

Aufmerksamkeit, Automatisierung und antizipative Verhaltenssteuerung

J. HOFFMANN

1. Willkürliche und unwillkürliche Aufmerksamkeit

Von den vielfältigen Reizen, die uns ständig treffen, verarbeiten wir selbst im Wachzustand nur einen geringen Teil vollständig. Die Mehrzahl der Reizwirkungen ignorieren wir mehr oder weniger. Diese Selektivität der Reizverarbeitung ist besonders unter zwei Bedingungen ausgeprägt: (1) Wenn wir einen Verhaltensablauf mit besonderer Konzentration realisieren. Wir nehmen dann bevorzugt nur diejenigen Reize wahr, die mit diesem Verhalten zusammenhängen und sind mehr oder weniger "blind und taub" gegenüber verhaltensirrelevanten Reizen. (2) Wir können unsere Aufmerksamkeit den unterschiedlichsten Reizwirkungen auch nach Belieben zuwenden: etwa allen Reizen, die von der Haustür kommen, wenn wir argwöhnen, dort macht sich ein Einbrecher zu schaffen; allen Hinweisen auf eine Tankstelle, wenn das Benzin zur Neige geht oder allen Namen in einem Text, wenn wir ein Literaturverzeichnis überprüfen. Die Reize, auf die unsere Aufmerksamkeit gerichtet ist, nehmen wir dann gegenüber anderen Reizen bevorzugt oder doch wenigstens leichter wahr, als wenn unsere Aufmerksamkeit nicht auf sie gerichtet wäre. Es ergibt sich also, daß unsere Wahrnehmung das bevorzugt, was uns entweder gerade beschäftigt oder dem wir unsere Aufmerksamkeit willkürlich zuwenden.

Wilhelm WUNDT hat für die Selektivität der Wahrnehmung den Ausdruck "Apperception" verwendet und bereits zwischen passiver und aktiver Apperzeption unterschieden. Beide Vorgänge bewirken, daß das Bewußtsein "bestimmten Vorstellungen in höherem Grade zugewandt ist als anderen" (WUNDT 1893, 267). Die passive Apperzeption realisiert sich dabei selbsttätig im Strom der Bewußtseinszustände, während die aktive Apperzeption ein Vorgang ist, der mit einem besonderen "Thätigkeitsgefühl" einhergeht. POSNER & SNYDER (1975) haben später in einem ähnlichen Sinn zwischen einer automatischen und einer gesteuerten (controlled) Aufmerksamkeit unterschieden.

2. Anmerkungen zur neueren Geschichte der Aufmerksamkeitsforschung

Die kognitionspsychologische Forschung wird seit ihren Anfängen von der von SHANNON & WEAVER (1949) entwickelten Informationstheorie nachhaltig beeinflusst (vgl. NEUMANN 1992, in diesem Band). Kognition wurde und wird als Problem der Informationsübertragung von der Umwelt (als der Informationsquelle) zum Bewußtsein des Organismus (als dem Informationsempfänger) verstanden, als eine Folge von Prozessen der Kodierung und Dekodierung, der Transformation und Modulation von Informationen innerhalb eines Übertragungskanal, der von peripheren Reizwirkungen zur zentralen Repräsentation der diese Reizwirkungen verursachenden Realität führt: "... the term cognition refers to all the processes by which the sensory input is transformed, reduced, elaborated, stored, recovered, and used" (NEISSER 1967, 4).

Es lag vor diesem Hintergrund nahe anzunehmen, daß die Selektivität der Reizverarbeitung auf einer Selektion von Reizen an einer bestimmten Stelle in dieser Folge von Verarbeitungsprozessen beruht. Vor dieser Stelle, so die Überlegung, werden alle Reize gleichermaßen verarbeitet, während die Verarbeitungsprozesse nach ihr nur noch denjenigen Reizen zuteil werden, die selektiert worden sind. Es sind zwei Auffassungen darüber vertreten worden, wo innerhalb des "Übertragungskanal" die Selektion stattfindet: eine, die eine frühe Selektion und eine andere, die eine späte Selektion annimmt (vgl. Abb. 1): BROADBENT (1958, 297) formulierte, daß "a selective operation is performed upon the input to this channel, the operation taking the form of selecting information from all sensory events having some feature in common". Auf der anderen Seite formulierten DEUTSCH & DEUTSCH (1963, 85): "... all sensory messages which impinge upon the organism are perceptually analysed at the highest level".

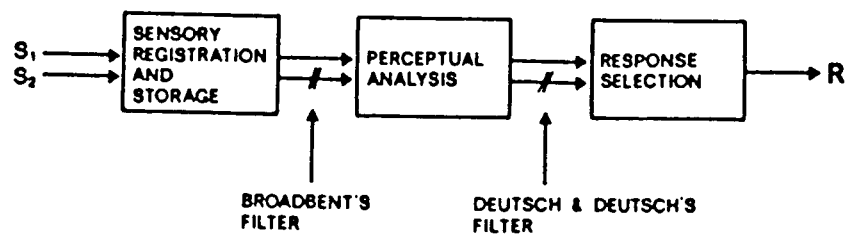


Abb. 1: Zur Veranschaulichung von Auffassungen der frühen und der späten Selektion (nach NAVON 1989)

Gegen beide Auffassungen gibt es wenigstens die folgenden empirischen Einwände: Gegen die frühe Selektion spricht vor allem die Tatsache, daß auch die Bedeutung von Reizen identifiziert wird, die aufgrund ihrer sensorischen Eigenschaften von weiterer Verarbeitung eigentlich ausgeschlossen sein sollten. Sie scheinen die für sie aufgerichtete Verarbeitungssperre zu "durchbrechen" (BROADBENT 1982). Gegen die späte Selektion spricht, daß Reize nach sensorischen in der Regel effizienter als nach semantischen Kriterien selektiert werden können (JOHNSTON & HEINZ 1978, 1979; KAHNEMAN & TREISMAN 1984). Wenn alle Reizwirkungen bis zu ihrer semantischen Identifikation verarbeitet werden, dann sollte es keine Unterschiede in der Effektivität sensorischer und semantischer Selektionskriterien geben.

Angesichts der Unvereinbarkeit der empirischen Befunde mit sowohl der Auffassung von einer frühen als auch der von einer späten Selektion kann vermutet werden, daß die den Alternativen zugrunde liegende Auffassung eines einheitlichen Verarbeitungskanal den tatsächlichen Verhältnissen nicht gerecht wird. Die Frage, ob die Selektion "früh" oder "spät" erfolgt, ist möglicherweise deshalb nicht eindeutig zu beantworten, weil es keinen einheitlichen Kanal der Reizverarbeitung gibt, in dem früher oder später Selektionen vorgenommen werden können. Anstelle eines einheitlichen Verarbeitungskanal läßt sich ein verzweigtes Netz von Kanälen denken, in dem unterschiedliche Aspekte der gegebenen Reizwirkungen gleichzeitig verarbeitet werden. Jeweils unabhängig voneinander könnten bspw. die Lokation eines visuellen Reizes, seine Form und seine Farbe identifiziert werden. In einem weiteren "Kanal" könnten parallel dazu Hinweise auf seine begriffliche Identität akkumuliert werden usw. (ALLPORT, ANTONIS & REYNOLDS 1972). In einem so verzweigten System ist die Selektivität der Reizverarbeitung allerdings nur dann zu erklären, wenn angenommen wird, daß anstelle der begrenzten Verarbeitungsfähigkeit eines einzelnen Kanals nun der Umfang an gleichzeitig zu realisierenden Verarbeitungsleistungen begrenzt ist, so daß entschieden werden muß, wie diese begrenzte Kapazität auf die einzelnen Verarbeitungsleistungen verteilt werden soll.

KAHNEMAN (1973, 9) hat eine solche Überlegung ausgearbeitet. Er nimmt an, daß für jede Leistung neben den notwendigen Reizbedingungen zusätzlich "... a nonspecific input, which may be variously labeled effort, capacity, or attention" gegeben sein muß, und daß diese Ressource, wie sie zumeist genannt wird, zu jedem Zeitpunkt nur begrenzt zur Verfügung steht. Die Ressourcentheorien lassen sich danach unterscheiden, ob sie von der Existenz nur einer oder mehrerer Ressourcen ausgehen. Darauf soll hier nicht eingegangen werden (vgl. dazu MANZEY 1988; MANZEY 1992, in diesem Band). Wir wollen allein den Einfluß der Ressourcentheorien auf die Konzeptualisierung "automatisierter Reizverarbeitung" kurz besprechen.

