

## Funktionelle Strukturierung und Arbeitsprinzipien im sensomotorischen System

### Zusammenfassung

Aus einem einfachen Rezeptor - Effektormodell wird durch schrittweise Erweiterung ein Modell des menschlichen Zentralnervensystems entwickelt. Die Mechanismen der Planung und Steuerung von Willkürbewegungen werden als Weiterentwicklung des einfachen Modells dargestellt.

Als ein wesentliches Funktionsprinzip wird zunächst das Prinzip der assoziativen Speicher (bzw. des ass. Gedächtnisses) beschrieben. Es beruht auf dem HEBB'schen Modell der variablen Synapsen und ermöglicht es, in einer gleichbleibenden Zahl von Speicherelementen (Neuronen) eine fast unbegrenzte Zahl von Abbildungen (Mustern) zu speichern und auch wieder auszulesen. Darüberhinaus ist das Ergänzen von Mustern möglich, sodaß dieses Modell in der Wahrnehmung eine bedeutende Rolle spielt.

Weiters wird das Prinzip der dissipativen Strukturen dargestellt, mit dem vor allem die Herstellung und Verfeinerung von Innervationsmustern erklärt werden kann. Das Ausführen eines einfachen Innervationsmusters durch eine Bewegung führt nicht zu einem Ruhezustand, sondern erzeugt vielmehr durch die erfolgreichen Reafferenzen zusätzliche Reaktionen, die bei häufiger gemeinsamer Anwendung in das Programm integriert werden können (Erzeugung von Feinkoordination).

Die hier beschriebenen Funktionsprinzipien tragen u.a. dazu bei, daß Zufuhr von Information - über Zwischenschritte - Strukturen verschiedenster Ebenen erzeugt (Innervationsmuster, aber auch materielle Strukturen wie Leitungsbahnen).

### Abstract: Functional Structuring and Working Principles of the Sensory-Motor System

Starting with a simple receptor-effector model, a model of the human central nervous system is developed in sequence. The author describes the mechanisms of designing and steering arbitrary movement.

As an important functional mechanism first the mechanism of associative storage (associative Memory) is discussed. It's founded on HEBB's Model of variable Synapses that realises to store nearly an unlimited amount of representations (structures) and allows the recall of these representations too. The amount of storage elements (neurons) remains constantly. In addition the supplementation of structures is possible. In that way the model is an important factor in perception.

Further the principle of dissipative structures is described. By this way the realisation and refinement of innervation-structures can be explained. The realisation of a simple innervation-structure by a movement doesn't lead to a state of rest. Rather it generates additional reactions because of the reafferences. If these accompany the reaction several times they may be included into the program. This leads to fine coordination.

A supply of information leads to structures (step by step) on different levels (innovation structures and structures based on material substance too, for example nerve fibres) by the described functional principles.

Um die vielfältigen Möglichkeiten eines komplexen Systems auch nur halbwegs nutzen zu können, muß ein zunehmendes Verständnis der wesentlichen Funktionsprinzipien erworben werden. Dies gilt in besonderem Maß auch für die Nutzung des Potentials des

sogenannten sensomotorischen Systems für das Erlernen und Verbessern sportlicher Bewegungsabläufe.

## 0. Allgemeine Überlegungen zum Problem "Bewegung"

Bewegung ist eine Art des Verhaltens des Individuums, die durch die Motorik ausgeführt wird. Sie ist dabei die einzige sichtbare Äußerung des Individuums: Alle Manipulationen, Lokomotionen, aber auch Formen der Ausdrucksübermittlung wie Körpersprache, Mimik, Gestik und höhere Formen wie Pantomime und Tanz bedienen sich ebenso der Motorik wie Formen der kulturellen Kommunikation (Sprache, Singen, Musizieren, Schrift, Malerei).

Bewegung ist die motorische Reaktion (eines Individuums) auf eine Veränderung in der Umgebung. Daraus ist bereits der unmittelbare Zusammenhang zwischen einem Auslöser ("Reiz") und einer Folgeaktion ("Reaktion") implizit angesprochen. Als Umgebung ist dabei alles zu betrachten, was nicht unmittelbar zum efferenten motorischen Anteil des Systems gehört. Damit sind sowohl Reaktionen auf äußere als auch auf innere Reize (z.B. aus dem autonomen Nervensystem) unter dem Reiz-Reaktionsmodell subsummiert.

Es ist daher zu untersuchen, ob der Weg von der einfachen, elementaren Reaktion auf ein einfaches Signal bis zur komplexen Willkürbewegung auf dem Hintergrund dieser einfachen Mechanismen möglich und praktikabel ist.

In originärer Form dient Bewegung nicht der Produktion irgendwelcher belangloser Fertigkeiten, sondern ist ausschließlich dem Hauptziel "Überleben" untergeordnet:

Phylogenetisch dient Bewegung primär der Erhaltung des Individuums und der Art durch Kategorien wie "Flucht" (Erhaltung der Integrität des Individuums) und "Zuwendung" (Nahrungsaufnahme zur Erhaltung des Individuums, Partnersuche und Fortpflanzung zur Erhaltung der Art) sowie der Gesamtstabilität des Individuums (z.B. Gleichgewichtserhaltung, aber auch Schmerzabwehr oder -reaktion). Damit ergeben sich als Hauptaufgabenstellung:

- Überleben des Individuums
- durch Vermeiden von Gefahrensituationen
- durch Nahrungsaufnahme
- Überleben der Art
- durch Fortpflanzung
- Weitergabe erfolgreicher Verhaltensweisen auf der Basis des Erhalts der Stabilität und Integrität des Individuums.

Aus dem Zusammenhang zwischen Reiz und Reaktion ergibt sich auch die sinnvolle Bezeichnung "sensomotorisches System": Sinnesorgane (Sensorium) als Indikatoren für die Veränderung der Umgebung, ausführende Organe (Motorik) als Veränderer der Umgebung.

