, 68
 propositionale, 70
 prozedurale, 68
 qualitative, 76
 Reversibilität, 10
 Rückkopplungsprozesse, 62
 Rumelhart & Norman, 54
 Ryle, 47

S

Sachverhalt, 15
 Dynamik, 16
 Komplexität, 16
 Transparenz, 16
 Vernetztheit, 16
 Schema, 8, 52
 Evaluations-Schemata, 9
 Funktion beim Wissenserwerb, 57
 Instantiierung, 53
 Integrationsfunktion, 57

Invarianz-Schema, 10
kognitive Schemata, 8
 Konzept, 61
Leerstellen (Slots), 19, 53, 55, 56
Prozeßkomponente, 53
Schemaerwerb, 56
schemageleitet (top down), 53
Schematheorie, 78
sensorische Schemata, 8
 Strategien zur Bildung, 38
 Umbau, 38
 Unbestimmtheitsstellen, 38
 Unschärfestellen, 38
Standardwerte (Default Values), 53
Strukturkomponente, 53
Unschärfestellen, 19
Wertebereich, 53
Selbstreflexion, 21, 62
Selz, 32
semantische Relation, 18
 Abstraktheits-Relation, 18
 Raum-zeitliche-Relation, 18
 Teil-Ganzes-Relation, 18
sensorischer Speicher, 17
Sicht, 61
Sichtweise, 23, 61
Skinner, 6
Struktur-Abbildungs-Theorie, 73
subjektive Organisationstendenz, 12
Subsachverhalte, 16
Suchen
 Rückwärtssuche, 25, 26
 Vorwärtssuche, 25, 26
System
 dynamisches, 70

T

Teachable Language Comprehender (TCL), 43
Textanalyse, 48
Thorndike, 5
Tintenfischhypothese, 19
Tolman, 7
topologische Struktur, 71
TOTE-Einheit, 20, 21
Transfer, 27
Transferprozesse, 67
Transformation, 61
transitive Hülle, 62

U

Umstrukturierung, 53
Umweltwissen, 48, 50

V

Validierung, 52
Verhaltensformung, 21
Versuch und Irrtum, 5, 25
 vollständig stochastisch, 25
 vollständig systematisch, 26

W

Wertheimer, 7
Wissen
 deklaratives, 46, 47, 51, 53, 59, 64, 68
 dynamisches, 54
 episodisches, 50
 prozedurales, 46, 47, 51, 53, 59, 64, 68
 Rekonstruktion, 58
 semantisches, 43
Wissenserwerb, 41, 52, 57, 64, 72, 74, 78
Phasen, 64
 Enkodierung, 64
 interpretative, 64
 Wissenskompilierung, 64, 67
 Wissensoptimierung, 66, 67
Stufenmodell, 74
Vergleich, 73
Wissensrepräsentation, 41, 51, 73, 78
 propositionale Darstellung, 41

Z

Zielanalyse, 24
Zielbereich, 73
Zielraum, 29
Zustand
 Definitionsteil, 71
 Transitionsteil, 71