3. Das Konzept der "automatischen" Informationsverarbeitung

NORMAN & BOBROW (1975, 1976) haben die Unterscheidung zwischen ressourcen- und datenabhängigen Prozessen eingeführt. Die Ergebnisse ressourcenabhängiger Prozesse sind von der Verfügbarkeit von Ressourcen abhängig, während die Ergebnisse datenabhängiger Prozesse stets in gleicher Qualität erbracht werden, wenn nur die reizseitigen Voraussetzungen für ihre Realisierung erfüllt sind. Ressourcenunabhängigkeit wurde so zu einem wichtigen Kriterium für das, was man gemeinhin einen "Automatismus" nennt: "Any process that does not use general, nonspecific processing resources and does not decrease the general, nonspecific processing capacity available for other processes is automatic." (SCHNEIDER, DUMAIS & SHIFFRIN 1984, 21). Das Vorliegen eines automatischen Prozesses kann damit daran operationalisiert werden, daß er (1) die Ausführung anderer Operationen nicht behindert und umgekehrt von der Ausführung anderer Operationen selbst nicht behindert wird, daß er (2) in dem Sinne aufmerksamkeitsunabhängig ist, als er stets in gleich effektiver Weise realisiert wird, gleichviel ob die Aufmerksamkeit auf ihn gerichtet ist oder nicht, und daß es sich schließlich (3) um einen Prozeß handelt, der datenbegrenzt ist, also allein abhängig von der Qualität der jeweiligen Inputreize. In anderen Worten: Automatismen schränken die Reizverarbeitung nicht ein, sie wirken nicht-selektiv (vgl. auch DAUGS 1992, in diesem Band).

Diese Konzeptualisierung von "Automatismen" steht zu einer Reihe von Beobachtungen im Widerspruch. Ihre Unangemessenheit ist u.a. daran erkennbar, daß sich "Automatismen" nicht widerspruchsfrei operationalisieren lassen, daß also ihre operationalen Kriterien nicht konvergieren. In Untersuchungen von SHIFFRIN & SCHNEIDER (1977) hatten die Probanden (Pbn) bspw. Targetbuchstaben unter einer unterschiedlichen Anzahl jeweils gleichzeitig dargebotener Distraktorbuchstaben zu entdecken. Wenn jeweils die gleichen Targets unter den gleichen Distraktoren immer wieder zu entdecken sind (constant mapping), dann werden nach längerem Training die Targets gleich schnell und sicher entdeckt, unabhängig davon, unter wievielen Distraktoren sie "versteckt" werden. Die Targets springen unmittelbar ins Auge (pop out effect). Diese Unabhängigkeit der Targetentdeckung von der Anzahl gleichzeitig zu verarbeitender Reize wird als Beleg für die Automatisierung der Entdeckung verstanden. Werden allerdings "automatisierte" Targets als Distraktoren verwendet, dann stören sie nachhaltig die Suche nach den neuen Targets; d.h., die "automatisierte" (ressourcenunabhängige) Entdeckung der Distraktoren interferiert nun mit der Entdeckung der neuen Targets, was als Indiz für Ressourcenbeanspruchung gilt. Der oben zitierten Definition wurde deshalb eine zweite hinzugefügt: "Any process that demands resources in response to external stimulus inputs, regardless of subjects attempts to ignore the distraction, is automatic"

(SCHNEIDER, DUMAIS & SHIFFRIN 1984, 21). Der Vergleich beider Definitionen macht den Widerspruch explizit: Automatische Prozesse können sowohl ressourcenunabhängig als auch ressourcenabhängig sein, je nachdem ob sie intendiert sind oder unterdrückt werden sollen. Die Unterscheidung von automatisierten und gesteuerten Prozessen nach ihrer Ressourcenabhängigkeit verliert damit allerdings jeden Erklärungswert (vgl. NEUMANN 1984, 1989; HUMPHREYS 1985).

4. Trainingsabhängige Verhaltensänderungen

Dennoch ist die "Automatisierung" von Verhaltensweisen nach extensivem Training ein unbestreitbares und zu erklärendes Phänomen, das uns allen etwa vom Erlernen des Autofahrens wohl vertraut ist und das im Sport eine hervorragende Rolle spielt. Allein, der Hinweis auf eine Reduktion der für die Kontrolle der Verhaltensausführung beanspruchten Ressourcen ist wenig hilfreich für eine genauere Analyse dieses Übergangs von einer kontrollierten, stockenden und störanfälligen zu einer automatischen Verhaltensausführung. Es erscheint nützlicher, anstelle einer Umschreibung dieser Veränderungen mit Hilfe der nichts erklärenden Metapher der Ressourcenunabhängigkeit, zunächst die Art der Veränderungen genauer zu analysieren, die anhaltendes Training eines Verhaltensaktes bewirken.

Eine erste wichtige Veränderung betrifft die trainingsabhängige Reduktion des Zeitverbrauchs der Verhaltensausführung. Es ist für die verschiedensten Leistungen, vom Zigarren rollen über das Lesen von Spiegelschrift bis hin zum Lösen einfacher Probleme, gezeigt worden, daß der Zeitaufwand zum Erbringen einer Leistung mit ihrem Training nach einer Potenzfunktion mit negativem Exponenten abnimmt (power law of practice: NEWELL & ROSENBLOOM 1981). Dieser Zusammenhang besagt, daß die zugrunde liegenden Lernvorgänge zu Beginn der Wiederholungen zu einem starken Lerngewinn führen, der mit fortschreitendem Training immer schwächer wird bis schließlich ein Optimum erreicht wird, das kaum noch weiter verbessert werden kann. Allerdings führen so unterschiedliche Lernmodelle, wie etwa das Lernen nach der Delta-Regel (WIDROW & HOFF 1960), die Reizauswahl-Theorie (ESTES 1950) oder die Akkumulation individueller Verhaltensbeispiele (LOGAN 1988, 1990) zu jeweils vergleichbaren Lernkurven, so daß verbindliche Schlußfolgerungen über die zugrunde liegenden Lernprozesse aus dem Lernverlauf allein nicht gezogen werden können.

Eine wichtige Eigenschaft hochtrainierten Verhaltens besteht weiterhin darin, daß es oftmals eine invariante zeitliche Strukturierung aufweist: VIVIANI & TERZUOLO (1980) haben bspw. bei Sekretärinnen über zwei Jahre hinweg die Schreibgeschwindigkeit für einzelne Worte analysiert. Sie konnten feststellen, daß die

Gesamtzeiten für das Schreiben der untersuchten Worte zwar deutlich variieren, die Zeitverhältnisse zwischen den Anschlägen für die einzelnen Buchstaben dabei jedoch außerordentlich konstant bleiben. Auch in anderen Kontexten und nicht zuletzt bei der Ausführung hochtrainierter Handlungsabläufe im Sport hat man immer wieder solche festen Rhythmen der Handlungsausführung feststellen können (z.B. ROSENBAUM, KENNY & DERR 1983).

Die Rhythmen in der Ausführung hochgeübten sequentiellen Verhaltens können verschiedene Ursachen haben. Es können beim Übergang zwischen aufeinanderfolgenden Akten allein schon biomechanische oder kinetische Eigenschaften der auszuführenden Bewegungen Zeitunterschiede verursachen (EASTON 1978; VIVIANI 1986). Die weitgehende Invarianz der Rhythmen auch bei wechselnden Ausführungsbedingungen läßt aber vermuten, daß neben solchen peripheren auch zentrale Ursachen für die Strukturierung verantwortlich sind (z.B. PEW 1974; SHAFFER 1982; ROSENBAUM 1985). Mit "zentral" sind hier Mechanismen der mentalen Steuerung und Kontrolle der Verhaltensausführung gemeint. ROSENBAUM, KENNY & DERR (1983) vermuten etwa, daß Ausführungsrythmen durch hierarchisch organisierte Steuerungsstrukturen determiniert werden, und sie bauen diese Vermutung zu einem hierarchischen Editormodell der motorischen Steuerung aus (ROSENBAUM, INHOFF & GORDON 1984; ROSENBAUM, HINDORFF & MUNRO 1987).

Wir wollen festhalten, daß sich durch Training oder Übung eine vermutlich bevorzugt hierarchisch organisierte Form der Verhaltenskontrolle ausbildet, die der häufig beobachtbaren Rhythmik der Verhaltensausführung wenigstens teilweise zugrunde liegt. Möglicherweise, so läßt sich weiter vermuten, beruht auch die trainingsbedingte Reduktion der Gesamtzeiten für die Ausführung der Verhaltenssequenz wenigstens teilweise auf ihrer internen Strukturierung (chunking, MILLER 1958), so daß das erwähnte "power law of practice" mit den Gesetzmäßigkeiten dieser Strukturbildung zusammenhängt. Wenn diese Überlegungen richtig sind, dann geht die Automatisierung einer Verhaltenssequenz mit ihrer Strukturierung Hand in Hand und es gilt dann, die Gesetzmäßigkeiten dieser Strukturbildung zu erfassen.