### Schrittweiser Aufbau des Gesamtsystems

Die komplexe Vernetzung des sensomotorischen Systems ergibt theoretisch viele Möglichkeiten der funktionellen Interpretation. Erschwerend kommt noch hinzu, daß zwar Leitungsbahnen definiert werden können, aber der Inhalt - die Semantik - einer Informationsübermittlung durch die Kodierung aller Informationen in elektrische Impulse einheitlicher Syntax nicht identifiziert werden kann.

Es soll nun versucht werden, schrittweise ein einfaches sensomotorisches System nach den oben angegebenen Aufgabenstellungen aufzubauen und zu immer höherem Niveau zu entwickeln.

## 1. Das sensomotorische System

### 1.1. Elementare Funktionseinheiten

Im Sinne der Aussage, das sensomotorische System (re)agiere primär als lebenserhaltendes System, muß man in einem elementaren System eine direkte Verbindung Rezeptor - Ausführungsorgan annehmen. Derartige Verbindungen sind bei niederen Lebewesen sehr wohl zu beobachten, beim Menschen aber in ein komplexes System integriert. Eine elementare Funktionseinheit muß daher mindestens aus folgenden Elementen bestehen:

- Grundausstattung des efferenten Systems
  - ein Aktivierungssystem für den Muskel (Effektororgan)
  - ein Mechanismus zur Einstellung der Kontraktionsstärke
  - ein Mechanismus zur Begrenzung der Spannung in physiologischen Grenzen
- Grundausstattung eines afferenten Systems
  - Rezeptoren (besser: Rezeptorfelder), die auf Reize der jeweiligen Sinnesqualität reagieren
  - Leitungsbahnen, die die Verbindung zwischen den beiden Teilen herstellen.

Da Lebewesen zwar über viele Rezeptorsysteme, aber nur über ein effektorisches Inventar verfügen, muß jede afferente - efferente Verbindung dieselbe Menge efferenter Systemelemente nutzen. Die Funktionseinheiten werden sich aber hinsichtlich der Verbindung ("Übertragungsfunktion") zwischen den beiden Systemteilen unterscheiden. Allgemein gilt daher: Alle afferenten Systeme (Rezeptorfelder) projizieren auf das Feld der Gesamtheit der efferent - motorischen Elemente.

Diese strikte Aussage mag vielleicht zunächst verwundern, ist aber doch streng logisch: Da die Motorik das einzige nach außen wirksame System (der Lebewesen) ist, muß sie auch zur Erfüllung der gestellten Hauptaufgaben herangezogen werden. Damit müssen Afferenzen aus Rezeptoren in der Motorik wirksam werden: Das Nahen eines existenzbedrohenden Lebewesens muß ebenso mit einer motorischen Antwort (=Flucht) beantwortet werden wie der Verlust des Gleichgewichts (Gegenreaktion zu dessen Wiederherstellung).

### 1.1.1. Anatomische Lokalisierung beim Menschen

Das gesamte efferent - motorische Inventar ist beim Menschen in der Wirbelsäule (für die Skelettmuskulatur) und dem Hirnstamm (für die motorischen Anteile der Hirnnerven) angesiedelt, sodaß wir hier jenen Bereich anzunehmen haben, in dem die afferenten Systemteile ihre unmittelbare motorische Reaktion erzeugen.

Eines der Hauptprobleme der menschlichen Motorik ist - im Unterschied zu den meisten anderen Lebewesen - die Aufgabe der permanenten Erhaltung bzw. Wiederherstellung des Gleichgewichts im Stand und in Aktion, wobei ein maximal zweibeiniger Stand, erschwert durch eine sehr hohe Schwerpunktage, als gegeben zu betrachten ist. Diese Situation zwingt zu einer Form der dynamischen (im Unterschied zu einer statischen) Stabilität, die über die entgegengesetzte Wirkung zweier sensorischer Teilsysteme auf das motorische Grundinventar erreicht wird.

Dementsprechend sind auch Reaktionssysteme im Körper zu orten und zuzuordnen: Vorgänger der "Gesamtkörperflucht" - und damit oft Auslöser von Instabilität - ist das Zurückziehen von Extremitäten:

*Das Auftreten eines nozizeptiven Reiz(feldes) an der Peripherie aktiviert die korrespondierenden Flexoren(felder). Dieses System wird als Fremdreflex(system) bezeichnet. Die Leitung der Impulse erfolgt über den fasciculus proprius (Eigenapparat der corda spinalis).*

Der Verlust des Gleichgewichts wird über das Vestibularsystem angezeigt. Dieses besteht aus drei Rezeptorfeldern, und zwar jeweils für

- Drehbeschleunigungen
- Linearbeschleunigungen
- propriozeptive Informationen.

Diese Afferenzen wirken - nach Verschaltung - auf die Extensoren, und zwar über die primären Outputsysteme des tr. vestibulo - spinalis medialis und lateralis.

Diese beiden Systeme kann man sich durchaus in permanenter Wechselwirkung vorstellen: Betrifft das Zurückziehen z.B. die unteren Extremitäten und überschreitet dabei einen bestimmten Grenzwert, hat dies unweigerlich den Verlust der Stabilität zur Folge. Die Informationen aus den entsprechenden Rezeptoren (maculae staticae und Propriozeptoren) erzeugen eine kompensatorische motorische Reaktion durch Innervation der korrespondierenden (antagonistischen) Extensoren und stellen damit das Gleichgewicht wieder her.

### 1.1.2. Die segmentale Schaltplatte

Beide Systeme projizieren auf die segmentalen Schaltplatten bzw. ihre Entsprechungen in den motorischen Hirnnervenanteilen. Die "segmentale Schaltplatte" ist dabei eine vereinfachte Abstraktion des Rückenmarksegmentes.