5. Die lernabhängige Ausbildung sequentieller Strukturen

Die lernabhängige Ausbildung sequentieller Strukturen wurde wohl erstmals von RESTLE & BROWN systematisch untersucht (RESTLE 1970; RESTLE & BROWN 1970a, b). In den Versuchen sahen sich die Pbn einer Reihe von sechs horizontal angeordneten Lampen gegenüber (1...6). Die Lampen wurden in einer bestimmten Reihenfolge zum Leuchten gebracht, und die Aufgabe der Pbn bestand in der

Prädiktion der jeweils nächstfolgend leuchtenden Lampe. Zwischen den Ereignissen in dieser "Miniwelt" lassen sich unmittelbar Relationen erkennen, etwa die Wiederholung (R), wenn dieselbe Lampe hintereinander leuchtet, die Transposition (T), wenn das Licht von links nach rechts oder umgekehrt wandert, oder die Spiegelung (M), wenn etwa nach der Lampe links außen die Lampe rechts außen leuchtet. Innerhalb einer Folge sind also die einzelnen Ereignisse durch verschiedene Relationen strukturell verbunden. Die Abbildung 2 zeigt das Beispiel einer hierarchisch organisierten Folge: Relationale Transformationen werden jeweils rekursiv auf die bereits entstandene Teilfolge angewendet. Die Organisationsstruktur repräsentiert damit den Prozeß der Erzeugung der Gesamtfolge durch die geordnete Anwendung von relationalen Transformationen auf immer größere Teilfolgen. Ebenfalls dargestellt sind die relativen Häufigkeiten korrekter Reaktionen beim Erlernen einer anderen fünfstufig-hierarchischen Folge. Die Werte sind jeweils für alle die Positionen zusammengefaßt, die durch eine gemeinsame Hierarchieebene determiniert werden.

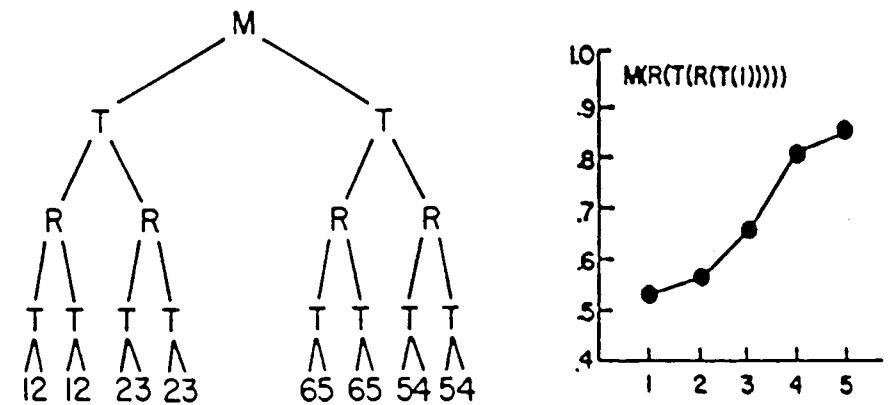


Abb. 2: Eine hierarchisch strukturierte Sequenz von Ereignissen; daneben die relativen Häufigkeiten korrekter Reaktionen, aufgetragen über die Hierarchieebenen 1 bis 5 (nach RESTLE 1970).

Die Daten sprechen dafür, daß die Organisationsstruktur der Folge im Lernprozeß von "unten nach oben" erworben wird: Mit der Höhe der determinierenden Hierarchieebene (in Abb. 2 entspricht 1 der höchsten Ebene) nimmt die Anzahl korrekter Reaktionen kontinuierlich ab. Weitere Versuche zeigen, daß eine einmal erworbene Organisationsstruktur auch auf andere Folgen übertragen werden kann. Die

Autoren vermuten einen Lernprozeß, in dessen Verlauf die Pbn die angewendeten Erzeugungsregeln zunächst für benachbarte Elemente und später, darauf aufbauend, für benachbarte Teilfolgen erkennen, bis die gesamte Folge als relationale Transformation möglichst weniger Ausgangselemente repräsentiert ist. Sie vermuten also, daß die Pbn die Erzeugungsstruktur erlernen, die der Konstruktion der Folgen zugrundegelegt wurde.

Folgende Schwierigkeiten stellen sich einer Verallgemeinerung dieser Überlegungen entgegen: (1) Die zur Strukturierung von Ereignisfolgen außerhalb der experimentellen Miniwelt verwendbaren Relationen sind in der Regel nicht bekannt. (2) Selbst unter den einschränkenden Bedingungen der geschilderten Experimente haben die verschiedenen Relationen unterschiedliche strukturbildende Kraft. Es kann damit nicht vorhergesagt werden, welche der zumeist mehrfach bestehenden Strukturierungsalternativen realisiert werden wird. RESTLE (1976, 377) kommt nach einer Untersuchung solcher strukturellen Mehrdeutigkeiten dann auch zu der resignativen Feststellung: "Both the subject and the experimenter share the same problem in these experiments, a problem caused by structural ambiguity". Daß nicht vorhersagbar ist, welche der Strukturen unter welchen Bedingungen gewählt werden, hängt schließlich (3) vor allem damit zusammen, daß keine Annahmen über die Mechanismen gemacht werden, die dem Lernprozeß zugrunde liegen. Es bleibt also un spezifiziert, durch welche Rückmeldungen welche Strukturen wie verändert werden, um den Strukturbildungsprozeß in Gang zu bringen und zu halten.

Im Gegensatz zu den eben behandelten transformativen Strukturen beschreiben "finite state" Grammatiken sequentielle Strukturen, ohne die Qualität der zwischen den aufeinanderfolgenden Reizen bestehenden Relationen zu berücksichtigen (Abb. 3). Durch eine "finite state" Grammatik werden lediglich die Möglichkeiten der Aufeinanderfolge einer endlichen Menge von Reizen oder Zuständen systematisch begrenzt. Insbesondere REBER hat die lernabhängigen Wirkungen so strukturierter Ereignisfolgen analysiert. Er kann feststellen, daß bei wiederholter Darbietung die strukturierten im Vergleich zu zufälligen Buchstabenfolgen zunehmend leichter memoriert werden, daß die Pbn es lernen, zwischen strukturierten und zufälligen Folgen zu unterscheiden und daß eine einmal erworbene Grammatik auf Folgen anderer Buchstaben transferierbar ist (vgl. REBER 1989 für einen Überblick). CLEEREMANS & McCLELLAND (1991) haben ergänzend gezeigt, daß auf die Reize einer grammatisch strukturierten Folge zunehmend schneller reagiert wird als auf die gleichen Reize in zufälliger Folge.

Die die Folge des Auftretens von Ereignissen bestimmende "finite state" Grammatik gewinnt also in dem Maße Einfluß auf das Verhalten, in dem die Pbn Umgang mit ihnen haben. Dabei werden die Regelmäßigkeiten in der Abfolge der Ereignisse von

den Pbn oftmals nicht oder nur bruchstückhaft bemerkt. REBER und andere Autoren vermuten daher einen unbewußten oder impliziten Lernprozeß, der dafür sorgt, daß die strukturellen Eigenschaften der Ereignisfolgen unbemerkt Einfluß auf das Verhalten gewinnen: "... implicit learning represents a general, modality-free Ur-process, a fundamental operation whereby critical covariations in the stimulus environment are picked up" (REBER 1989, 233). Inwieweit die vorliegenden Resultate dazu berechtigen, von einem besonderen impliziten Lernmechanismus zu sprechen, soll hier unerörtert bleiben (vgl. HOFFMANN, im Druck a). Hier soll nur festgestellt werden, daß in den vorliegenden Arbeiten zum impliziten Lernen wiederum keinerlei Überlegungen darüber diskutiert werden, durch welche Rückmeldungen denn welche Strukturen wie verändert werden, um den impliziten Strukturbildungsprozeß in Gang zu bringen und zu halten.

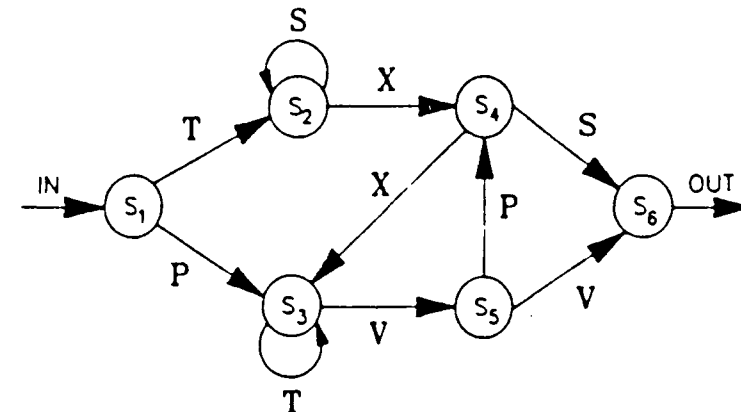


Abb. 3: Darstellung einer "finite state" Grammatik: Durch Realisierung der zwischen den Zuständen S_i möglichen Übergänge werden die an den Pfeilen angezeigten Buchstaben erzeugt. Es entstehen grammatisch strukturierte Buchstabenfolgen wie TSSXS, TSXXVPS oder PVPXVPS (nach REBER 1967).