Als zu einem Segment gehörig werden jene Nervenfasern bezeichnet, die nach dem jeweiligen Wirbelkörper Ausgang zur Peripherie finden bzw. von dort kommend ins Rückenmark eintreten (Ausnahme: C1 "entspringt" zwischen Schädelknochen und Atlas, also vor dem ersten Halswirbel). Das Rückenmark ist daher nicht als Ansammlung abgegrenzter Scheiben, sondern als durchgehende Säule anzusehen, die durch die Zuordnung der

Neuriten zu Aus- und Eintrittsöffnungen den theoretischen Charakter von Scheiben erhält.

Trennt man zunächst alle nicht zum Segment gehörigen Elemente - wie lange zentrale Bahnen, Verbindungen zwischen den Segmenten, aber auch nozizeptive/protopathische Afferenzen ab, so bleibt eine Ansammlung von Regelkreisen übrig, die jeweils mit einer motorischen Einheit eines Muskels zusammenhängen: Die alpha und gamma - Motoneuronen regeln über das Spindelsystem Kontraktionsstärke und Muskellänge, über hemmende Neurone vom RENSCHAW - Typ begrenzen Afferenzen der GOLGI - Sehnenrezeptoren sowie die sog. rekurrente Hemmung die Muskelspannung. Die Motoneuronen sind dabei im Vorderhorn somatotrop angeordnet - für die proximale Muskulatur am medialen, die distale am lateralen Rand, die der Flexoren mehr dem Zentrum zu, die der Extensoren davor.

## 1.2. Erweiterung und Verallgemeinerung

Wir haben nun ein Modell entwickelt, bei dem zwei Sinnessysteme auf das motorische Inventar projizieren. Die genannten Systeme sind jedoch nur in grober Näherung als einheitlich zu betrachten: Der sogenannte Hautsinn verfügt mindestens über sechs Rezeptortypen, die jeweils für eine eigene Qualität zuständig sind. Zusätzliche Qualitäten entstehen durch die Kombination ihrer Afferenzen: z.B. dumpfer, großflächiger Druck, Stich, Kratzen etc.

Auch das Vestibularsystem setzt sich - wie beschrieben - aus drei Teilsystemen zusammen, wobei wir in der Reaktion Primäntworten - jeweils auf Afferenzen aus einem Teilsystem - und integrierten Antworten - aus mehreren Teilsystemen - unterscheiden können.

Dieses Modell kann verallgemeinert und erweitert werden, indem man für jede Sinnesmodalität einen eigenen Rezeptor annimmt, der über eine Übertragungsfunktion mit dem Ausführungsteil verbunden ist. Die Anzahl der Detektoren kann dabei beliebig hoch angesetzt werden: Jedes bekannte Sinnessystem setzt sich aus mehreren Teilsystemen zusammen, die wieder aus Gruppierungen von Elementen zusammengesetzt sind. So werden visuelle Sinneswahrnehmungen aus mindestens drei Teilsystemen - Form, Farbe und Bewegung - kombiniert, für das Geruchssystem gilt das Schloß - Schlüsselmodell als wahrscheinlich. Dabei entspricht jedem spezifischen Geruch ein Modell, das mit dem jeweiligen Duftstoffmolekül eine Verbindung eingeht, und damit ein Signal auslöst.

Im Verlauf eines Lernprozesses entstehen aus kombinierten Afferenzen Muster "höherer Ordnung", die wieder als Auslöser von motorischen Reaktionen (höherer Ordnung) betrachtet werden können.

Es sei hier nur an eine derartige komplexe Reize - Reaktionsfolge erinnert: Läutet das Telefon, geht man hin und meldet sich. Ein "Verarbeitungsvorgang", der zu einer deutlich sichtbaren Reaktionsverzögerung führen würde, ist dabei nicht zu beobachten: Es wurde gelernt, auf ein spezifisches Signal in einer bestimmten Form zu reagieren. Er tritt allerdings dann auf, wenn sich jemand entschließt, nicht abzuheben - hierzu ist eine eigene "Anstrengung" zur Hemmung des bereits vorhandenen gekoppelten Ablaufes notwendig!

Bei Muskeln, die über Gelenke verlaufen und daher gedehnt werden können, tritt der sogenannte Eigenreflex auf: Die bei der Dehnung auftretenden Afferenzen aus den Spindelrezeptoren aktivieren die alpha - Motoneuronen, die im Muskel eine adäquate Spannung entwickeln. Dieses System wurde lange Zeit als Startersystem der Muskelkontrak-

tion angesehen. VALLBO (1973, ref. bei ECCLES, 1990) zeigte jedoch, daß aufgrund der unterschiedlichen Leitungsgeschwindigkeiten nur eine Regelung des Tonus im Sinne einer Anpassung (z.B. an einen Sollwert) erfolgen kann.

Ein weiterer Mechanismus sichert auf Segmentebene die gegenseitige gleichzeitige Hemmung der Antagonisten. Darüberhinaus werden auch feste kontralaterale Verbindungen angenommen, sodaß bereits auf Segmentebene eine Koordination sowohl der Beuger und Strecker als auch beider Seiten möglich ist.

Zusätzlich erfolgt auf der Segmentebene eine Integration von vegetativen/autonomen Afferenzen so, daß motorische Reaktionen durch die jeweilige Muskulatur im Segment erfolgen können (z.B. Krümmen des Rumpfes bei Leibscherzen).

Denken wir uns nun alle segmentalen Schaltapparate übereinander aufgestapelt, dazu noch "nach oben" verlängert um die Schalterbereiche der motorischen Anteile der Hirnrinde, so haben wir damit das gesamte elementare Inventar aufgelistet. Es weist - immer noch ohne das Segment übergreifende Einflüsse - ein hohes Maß an Stabilität bzw. Regulierungsfähigkeit auf. Alle Bewegungen sind auf die Elemente dieses Systems zurückzuführen.