Es liegen m.W. lediglich zwei aktuelle Versuche vor, die Lernvorgänge zu differenzieren, die den Strukturwirkungen von "finite state" Grammatiken zugrunde liegen könnten. Wir wollen hier nur den Versuch behandeln, sequentielle Strukturbildung mit rekurrenten Netzwerken zu simulieren (ALLEN 1988; ELMAN 1990; SMITH & ZIPSER 1989; JORDAN 1986; für den nicht behandelten Ansatz des "competitive chunking" vgl. SERVAN-SCHREIBER & ANDERSON 1990). Ein rekurrentes Netzwerk (Abb. 4) kann dadurch charakterisiert werden, daß seine

Ausgangselemente über vermittelnde Einheiten (hidden units) mit seinen Eingangselementen verbunden sind und daß die Aktivitätszustände der hidden units (eine Kopie von ihnen) selbst einen Teil des Eingangsvektors bilden. Die Funktion dieser Architektur kann in der folgenden Weise verstanden werden: Die Aktivitätszustände der hidden units hängen mit von den vorausgegangenen Eingangs-Ausgangsverbindungen des Netzwerkes ab. Sie repräsentieren damit in der Vergangenheit gemachte Erfahrungen. Dadurch, daß diese Erfahrungen dem Netz als Teil der Eingangsinformation zurückgeführt werden, nutzt das Netz bei seiner Reaktion auf jeden neuen Eingangsvektor seine Erfahrungen aus vorangegangenen Reaktionen. Auf diese Weise repräsentiert das Netzwerk zeitliche Strukturen, obwohl es lediglich über isolierte Eingangs-Ausgangsverbindungen belehrt wird.

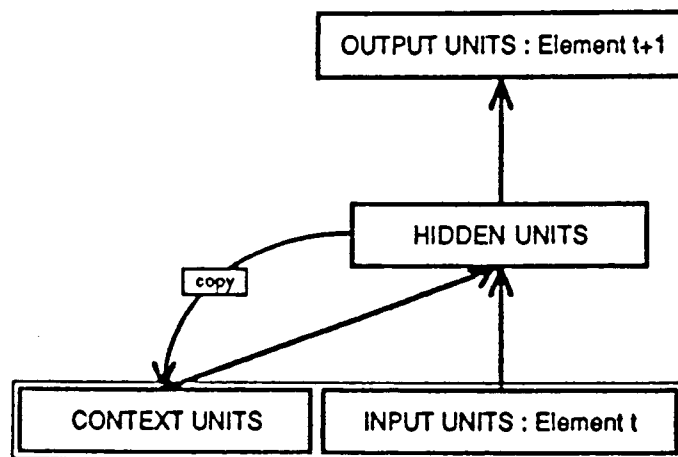


Abb. 4: Rekurrentes Netzwerk zur Vorhersage des jeweils folgenden Elementes einer Input-Sequenz (nach CLEEREMANS & McCLELLAND 1991).

Direkte Vergleiche sequentieller Lernprozesse eines rekurrenten Netzwerkes mit denen von Pbn sind von CLEEREMANS & McCLELLAND (1991) berichtet worden. Es wurden Buchstabensequenzen dargeboten, die durch eine "finite state" Grammatik erzeugt waren. Die Pbn hatten auf die Reize so schnell wie möglich zu reagieren (sequentielle Wahlreaktion), während das Netzwerk den jeweils nächsten Reiz der Folge vorherzusagen hatte. Um Reaktionszeiten und Vorhersagen vergleichbar zu machen, wird angenommen, daß sich die Reaktionszeiten umgekehrt proportional zur Stärke der Antizipation des reaktionsauslösenden Reizes verhalten. Das Netzwerk

zeigt (nach einigen Modifikationen) qualitativ gleiche Lernresultate wie die Pbn: So werden bspw. die Reaktionszeiten der Pbn und die Antizipationen des Netzwerkes zunehmend stärker durch immer längere Sequenzen vorangegangener Reize beeinflusst. Die Autoren vermuten, daß das mit dem Netzwerk simulierte Antizipationslernen der Strukturbildung der Pbn zugrunde liegt: "Encoding of the temporal structure seems to be primarily driven by anticipation of the next element of the sequence" (CLEEREMANS & McCLELLAND 1991, 252).

Bei den rekurrenten Netzwerken werden also sequentielle Strukturen durch eine lernabhängige Erhöhung der Verlässlichkeit von Antizipationen des jeweils nächsten Elementes der Folge gebildet - in Abhängigkeit von den vorangegangenen Elementen. Die Strukturbildung wird also in erster Linie durch die Wiederholung von Nachbarschaften vorangetrieben. Die Art der Beziehung zwischen benachbarten Einheiten spielt keinerlei Rolle für die Strukturbildung. Die in den Untersuchungen von RESTLE & BROWN beobachtete Ausbildung von generalisierbaren Organisationsprinzipien, die auf einer Verallgemeinerung der zwischen benachbarten Einheiten bestehenden Relationen beruht, kann mit diesen Ansätzen also nicht beschrieben werden (für eine aktuelle Ausnahme siehe MOZER 1991).

6. Die Strukturierung von Ereignis- und/oder von Verhaltenssequenzen

Die im vorigen Abschnitt behandelten Überlegungen zum lernabhängigen Aufbau sequentieller Strukturen beziehen sich auf die Strukturierung von Ereignissequenzen. Dies entspricht der Tradition kognitionspsychologischer Untersuchungen, sich mit der internen Abbildung in der Umwelt gegebener Strukturen zu beschäftigen. Es bleibt damit sowohl ungeklärt, inwieweit diese Ansätze zur Beschreibung der Strukturierung von Verhaltenssequenzen als auch zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Strukturbildungen in Verhaltens- und Ereignissequenzen verwendet werden können. Solche Zusammenhänge sind vor allem dann von Interesse, wenn die Abfolge der Ereignisse durch das eigene Verhalten determiniert wird. Und dies ist unter natürlichen Bedingungen stets der Fall: In welcher Folge wir welchen Ereignissen begegnen, wird vor allem dadurch bestimmt, in welcher Folge wir welche Verhaltensweisen realisieren, angefangen beim Wechsel von Blickfixationen über die Fortbewegung bis hin zur gezielten Manipulation von Objekten.

Dieser unauflösliche Zusammenhang zwischen dem eigenen Verhalten und den mit ihm erzeugten Reizwirkungen ist m.W. in Experimenten bislang nur annäherungsweise zur Wirkung gebracht worden, etwa in Untersuchungen, in denen an sequentiell dargebotene Reize feste Reaktionen gebunden waren (sequentielle

Wahlreaktion). Hier kann zwar die Sequenz der Reize durch das eigene Verhalten nicht beeinflusst werden, ihr entspricht aber eine in gleicher Weise strukturierte Sequenz von Reaktionen. Damit entsteht die Frage, inwieweit das Erlernen dieser Struktur auf die Reizsequenz, die Verhaltenssequenz oder auf beide zurückgeführt werden muß.

COHEN, IVRY & KEELE (1990) sowie STADLER (1989) sind dieser Frage nachgegangen. Sie boten ihren Pbn Sequenzen von Reizen dar, deren Folge entweder fest oder nach Regeln determiniert und in diesem Sinne strukturiert war. Den Reizen waren Tastendruck-Reaktionen zugeordnet, die so schnell wie möglich ausgeführt werden sollten. In beiden Untersuchungen zeigen die Pbn nach längerem Training eine strukturspezifische Beschleunigung ihrer Reaktionen. Werden sie dann plötzlich aufgefordert, ihre Reaktionen mit anderen Fingern zu tätigen, wird der bis dahin erreichte Leistungsstand kaum beeinflusst. Wird dagegen bei gleichbleibenden Reaktionen die Erscheinungsweise der reaktionsauslösenden Reize geändert, kommt es zu einem vergleichsweise deutlichen Leistungseinbruch (STADLER 1989). Man kann schlußfolgern, daß die strukturspezifische Leistungsverbesserung nicht auf einer "motorischen", sondern auf einer "sensorischen Strukturierung" der die Reaktionen steuernden Reizsequenz beruht.

Diese Schlußfolgerung wird durch Beobachtungen von WILLINGHAM, NISSEN & BULLEMER (1989) jedoch in Frage gestellt. Den Pbn werden Reize unterschiedlicher Farbe und Lokation dargeboten. Die Reaktionen sind an die Farbe gebunden. Werden die Reize so dargeboten, daß ihre Lokationen eine feste Sequenz bilden, ihre Farben jedoch zufällig aufeinander folgen, dann entsteht eine Situation, in der eine fest strukturierte Sequenz von Reizlokationen gelernt werden kann, während die an die Reize gebundenen Reaktionen zufällig aufeinander folgen. Unter diesen Bedingungen gibt es nicht die geringsten Hinweise auf strukturspezifische Lerneffekte. Es werden dagegen die üblichen Lerneffekte beobachtet, wenn mit den Reizen auch die Reaktionen in strukturierter Sequenz gefordert werden. Für den Lerneffekt scheint also doch die Struktur der Reaktionsfolge und nicht die der Reize entscheidend zu sein.

Man kann die geschilderten Ergebnisse wohl dahingehend deuten, daß weder allein Struktureigenschaften von Reizfolgen noch allein solche von Folgen motorischer Reaktionen den Lernprozeß bestimmen. Strukturen zwischen Reizeigenschaften werden vor allem dann erlernt, wenn sie verhaltensrelevant sind, und Strukturen zwischen motorischen Reaktionen werden in ihrem Bezug zu den sie auslösenden Reizen gelernt: "What is learned may be thought of as a series of condition-action statements mapping stimuli onto responses" (WILLINGHAM, NISSEN &

BULLEMER 1989, 1058). Welche Mechanismen allerdings zur Strukturierung dieser "condition-action" Paarungen führen, bleibt auch hier unbeantwortet.

Wir können zusammenfassen: Die zitierten Überlegungen zu Lernmechanismen, die dem Aufbau sequentieller Strukturen zugrunde liegen könnten, erscheinen aus mehreren Gründen unzureichend: Antizipationslernen in rekurrenten Netzwerken (und auch das nur erwähnte "competitive chunking") beruhen auf der Ausnutzung von statistischen Eigenschaften der Aufeinanderfolge von Ereignissen, speziell der Häufigkeit von Nachbarschaften; sie berücksichtigen jedoch nicht die Spezifik der Relationen zwischen benachbarten Ereignissen und können damit die Ausbildung generalisierter Organisationsstrukturen nicht erklären. Die Überlegungen von RESTLE & BROWN gehen dagegen vom lernabhängigen Aufbau generativer Prozesse aus, die explizit auf der Systematik der zwischen Teilsequenzen bestehenden Relationen beruhen und damit zu generalisierbaren Organisationsstrukturen führen; sie spezifizieren jedoch nicht die Mechanismen, die diesen Aufbau leisten. Keiner der diskutierten Ansätze erlaubt es, die Bildung von Strukturen über Ereignissequenzen mit der Strukturierung von Verhaltenssequenzen zu verbinden. Wie also sequentielle Strukturen in voneinander abhängigen Ereignis- und Verhaltenssequenzen gebildet werden und dabei zu ihrer Automatisierung führen, ist eine noch immer offene Frage.

7. Die Strukturierung von Verhaltens- und Ereignissequenzen durch antizipative Verhaltenssteuerung

Gehen wir zunächst von der bereits erwähnten Tatsache aus, daß unter natürlichen Bedingungen die Sequenz der von uns wahrnehmbaren Ereignisse wesentlich durch unser eigenes Verhalten determiniert wird. Jeder Blickwechsel führt zu einer Veränderung der retinalen Abbildung, jede Bewegung zu neuen Perspektiven, jede Manipulation mit einem Objekt zu neuen Eindrücken usw. Die Veränderungen der gegebenen Reizwirkungen durch das eigene Verhalten sind dabei durchaus nicht zufällig, sondern oftmals in jeweils spezifischer Weise invariant (GIBSON 1979). Man könnte vielleicht sogar sagen, daß in der Menge der unübersehbar vielfältigen Reizänderungen, die ständig gegeben sind, allein diejenigen, die auf das eigene Verhalten zurückgehen, Systematik und damit Struktur erkennen lassen (vgl. TURVEY 1977, 1990).

Wenn wir uns, wie meist, intentional verhalten, also nicht einfach reflektorisch reagieren und auch nicht blind einem Verhaltensdrang nachgeben, dann wollen wir mit unserem Verhalten bestimmte Ziele erreichen, etwa eine bestimmte Stelle fixieren, zu einem bestimmten Ort gehen, ein bestimmtes Objekt ergreifen usw. Damit wir diese Ziele auch erreichen, müssen wir "wissen", zu welchen

Konsequenzen unser Verhalten unter den gegebenen Bedingungen führen wird. Ohne dieses "Wissen" könnten wir niemals mit der zumeist typisch schlafwandlerischen Sicherheit jeweils genau das Verhalten realisieren, das uns das Ziel auch erreichen läßt. Wir müssen also die Konsequenzen unseres Verhaltens antizipieren, um es zielgerecht einsetzen zu können.

Die zwingende Notwendigkeit einer antizipativen Kontrolle intentionalen Verhaltens war den Gründungsvätern unserer Wissenschaft eine Gewißheit: WUNDT (1893, 571) argumentierte etwa, daß sich die einer Willenshandlung vorausgehende Vorstellung "... auf den Effekt der auszuführenden Bewegung zu beschränken pflegt ...". JAMES (1981, 1112; orig. 1890) formulierte: "An anticipatory image ... is the only psychic state which introspection lets us discern as the forerunner of our voluntary acts". MÜNSTERBERG (1889, 23-24) sprach im gleichen Sinne von einem dem Verhaltensakt vorausgehenden Innervationsgefühl, das "... nichts anderes ist als die Erinnerungsvorstellung der früher vollzogenen Wahrnehmung ...". Später wurde die Überlegung im Reafferenzprinzip aufgegriffen, wo eine Efferenzkopie den Organismus die zu erwartenden Reafferenzen "sehen läßt", noch bevor die Bewegung ausgeführt wird (von HOLST & MITTELSTAEDT 1950). Und auch für NEISSER (1976, zitiert nach der deutschen Übersetzung 1979, 50) "... sind die für das Sehen entscheidenden kognitiven Strukturen die antizipierenden Schemata, die den Wahrnehmenden darauf vorbereiten, bestimmte Arten von Informationen eher aufzunehmen als andere ...".

Damit sich eine antizipative Kontrolle intentionalen Verhaltens entwickeln kann, müssen die mit der Ausführung eines Verhaltensaktes systematisch zu erwartenden Konsequenzen, soweit sie nicht genetisch determiniert sind, gelernt werden. Da weiterhin die Konsequenzen unseres Verhaltens oftmals von den Bedingungen abhängen, unter denen wir es anwenden, würde ein Lernprozeß, der sich allein auf die Kovariationen zwischen Verhaltensakten und eintretenden Konsequenzen stützt (HEIN & HELD 1962), nicht genügen. Es muß vielmehr ein Lernprozeß sein, der die Verhaltenskonsequenzen bedingungsabhängig registriert, der festhält, unter welchen Bedingungen welche Verhaltensweisen zu welchen Konsequenzen führen.

Eine zweckmäßige Struktur für einen solchen Lernprozeß wäre realisiert, wenn erstens intentionales Verhalten stets von Antizipationen der nach bisherigen Erfahrungen mit der Verhaltensausführung in der gegebenen Situation zu erwartenden Reizänderungen begleitet würde und wenn zweitens durch einen ständigen Vergleich der antizipierten mit den eintretenden Reizänderungen dafür gesorgt wäre, daß sich die Antizipationen den tatsächlichen Gegebenheiten kontinuierlich anpassen. Übereinstimmungen sollten die Bindung der bestätigten Antizipationen an die gegebenen Situationsbedingungen verstärken und die der nicht-bestätigten schwächen.

Treten keine der antizipierten Veränderungen ein, sollte dies zu einer Differenzierung der Situationsbedingungen hinsichtlich der mit ihnen verbundenen Verhaltenskonsequenzen führen. Das Nichteintreten der erfahrungsgemäß zu erwartenden Konsequenzen signalisiert ja, daß sich die gegebene von den gewohnten Situationen unterscheidet und damit auch mit anderen Antizipationen verbunden werden muß (vgl. für ausführlichere Diskussionen HOFFMANN 1990, im Druck b, im Druck c, in Vorbereitung).

Ein Lernmechanismus mit solchen Eigenschaften würde zwangsläufig bewirken, daß die invariant mit einem bestimmten Verhalten einhergehenden Reizänderungen in Abhängigkeit von den Bedingungen, unter denen es realisiert wird, immer sicherer antizipiert werden, und er würde somit gewährleisten, daß das Verhalten immer gezielter eingesetzt werden kann, um unter verschiedenen Situationsbedingungen die unterschiedlichsten Ziele zu erreichen. Im Resultat eines solchen Lernprozesses wäre ein intentionaler Verhaltensakt mit zwei Arten von Antizipationen verbunden (Abb. 5): Eine Antizipation von Eigenschaften des zu erreichenden Zielzustandes, die im Resultat der Verhaltensausführung erwartet werden, und eine Antizipation von Eigenschaften des Ausgangszustandes, die erfahrungsgemäß gegeben sein müssen, damit das Verhalten auch zu den erwarteten Konsequenzen führt.