Es bietet sich hier eine starke Analogie zu Computertchips mit vorgefertigten, festen Schaltkreisen an, die je nach Bedarf entsprechend genutzt werden.

Aber nicht nur innerhalb der Sinnesmodalitäten entstehen durch Lernvorgänge Muster, sondern auch durch die Festigung von Verbindungen zwischen einzelnen Modalitäten. Damit läßt sich der Mechanismus des PAW-LOW'schen Konditionierens als erlernter Austausch der Auslöser relativ einfach erklären.

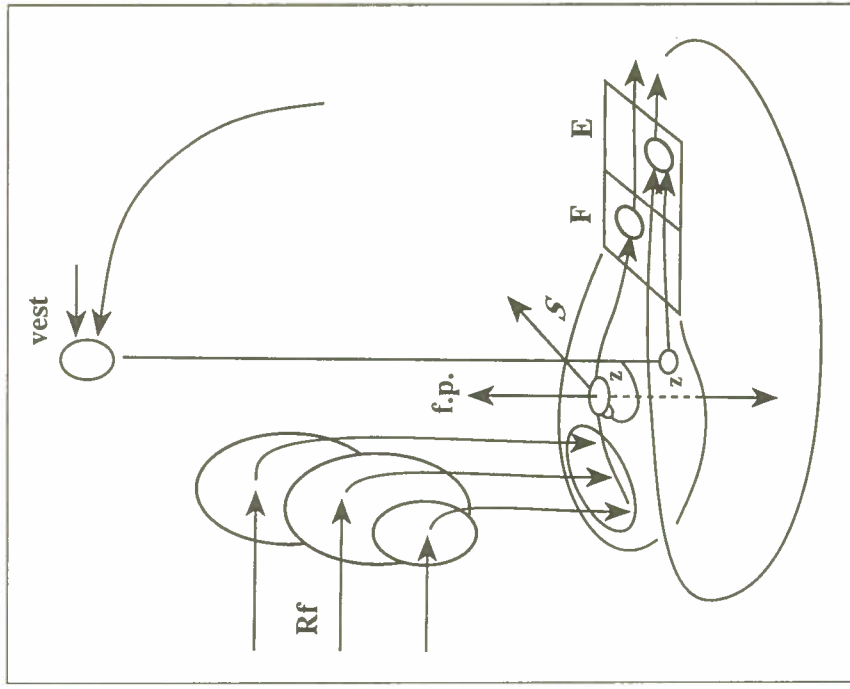


Abb. 1: Schema zweier Elementarsysteme Rf..Rezeptorfeld für nozizeptive/ protopathische Reize, F..Flexor - Motoneurone, E..Extensormotoneurone, Z..Zwischen(schalt)neurone, vest.. Vestibularsystem, f.p fasciculus proprius (Eigenapparat des Rückenmarks), S..segmentale Schaltplatte.

### 1.2.1. Speicherung und Verknüpfung

Mit zunehmender Labilität ist es für das Individuum notwendig, Aufgenommenes abzuspeichern zu können. Damit ist es in der Lage, bei wiederkehrenden Situationen auf die gekoppelten Reaktionen zurückzugreifen. Es muß daher jedem Sinnessystem ein eigenes Areal zur Ablage der Muster sowie ein weiteres zu deren assoziativer Verknüpfung zugeordnet werden (siehe Abb. 2).

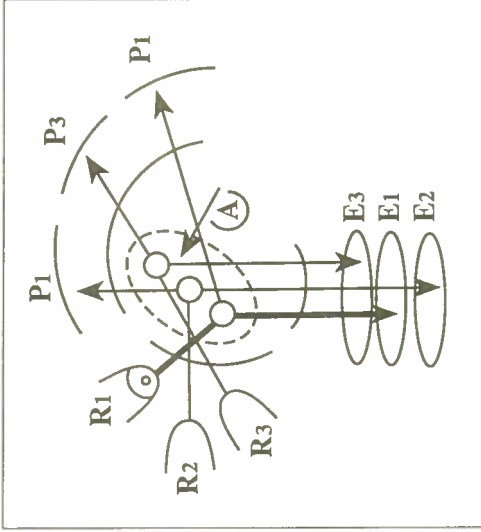


Abb. 2: Verknüpfung verschiedener Hirnfunktionen: Die Rezeptorfelder Ri projizieren über eine Schaltstelle gleichzeitig in das motorische System Ei (Grundmodell) und auf spezifische Projektionsfelder (Pi). Die assoziative Kopplung (A) umfaßt damit alle Affferenz-, Efferenz- und Projektionsfelder, wodurch ein multimodales Abbild entsteht.

### 1.2.2. Lokalisierung beim Menschen

Anatomisch-physiologisch ist die Voraussetzung der Kombination von Afferenzen verschiedener Sinnessysteme untereinander und mit dem Efferenzsystem gegeben. Anhand des Verlaufs der sogenannten Projektionskaskaden (nach POPPER/ECCLES, 1990) wurde gezeigt, daß alle Systeme über den Limbischen Cortex ins Limbische System projizieren.

- Die peripheren Rezeptorfelder projizieren in entsprechende Kerne des Thalamus; von wo die verarbeiteten Reize an die spezifischen Projektionsfelder des Cortex weitergeleitet werden.
- Höhere Verarbeitungsstufen sind den primären Projektionsarealen als sekundäre, tertiäre, quartäre etc. Felder nachgeordnet.
- Für spezifizierte Aufgabenstellungen haben sich eigene Areale herausgebildet, wie das motorische Augenfeld, das sensorische bzw. motorische Sprachzentrum (Verstehen bzw. Aussprechen von Wörtern), Palpationsfelder in Kombination mit visueller Kontrolle, Farblexikon, visuell-akustisch-sensorisches Koordinationsfeld etc.
- Die Kaskaden münden in den Limbischen Cortex und gelangen von dort ins Limbische System.

In diesem Limbischen System binden auch verschiedene andere funktionelle Systeme an. So erfolgt z.B. die Auswahl der Inhalte, die "gelernt" werden sollen, aber auch die Einbindung der emotionalen Färbung von Inhalten: Nach der Theorie der Affektlogik (CIOMPI, 1993) ist jeder Inhalt aus einem quantifizierenden (logischen) und qualifizierenden (emotionalen) Anteil zusammengesetzt. Auch ein Belohnungssystem (positive

Rückkopplung bei erfolgreichen Handlungen führt zu Eigenbelohnung - wird auch als Mechanismus zur Erklärung der Entstehung von Süchten angesehen) wurde im LS lokalisiert (HERZ, 1987; ROUTHENBERG, 1987).

Eine Hauptprojektionslinie führt zum sog. präfrontalen Cortex, der für die Planung von Handlungsabläufen als zuständig angesehen wird.

### 1.3. Willkürbewegungen

Die bisherigen Systeme haben die schnelle Reaktion auf Afferenzen ermöglicht. Beim Menschen müssen darüberhinaus Erklärungen gefunden werden, wie sogenannte Willkürbewegungen - also willentlich gesteuerte und beeinflusste Aktionen- zustande kommen. Derartige Systeme müssen auch in der Lage sein, offene Handlungen, wie sie in der Exekution pragmatischer Information vorliegen, zu erklären: So unterscheidet sich die Aktion "einen Brief schreiben und ihn zur Post geben" sehr wesentlich von einfachen Reaktionen auf einen Schmerzreiz. Da kein zweites motorisches System vorhanden ist, müssen sie auf das vorhandene Inventar aufbauen, daher sowohl die afferenzen als auch die efferenten Muster nutzen. Bisher wurden zwei Möglichkeiten dargestellt, eine Bewegungsreaktion auszulösen:

1. die unmittelbare Auslösung durch Afferenzfelder im Elementarsystem
2. durch Anbindung dieser Auslöser an konditionierte Stimuli

FINKE (1986) konnte nun nachweisen, daß im visuellen System Vorstellungen die gleichen Bahnen nutzen wie reelle visuelle Wahrnehmungen. Generalisiert man diese Ergebnisse, so müßte allgemein gelten, daß Vorstellungen jene Bahnen nutzen, die dem jeweiligen Sinnessystem, in dem die Vorstellung stattfindet, zugeordnet sind. Der Weg vom Reizfeld am Rezeptor zu den Feldern zentraler Verarbeitung erhält damit gleichsam einen zweiten "Eingang". Für das sensomotorische System bedeutet dies eine Gleichsetzung von Vorstellung und realer Wahrnehmung in jedem Sinnessystem, sodaß damit auch durch das Erzeugen einer Vorstellung eine Reaktion ausgelöst werden kann.

Diese Erweiterung stellt nun eine zusätzliche Möglichkeit dar, ohne im "Hardwarebereich" neue Systeme annehmen zu müssen.

Für die Ausführung offener Handlungsketten - wie oben am Beispiel des Briefes dargestellt - müssen allerdings noch weitere Mechanismen vorhanden sein, die unscharfe Handlungsziele ausreichend präzisieren und Maßnahmen zur Realisierung setzen bzw. kombinieren können.

#### 1.3.1. Handlungsplanung

Zur Planung einer Handlung bzw. einer ganzen Handlungskette ist es notwendig, einzelne Elemente miteinander sukzessiv und/oder simultan zu kombinieren. Dabei muß einerseits die Auswahl der "besten" Handlungsvariante (im Fall des Briefaufgebens z.B. der nächstliegende Briefkasten, der bald geleert wird), andererseits aber auch ein "Ablauf" mit abgekoppeltem Vollzug ("gedanklicher Ablauf") möglich sein.

Nach der Untersuchung von GOLDMAN-RAKIC (1992) scheint das Zentrum dieser Vorgänge im sogenannten präfrontalen Cortex lokalisiert zu sein. Es scheint, daß die Beschäftigung (Wahrnehmung bzw. Vorstellung) mit einem bestimmten Objekt die dazu assoziierten Speicherungen aktiviert, sodaß dieser Vorgang der Bewertung erfolgen kann

und das Ergebnis zunächst "zwischenlagert" wird, bis der gesamte Handlungsplan erstellt ist, und damit dem Vollzug übermittelt wird.

Wir sollten dabei nicht zu komplizierte und hochintellektuelle Vorgänge wie Optimierung etc. annehmen: Bei Annahme der Kombination quantitativer Inhalte mit qualitativer Färbung muß es einfach eine Verbindung des Objektes mit einem assoziierten Bereich geben, der die für das Individuum "angenehmste" (am besten erscheinende) emotionale Färbung aufweist - immer bezogen auf das eigentliche Ziel. Damit erfolgt dessen automatische Auswahl.

Den Feldern des präfrontalen Cortex nachgeordnet sind die prämotorischen Felder und letztlich das motorische Feld (area 4 nach BRODMANN). Man kann daher annehmen, daß auf diesem Weg der - nun geordnete und strukturierte - Handlungsablauf der Ausführung zugeleitet wird. "Am Weg" liegen spezielle motorische Felder wie das motorische Augenfeld (area 8) und das motorische Sprachzentrum.

### 1.3.2. Kontrolle der Willkürmotorik

Nach ECCLES (in POPPER/ECCLES, 1990) enthält der Cortex alle Mechanismen, um Willkürbewegungen in Gang zu setzen und aufrechtzuerhalten, doch sind diese Bewegungen bei Läsionen anderer Hirnregionen unbeholfen und unregelmäßig. Bei Störungen des Kleinhirns resultieren z.B. schwere Beeinträchtigungen der Bewegungen. Untersuchungen bei Kniegsverletzten, bei denen eine Hälfte des Kleinhirns zerstört war, zeigen, daß z.B. der Arm auf der intakten Seite rasch und genau bewegt werden konnte. Bei Bewegungen der verletzten Seite mußte aber "über jede Bewegung des Armes nachgedacht werden". Im Normalzustand hingegen genügt ein allgemeines Kommando und der gesamte Ablauf erfolgt automatisch.