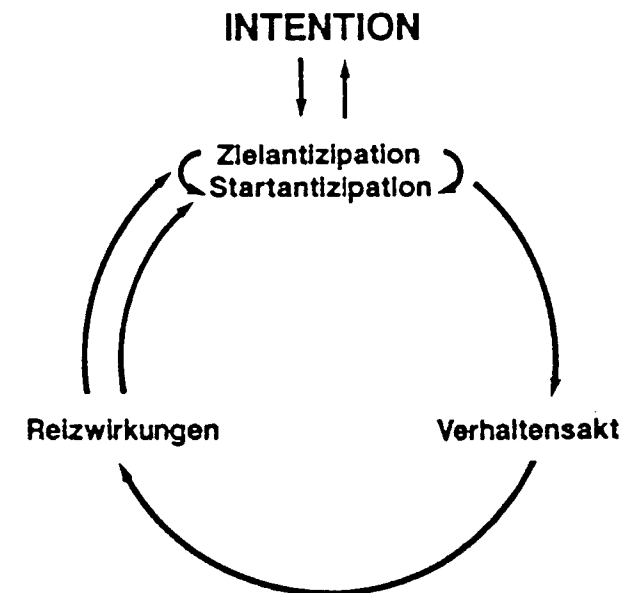


Abb. 5: Die Grundstruktur einer antizipativen Kontrolle intentionalen Verhaltens

8. Antizipative Verhaltenssteuerung und sequentielle Strukturierung

Wenden wir nun diese Überlegungen auf Verhaltensfolgen an: Die Konsequenzen jedes einzelnen Verhaltensschrittes sind nun zugleich die Ausgangsbedingungen für den nächstfolgenden Schritt und die Sequenz im Ganzen dient der Transformation eines Ausgangszustandes S_a in einen Zielzustand S_z durch mehrere Verhaltensschritte. Ein Lernmechanismus mit den oben angedeuteten Eigenschaften würde innerhalb der dabei entstehenden Folge von Reizbedingungen und Verhaltensakten ($S_a-R_1-S_2-R_2-\dots-S_z$) kontinuierlich nach systematischen Beziehungen zwischen einzelnen Verhaltensakten R_i und den mit ihnen einhergehenden Reizveränderungen ($S_i - S_{i+1}$) "suchen". Dort, wo solche systematischen Beziehungen gegeben sind, wo also einer der Verhaltensakte eine bestimmte Situation, in der er zur Anwendung kommt, auf immer wieder die gleiche Weise kontingent verändert, dort werden die Konsequenzen des Verhaltensaktes am ehesten antizipiert werden können.

Mit der Antizipation von Konsequenzen werden in einer Verhaltensfolge zugleich die Ausgangsbedingungen für den nachfolgenden Verhaltensakt spezifiziert. Führt nun die Anwendung dieses Aktes auf die entstandene Situation erneut zu einer kontingenten Situationsänderung ($S_{i+1}-R_{i+1}-S_{i+2}$), dann entsteht eine Situation, in der vom Zustand S_i ausgehend das Erreichen des Zustandes S_{i+2} mit Sicherheit antizipiert werden kann. Auf diese Weise bilden die aufeinanderfolgenden Situationen $S_i-S_{i+1}-S_{i+2}$ und die aufeinanderfolgenden Verhaltensakte R_i-R_{i+1} eine Einheit, einen "chunk", in dem der Weg von der Ausgangssituation S_i zur Zielsituation S_{i+2} vollständig antizipativ vorbestimmt ist. Wendet man nun die gleichen Überlegungen auf so entstandene "chunks" an, läßt sich leicht sehen, wie eine Verhaltensfolge, entsprechend der Aufeinanderfolge der erlernten Antizipierbarkeiten, eine hierarchische Strukturierung erfahren kann (Abb. 6).

Unsere Überlegungen zum Aufbau von "Antizipationshierarchien" zur Steuerung sequentiellen Verhaltens sind mit den diskutierten Eigenschaften sequentieller Strukturbildung prinzipiell vereinbar: Die Strukturbildung beginnt mit der Zusammenfassung benachbarter Einheiten in Abhängigkeit von ihrer kontingenten Wiederholung im Sinne der Bildung von lokalen chunks, die wiederum zu größeren Einheiten zusammengefaßt werden können. Die Ereignisse werden jedoch nicht passiv, sondern insofern aktiv verbunden, als sie als durch eigenes Verhalten bewirkte Situationsveränderungen repräsentiert werden. Die Spezifik der Relation zwischen benachbarten Ereignissen wird somit durch die Art des verändernden Verhaltensaktes bestimmt. Die die Ereignissequenz im ganzen erzeugende Verhaltenssequenz repräsentiert damit eine Organisationsstruktur, die insofern abstrakt ist, als sie auf andere Ereignisfolgen übertragbar ist, solange diese die Anwendung derselben Verhaltensakte gestatten. Schließlich liefert der Ansatz auch einen Zugang zum

Verständnis des Zusammenhanges zwischen der Strukturierung von Verhaltens- und von Ereignissequenzen: Beide Strukturierungen müssen parallel erfolgen, wenn Ereignisse durch die Antizipierbarkeit ihrer aktiven Veränderbarkeit und Verhaltensakte durch die Antizipierbarkeit der mit ihrer Ausführung einhergehenden Änderungen verbunden werden.

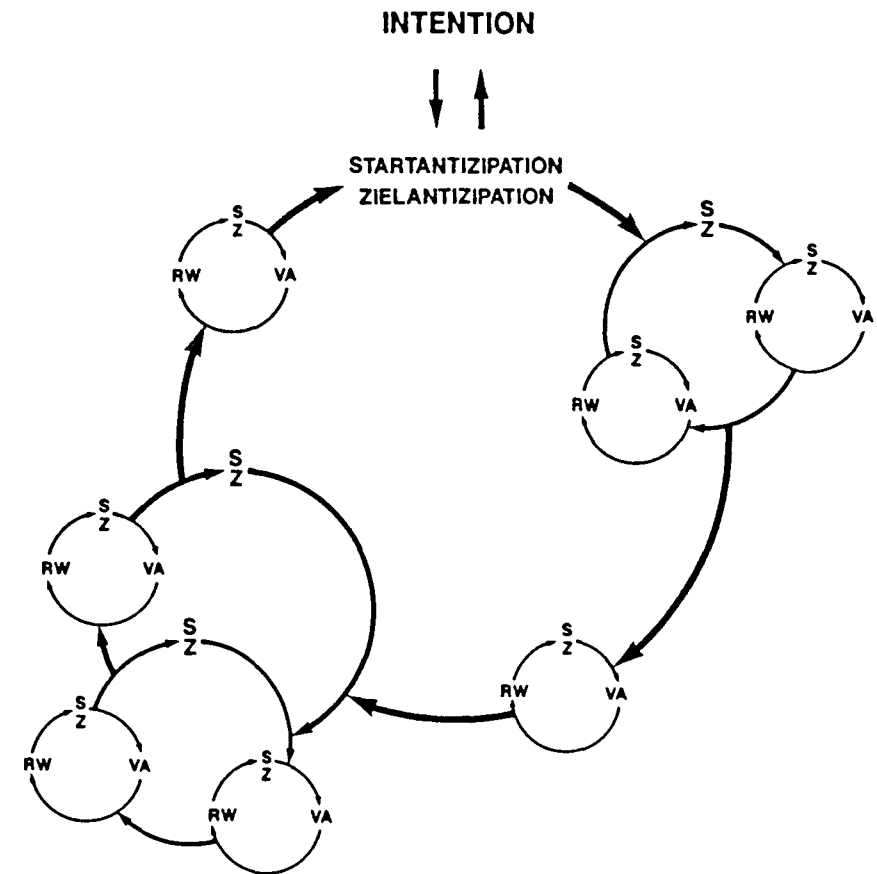


Abb. 6: Eine mögliche hierarchische Organisation der antizipativen Kontrolle einer Verhaltenssequenz

9. Epilog

Ich will zum Abschluß die Beziehungen dieser spekulativen Überlegungen über eine antizipative Verhaltenssteuerung zur Frage der Automatisierung und der damit verbundenen Selektivität der Reizverarbeitung wenigstens anzudeuten versuchen: Nach den vorgestellten Überlegungen ist Automatisierung das Resultat eines ursprünglichen Strebens nach einer zuverlässigen Kontrolle von Verhaltenskonsequenzen durch deren Antizipation. Dieses Streben kann nur dort erfolgreich sein, wo unter weitgehend gleichbleibenden Bedingungen häufig genug Verhaltenserfahrungen gemacht werden, wo also tatsächlich Invarianten abstrahiert werden können, unter denen ein bestimmtes Verhalten zu immer denselben (invarianten) Konsequenzen führt. Eben solche Bedingungen sind bspw. beim Treppensteigen, beim Schnürsenkel binden, beim Schreibmaschineschreiben, beim Auto fahren und nicht zuletzt in vielen Sportarten gegeben, also gerade dort, wo wir automatisiertes Verhalten beobachten können. Dort, wo keine solchen eindeutigen Invarianten existieren, können sich Automatismen nicht ausbilden.