Allgemein kann gesagt werden, daß die meisten komplexen Bewegungen unbewußt und mit vollendeter Gewandtheit ausgeführt werden. Je weniger darüber nachgedacht wird, desto besser ist es für deren Ablauf. ECCLES stellt dazu die These auf, daß das Kleinhirn an allen diesen Bewegungen mit der Organisation und Kontrolle beteiligt ist und während des gesamten Lebens, vor allem aber im Kleinkindalter, ein unablässiger Lernprozeß für das Kleinhirn abläuft.

Gehen wir nun schrittweise von der Planung zur konkreten Durchführung und Kontrolle von Bewegungen vor, müssen wir die drei von ECCLES postulierten Schleifen in Richtung von allgemein-unspezifisch bis zur begleitenden Kontrolle auflisten.

#### 1.3.2.1. "Lageintegration" - offene Schleifen über die Basalganglien

Eine dieser Schleifen - besser gesagt, ein ganzes Schleifensystem (NIEWENHUYSES et al, 1989) - verläuft von anderen Rindenabschnitten als 4 über die Basalganglien und projiziert zu Feld 6 zurück. Dieses System scheint parallel mit den Kleinhirnhemisphären zu arbeiten. Störungen der Basalganglien sind zwar bekannt (Parkinson, Chorea), ihre Rolle bei der Bewegungskontrolle ist jedoch noch nicht ganz geklärt. Am ehesten wird eine Mitwirkung bei der Tonusregulierung durch Integration der affektiven Lageinformationen (im gesamten unspezifischen Cortex) vermutet.

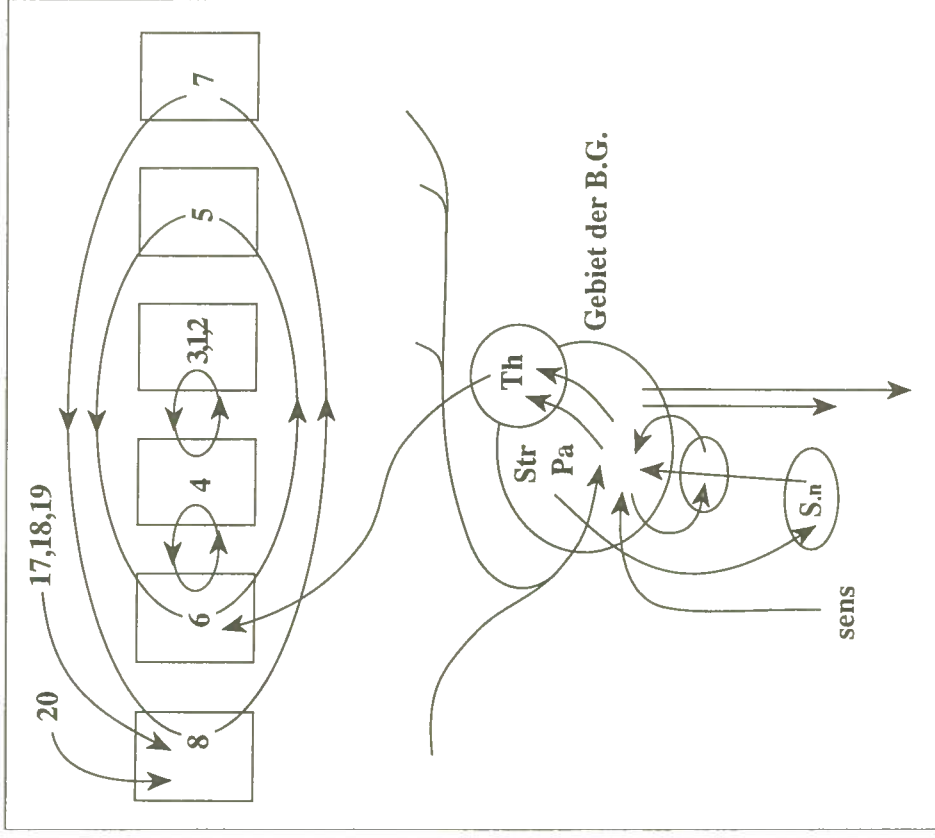


Abb. 3: Schleife über die Basalganglien - Impulse aus allen Cortexregionen langen in den Basalganglien (BG) ein und gelangen von dort in den Thalamus (Th), von dem integrierte Information an Feld 6 zurückgemittelt wird. Aus dem Thalamus und dem Limbischen System erfolgt ein Output in das Stammhirn und das Rückenmark. Str.: Striatum, Pa.: Pallidum, sens.: Eingang aus somatosensorischen Systemen, S.n.: Substantia nigra. Die Nummern in den Kästchen beziehen sich jeweils auf die zytoarchitektonischen Felder nach BRODMANN: 8, 6.: prämotorische Felder, 4.: motorisches Feld, 3, 1, 2.: primäres sensorisches Feld, 5, 7.: sekundäre bzw. tertiäre sensorische Felder, 17, 18, 19.: visueller Cortex, 20.: Assoziationsfeld.

#### 1.3.2.2. "Planung" - offene Schleife über die Kleinhirnhemisphären

Die Hemisphären umfassen fast 90 % des menschlichen Kleinhirns. Pyramidenzellen aus kortikalen Abschnitten - vor allem aus 6 - projizieren über Relais der Brücke zur kontralateralen Kleinhirnrinde; die rückläufige Verbindung erfolgt teilweise zu 4, jedoch auch zu 6. Die Impulse von der Rinde sind relativ bescheiden, sodaß dieser Wirkmechanismus auf das Großhirn hauptsächlich als offene Schleife wirkt, indem sie das Kommando der Pyramidenzellen antedatiert. Man kann daher eher eine planende Funktion der Bewegung annehmen. Sie hat antizipatorische Funktion und basiert auf Lernen und Erfahrung.

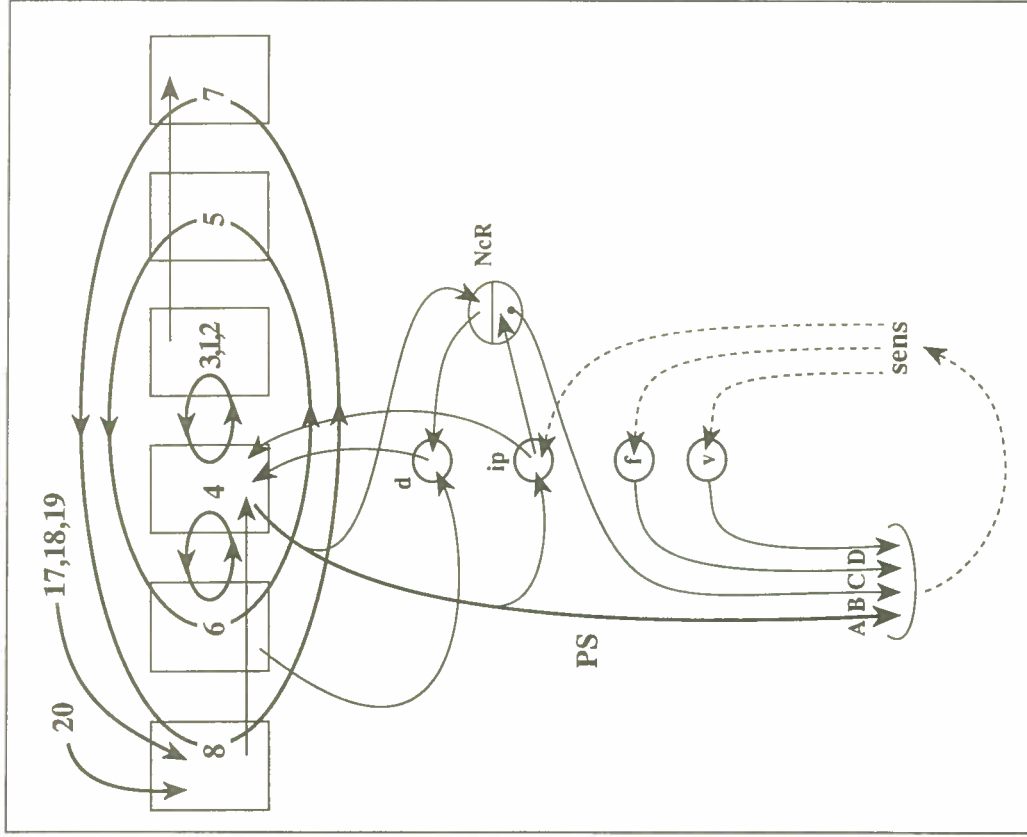


Abb. 4: Darstellung der beiden Schleifen über das Kleinhirn, zusätzlich ist auch die Anbindung eines elementaren motorischen Systems (über Nc vest) dargestellt. Erklärung der Abkürzungen: NcR..Nucleus Ruber, tr. r.spin., tractus rubrospinalis, PS..Pyramidenbahnsystem, d, ip, f..Kleinhirnkern Nc dentatus, interpositi, fastigi, v..Nucleus Vestibularis, A,B,C,D..Eingänge an den segmentalen Schaltneuronen über Pyramidenbahn, tr. rubrospinalis, tr. reticulospinalis, tr. vestibulospinalis. sens..sensorische Rückmeldungen (Affärenzen)

### 1.3.2.3. Kontrolle und Korrektur ablaufender Bewegungen durch eine geschlossene Schleife über die Pars intermedia des Kleinhirns

Wenn schließlich Pyramidenzellen (z.B. aus Feld 4) Impulse über die Pyramidenbahn senden, um eine Willkürbewegung zustande zu bringen, werden die Muster der Entladung in allen Details über die kollateralen Fasern zur Pars intermedia des Kleinhirns weitergegeben. Diese erhält damit einerseits Informationen aus dem Cortex, andererseits aber auch aus der Peripherie (tr. spinocerebellaris) über Muskeln, Haut und Gelenke.

Damit kann eine Abgleichung des aktuellen zentralen Ausführungsimpulses mit der aktuellen Lage und der notwendigen Geschwindigkeit erfolgen. Das Korrektursignal gelangt einerseits über den Thalamus wieder zum Cortex zurück, speist andererseits aber auch den Nc. Ruber, der über ein eigenes Outputsystem, den tr. rubrospinalis verfügt. Es erfolgt damit alle 10 - 20 msec ein "Kommentar" vom Kleinhirn, der sofort in eine Korrektur der Outputsignale umgesetzt wird.

Dem Bahnsystem des tr. rubrospinalis scheint dabei eine besondere Rolle zuzukommen: Er entspringt in Feld 4 an den kleinen Pyramidenzellen jener Teile, die für die Extremitätensteuerung zuständig sind und verläuft mit der Pyramidenbahn abwärts. Die Kollateralen gelangen wie die der Pyramidenbahn ins Kleinhirn. Der Output des Nc Ruber enthält daher sowohl Impulse aus dem Cortex als auch Korrekturimpulse aus den Kleinhirnkernen (Nci interpositi).

NIEWENHUYNS et al. (1988) bemerkten dazu, daß beim Menschen der tr. rubrospinalis nur der Versorgung der distalen Anteile der oberen Extremitäten dient, aber überall dort, wo er auftritt, alle anderen Impulse dominiert. Sieht man diese Bahn daher als dominant für die Feinsteuerung an, so kann ihr Fehlen an den unteren Extremitäten des Menschen damit erklärt werden, daß feinkoordinierte Bewegungen bei diesem praktisch nur den Händen zugeordnet werden.