Nach diesen Überlegungen sind Automatismen nicht Verhaltensakte, die keine Ressourcen beanspruchen, sondern Verhaltensakte, für die die Reizbedingungen, die ihre erfolgreiche Ausführung invariant begleiten, vollständig antizipiert sind. Automatismen sind damit nicht nur "nicht-selektiv", sondern im Gegenteil außerordentlich selektiv: Sie sind mit einer hochspezifischen Bereitschaft zur "Wahrnehmung" der jeweils antizipierten Auslösebedingungen und Konsequenzen des jeweils intendierten Verhaltens verbunden. Gerade wegen dieser spezifischen Selektivität ist automatisiertes Verhalten so wenig durch andere Reizeinflüsse stöbar, solange diese sich hinreichend von den antizipierten Reizbedingungen unterscheiden, so wie auch umgekehrt wegen dieser Selektivität, die für ein intendiertes Verhalten antizipierten Auslösebedingungen auch dann Einfluß auf das Verhalten gewinnen, wenn sie ignoriert werden sollen. Die im Kontext der Ressourcentheorien widersprüchlichen Befunde lassen sich hier also widerspruchsfrei integrieren.

Die Selektivität der Reizverarbeitung ist nach unseren Überlegungen die zwangsläufige Konsequenz einer antizipativen Verhaltenssteuerung: Es werden diejenigen Reize bevorzugt verarbeitet, deren Wirkungen antizipiert worden sind, und dies deshalb, weil sie auf Zustände treffen, die ihre Wirkungen bereits teilweise vorweggenommen haben. Die Selektion erfolgt danach nicht als ein besonderer Vorgang im Verlaufe der Reizverarbeitung, sondern bereits vor der Reizwirkung als deren Antizipation. Und indem das Verhalten durch eine Antizipation verhaltensbegleitender Invarianten gesteuert wird, wird zugleich gesichert, daß von der Vielfalt der gegebenen Reizwirkungen diejenigen bevorzugt Einfluß auf die Verhaltensausführung gewinnen, die erfahrungsgemäß seinen Erfolg sichern. Die

biologische Zweckmäßigkeit dieses Zusammenhanges liegt auf der Hand (vgl. NEUMANN 1987, 1990; ALLPORT 1987; PRINZ 1983).

Unsere Überlegungen beziehen sich auf die Steuerung intentionalen Verhaltens. Die antizipative Steuerung ist also an Verhalten gebunden, das willentlich realisiert wird und zielgerichtet ist. Die Antizipation ist ein aktiver Mechanismus der Verhaltenssteuerung. Damit wird auch eingeräumt, daß er abhängig von Verhaltensstrategien, von Prozessen der Verhaltensplanung, sein kann. Vermutlich liegt hier der Schnittpunkt zwischen der bereits einleitend unterschiedenen willkürlichen und unwillkürlichen Aufmerksamkeit: Die unwillkürliche Aufmerksamkeit ist nach unseren Überlegungen mit der erfahrungsabhängigen Bevorzugung verhaltensrelevanter Reize verbunden, die sich in der antizipativen Kontrolle des Verhaltens zwangsläufig vollzieht. Die antrainierte zwangsläufige Kontrolle kann jedoch durch eine willkürliche Akzentuierung beliebiger Aspekte des Handlungsablaufes ergänzt werden. Solche willkürlichen Akzentuierungen werden insbesondere dann notwendig sein, wenn noch keine ausreichenden Handlungserfahrungen vorliegen, um zuverlässige Antizipationen machen zu können. Welche Reize dabei durch Selbst- oder Fremdinstruktion akzentuiert werden, beeinflußt die sensorischen Erfahrungen, die mit der Verhaltensausführung gemacht werden. Ob diese für den Aufbau einer sicheren antizipativen Verhaltenssteuerung günstig sind, hängt davon ab, inwieweit die willkürliche Aufmerksamkeit Reizaspekten gilt, die erfolgreiches Verhalten tatsächlich invariant begleiten.

Die Diskussion zeigt, daß mit dem Gegensatz von willkürlicher und unwillkürlicher Aufmerksamkeit die notwendige Unterscheidung nur ungenau getroffen wird. Die "unwillkürliche" Selektivität der Wahrnehmung im Resultat antizipativer Verhaltenssteuerung ist insofern ebenso willkürlich wie die willkürlich instruierte Beachtung bestimmter Reize, als sie an die Intention, ein bestimmtes Verhalten zielgerichtet in Gang zu setzen, gebunden ist. Bereits WUNDT hat auf diese terminologischen Schwierigkeiten aufmerksam gemacht: "Weiterhin muss aber auch die Apperception als der primitive Willensact angesehen werden, der bei den äußeren Willenshandlungen stets vorausgesetzt wird. Denn die Bedingung für die Ausführung einer Willensbewegung ist die Apperception der Vorstellung dieser Bewegung" (WUNDT 1893, 278). Man unterscheidet anstelle von willkürlicher und unwillkürlicher vielleicht besser zwischen einer trainiertes Verhalten zwangsläufig begleitenden und einer instruierten Aufmerksamkeit.

Die hier entwickelten Überlegungen sind noch wenig ausgearbeitet. Sie befinden sich, folgt man der Einteilung von MARR (1982), auf dem "computational level", d.h. sie spezifizieren lediglich, welche Zusammenhänge aufgrund welcher Informationen wie verändert werden müssen, um die interessierenden lernabhängigen Strukturbildungen

hervorzubringen. Der nächste Schritt muß in einer algorithmischen Präzisierung dieser Vorgänge liegen. Die dafür noch zu lösenden Fragen lassen sich leicht absehen: Welche verhaltensgebundenen Reizänderungen sollen betrachtet werden, nur exterozeptive oder auch propriozeptive Änderungen? Werden in jedem Lernschritt alle Reizänderungen gleichermaßen berücksichtigt, oder soll es eine wechselnde Beachtung verschiedener Reize geben? Was ist ein elementarer Verhaltensakt? Werden nur die unmittelbaren Konsequenzen eines Verhaltensaktes antizipiert oder auch entferntere? Wie genau wird zwischen antizipierten und eintretenden Reizänderungen verglichen und von welchen Faktoren ist die Genauigkeit dieses Vergleiches abhängig? Nach welchen Kriterien wird eine Differenzierung der gegebenen Situation vorgenommen, wenn die Antizipationen unzutreffend sind usw.?

Die Vielfalt der noch zu beantwortenden Fragen macht deutlich, daß unsere Überlegungen zu einer antizipativen Verhaltenssteuerung zunächst nur einen Rahmen anbieten, der die verschiedenen Beobachtungen in einer einheitlichen Perspektive zu betrachten gestattet. Es sollte aber möglich sein, in diesem Rahmen Modellvorstellungen zu entwickeln und zu testen, die die vorliegenden Beobachtungen vollständiger zu erklären in der Lage sind, als dies gegenwärtig noch gelingt. Für solche Modellentwicklungen bieten die erwähnten rekurrenten Netzwerke den gegenwärtig m.E. erfolgversprechendsten Ansatzpunkt. Nicht nur, weil in ihnen bereits das Prinzip des Lernens an nicht bestätigten Antizipationen (GLUCK & BOWER 1988; RESCORLA 1988) realisiert ist, sondern vor allem, weil sie die Möglichkeit bieten, das Erlernen der verhaltensabhängigen Erzeugung von Ereignissequenzen mit dem Erlernen ihrer Struktur zu verbinden.

Literatur

- ALLEN R.B. (1988) Connectionist state machines. Report ARA. Morristown: Bellcore, 88-300.
- ALLPORT A. (1987) Selection for action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. In: H. HEUER & A.F. SANDERS (Hrsg.) Perspectives on perception and action. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 395-420.
- ALLPORT A., D. ANTONIS & P. REYNOLDS (1972) On the division of attention: A disproof of the single channel hypothesis. Quarterly Journal of Experimental Psychology 24: 225-235.
- BROADBENT D.E. (1958) Perception and communication. Oxford: Pergamon Press.
- BROADBENT D.E. (1982) Task combination and the selective intake of information. Acta Psychologica 50: 253-290.
- CLEEREMANS A. & J.L. McCLELLAND (1991) Learning the structure of event sequences. Journal of Experimental Psychology: General 120: 235-253.
- COHEN A., R.I. IVRY & S.W. KEELE (1990) Attention and structure in sequence learning. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 16: 17-30.

- DEUTSCH J.A. & D. DEUTSCH (1963) Attention: Some theoretical considerations. Psychological Review 70: 80-90.
- EASTON T.A. (1978) Coordinative structures - the basis of a motor program. In: D.M. LANDERS & R.W. CHRISTINAS (Hrsg.) Psychology of motor behavior and sport. Champaign: Human Kinetics, 63-81.
- ELMAN J.L. (1990) Finding structure in time. Cognitive Science 14: 179-211.
- ESTES W.K. (1950) Toward a statistical theory of learning. Psychological Review 57: 94-107.
- GIBSON J.J. (1979) The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton.
- GLUCK M.A. & G.H. BOWER (1988) From conditioning to category learning: An adaptive network model. Journal of Experimental Psychology, General 117: 227-247.
- HEIN A. & R. HELD (1962) A neural model for labile sensorimotor coordination. In: E.E. BERNARD & M.R. KARE (Hrsg.) Biological prototypes and synthetic systems. New York: Plenum Press, 71-74.
- HOFFMANN J. (1990) Über die Integration von Wissen in die Verhaltenssteuerung. Schweizerische Zeitschrift für Psychologie 49: 250-265.
- HOFFMANN J. (im Druck a) Unbewusstes Lernen - eine besondere Lernform? Psychologische Rundschau.
- HOFFMANN J. (im Druck b) Konzentration durch Antizipation. In: J. BECKMANN, H. STRANG & E. HAHN (Hrsg.) Konzentration und Leistung. Göttingen: Hogrefe.
- HOFFMANN J. (im Druck c) Visual recognition of objects. In: W. PRINZ & B. BRIDGEMAN (Hrsg.) Handbook of Perception and Action. Vol. I.
- HOFFMANN J. (in Vorbereitung) Vorhersage und Erkenntnis.
- HOLST E. von & H. MITTELSTAEDT (1950) Das Reafferenzprinzip. Naturwissenschaften 37: 464-476.
- HUMPHREYS G.W. (1985) Attention, automaticity, and autonomy in visual word processing. In: D. BESNER, T.G. WALLER & G.E. MCKINNON (Hrsg.) Reading research: Advances in theory and practice. Bd. 5. New York: Academic Press, 253-310.
- JAMES W. (1981) The principles of psychology (Bd. II). Cambridge: Harvard University Press (orig. 1890).
- JOHNSTON W.A. & S.P. HEINZ (1978) Flexibility and capacity demands of attention. Journal of Experimental Psychology: General 107: 420-435.
- JOHNSTON W.A. & S.P. HEINZ (1979) Depth and nontarget processing in an attention task. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 5: 168-175.
- JORDAN M.I. (1986) Serial order: A parallel distributed processing approach. Report 8604. La Jolla: Institute for Cognitive Science.
- KAHNEMAN D. (1973) Attention and effort. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- KAHNEMAN D. & A.M. TREISMAN (1984) Changing views of attention and automaticity. In: R. PARASURANAN & D.R. DAVIES (Hrsg.) Varieties of attention. New York: Academic Press, 29-62.
- LOGAN G.D. (1988) Toward an instance theory of automatization. Psychological Review 95: 492-527.
- LOGAN G.D. (1990) Repetition priming and automaticity: Common underlying mechanisms? Cognitive Psychology 22: 1-35.

- MANZEY D. (1988) Determinanten der Aufgabeninterferenz bei Doppeltätigkeiten und ressourcentheoretische Modellvorstellungen in der kognitiven Psychologie. Hamburg: DFVLR.
- MARR D. (1982) Vision. A computational investigation into the human representation and processing of visual information. San Francisco: W.H. Freeman.
- MILLER G. (1958) Free recall of redundant strings of letters. *Journal of Experimental Psychology* 56: 485-491.
- MOZER M.C. (1991) Connectionist music composition based on melodic, stylistic, and psychophysical constraints. Technical Report. Boulder, CO: Department of Computer Science and Institute of Cognitive Science.
- MÜNSTERBERG H. (1889) Beiträge zur Experimentalpsychologie. Heft 1. Freiburg i.Br.: J.C.B. Mohr.
- NAVON D. (1989) Attentional selection: early, late, or neither? *European Journal of Cognitive Psychology* 1: 47-68.
- NEISSER U. (1967) *Cognitive psychology*. New York: Appleton.
- NEISSER U. (1976) *Cognition and Reality*. San Francisco: W.H. Freeman.
- NEUMANN O. (1984) Automatic processing: A review of recent findings and a plea for an old theory. In: W. PRINZ & A.F. SANDERS (Hrsg.) *Cognition and motor processes*. Berlin - Heidelberg - New York: Springer, 255-294.
- NEUMANN O. (1987) Zur Funktion der selektiven Aufmerksamkeit für die Handlungssteuerung. *Sprache & Kognition* 6: 107-125.
- NEUMANN O. (1989) On the origin and status of the concept of automatic processing. *Zeitschrift für Psychologie* 197: 411-428.
- NEUMANN O. (1990) Visual attention and action. In: O. NEUMANN & W. PRINZ (Hrsg.) *Relationships between perception and action*. Berlin - Heidelberg - New York: Springer, 227-268.
- NEUMANN O. (1992) Theorien der Aufmerksamkeit: von Metaphern zu Mechanismen. *Psychologische Rundschau* 43: 69-82.
- NEWELL A. & P.S. ROSENBLOOM (1981) Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In J.R. ANDERSON (Hrsg.) *Cognitive skills and their acquisition*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1-56.
- NORMAN D.A. & D.G. BOBROW (1975) On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology* 7: 44-64.
- NORMAN D.A. & D.G. BOBROW (1976) On the analysis of performance operating characteristics. *Psychological Review* 83: 508-510.
- PEW R.W. (1974) Human perceptual motor performance. In: B.H. KANTOWITZ (Hrsg.) *Human information processing: Tutorials in performance and cognition*. Hillsdale: Erlbaum, 1-39.
- POSNER M.I. & C.R.R. SNYDER (1975) Facilitation and inhibition in the processing of signals. In: P.M.A. RABBITT & S. DORNIC (Hrsg.) *Attention and performance*. Vol. 5. New York: Academic Press, 669-682.
- PRINZ W. (1983) *Wahrnehmung und Tätigkeitssteuerung*. Berlin: Springer.
- REBER A.S. (1967) Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 6: 855-863.
- REBER A.S. (1989) Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General* 118: 219-235.
- RESCORLA R.A. (1988) Pavlovian conditioning, it's not what you think it is. *American Psychologist* 43: 151-160.
- RESTLE F. (1970) Theory of serial pattern learning: Structural trees. *Psychological Review* 77: 481-495.
- RESTLE F. (1976) Structural ambiguity in serial pattern learning. *Cognitive Psychology* 8: 357-381.
- RESTLE F. & E.R. BROWN (1970a) Organization of serial pattern learning. In: G. BOWER (Hrsg.) *Psychology of learning and motivation*. New York: Academic Press, 249-332.
- RESTLE F. & E.R. BROWN (1970b) Serial pattern learning. *Journal of Experimental Psychology* 83: 120-125.
- ROSENBAUM D.A. (1985) Motor programming: A review and scheduling theory. In: H. HEUER, U. KLEINBECK & K.H. SCHMIDT (Hrsg.) *Motor behavior, programming, control, and acquisition*. Berlin - Heidelberg - New York: Springer, 1-33.
- ROSENBAUM D.A., V. HINDORFF & E.M. MUNRO (1987) Scheduling and programming of rapid finger sequences: Test and elaboration of the hierarchical editor model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 13: 193-203.
- ROSENBAUM D.A., A.W. INHOFF & A.M. GORDON (1984) Choosing between movement sequences: A hierarchical editor model. *Journal of Experimental Psychology: General* 113: 372-393.
- ROSENBAUM D.A., S.B. KENNY & M.A. DERR (1983) Hierarchical control of rapid movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 9: 86-102.
- SCHNEIDER W., S.T. DUMAIS & R.W. SHIFFRIN (1984) Automatic and control processing and attention. In: R. PARASURAMAN & D.R. DAVIES (Hrsg.) *Varieties of attention*. New York: Academic Press, 1-28.
- SERVAN-SCHREIBER E. & J.R. ANDERSON (1990) Learning artificial grammars with competitive chunking. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 16: 592-608.
- SHAFFER L.H. (1982) Rhythm and timing in skill. *Psychological Review* 89: 109-122.
- SHANNON C.E. & W. WEAVER (1949) *The mathematical theory of communication*. Urbana: The University of Illinois Press.
- SHIFFRIN R.W. & W. SCHNEIDER (1977) Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review* 84: 127-190.
- SMITH A.W. & D. ZIPSER (1989) Encoding sequential structure: Experience with the real-time recurrent learning algorithm. Report. La Jolla: Institute for Cognitive Science.
- STADLER M.A. (1989) On learning complex procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 15: 1061-1069.
- TURVEY M.T. (1977) Preliminaries to a theory of action with reference to vision. In R. SHAW & J. BRANSFORD (Hrsg.) *Perceiving, acting, and knowing. Toward an ecological psychology*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 211-265.
- TURVEY M.T. (1990) Coordination. *American Psychologist* 45: 938-953.
- VIVIANI P. (1986) Do units of motor action really exist? In H. HEUER & C. FROMM (Hrsg.) *Generation and modulation of action patterns*. Berlin: Springer, 201-216.

- VIVIANI P. & C. TERZUOLO (1980) Space-time invariance in learned motor skills. In G.E. STELMACH & J. REQUIN (Hrsg.) *Tutorials in motor behavior*. Amsterdam: North-Holland, 525-533.
- WIDROW G. & M.E. HOFF (1960) Adaptive switching circuits. *Convention record Institute of Radio Engineers, Western Electronic Show and Convention 4*: 96-194.
- WILLINGHAM D.B., M.J. NISSEN & P. BULLEMER (1989) On the development of procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 15*: 1047-1060.
- WUNDT W. (1893) *Grundzüge der Physiologischen Psychologie*. Band II. Leipzig: W. Engelmann.