Das Gesamtsystem kann nach ECCLES wie das Kontrollsystem eines zielsuchenden Geschosses aufgefaßt werden: Es erfolgt permanent eine Bewegungskorrektur, die zum Ziel hingelernt ist.

Neben der Bedeutung des prämotorischen und motorischen Feldes (6 und 4) weist ECCLES (1991) in neueren Arbeiten auf die Bedeutung des supplementären motorischen Feldes (SMA - supplementary motor area) hin, dem eine große Bedeutung beim Zustandekommen von Willkürbewegungen zuzukommen scheint. Die zitierten Arbeiten weisen darauf, daß bei nicht automatisierten Bewegungen SMA als erstes aktiviert wird und während des gesamten Verlaufes erhöhte Aktivität zeigt, bei automatisierten jedoch nur dessen anfängliche Aktivierung notwendig ist. Bei ausschließlich gedanklicher Ausführung zeigt nur SMA einen Aktivitätsanstieg.

ECCLES postuliert, daß mentale Intention auf höchst selektive Art auf SMA wirkt, das gleichsam einen Katalog der erlernten motorischen Programme enthält. Die Programme selbst können auf Grund der geringen Größe von SMA nicht gespeichert sein. Verbindungen mit prämotorischen Cortex, Basalganglien und Kleinhirn sind bekannt und die Einbeziehung dieser Regionen bei willkürlichen Bewegungen vor Aktivierung des motorischen Cortex ist nachgewiesen.

### 1.3.3. Zentrale efferente Bahnen - Pyramidenbahn und tr. rubrospinalis

Gegenüber der allgemeinen Meinung, die Pyramidenbahn entstehe ausschließlich in den Riesenpyramidenzellen des motorischen Feldes (Gyrus praecentralis, area 4 nach BRODMANN), ist feststellen, daß diese nur einen Teilbereich der corticofugalen Hauptbahn darstellt. Zur Pyramidenbahn zählen vielmehr auch efferente Bahnen aus der frontalen Rinde und den prämotorischen Feldern (8 und 6) sowie aus dem sensorischen Cortex (Felder 3, 1, 2 und 5). Die zusätzliche Outputbahn des tr. rubrospinalis wurde bereits un-mittelbar vorher beschrieben.

Die bezeichneten Felder der Rinde stehen untereinander in vielfältiger Wechselbeziehung (ECCLES - Projektionskaskaden), sodaß eine permanente "Kommunikation" zwischen ihnen angenommen werden muß. Die Ursprungsbereiche der Pyramidenbahn bil-

den damit eine integrierte Einheit der Informationsübertragung durch efferente Impulsen, bei der den Bahnen unterschiedliche Aufgaben zukommen.

Die Neuriten der Pyramidenbahnen enden wieder direkt in den einzelnen Segmenten, und zwar vorwiegend in Schaltneuronen. Nach KAHLE (1976) versorgen sie ebenso wie die des tr. rubrospinalis vor allem Neurone der Flexoren.

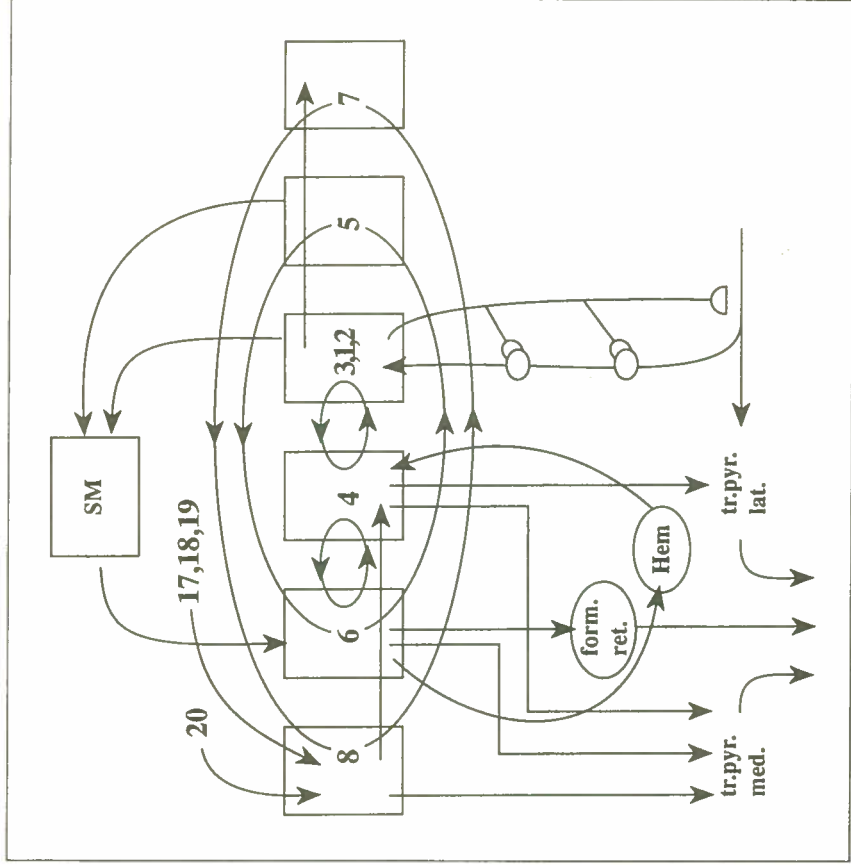


Abb.5: Anteile der zentralen Outputbahn - Pyramidenbahn (nach NIEWENHUYNS et al.) SM. supplementäres motorisches Feld, Hem. Kleinhirnhemisphären, tr.pyr.med.- lat. tractus pyramidalis medialis und lateralis, form.ret. formatio reticularis. Rechts ist schematisch die Bahn der somatosensorischen Informationen und die der zentralen Hemmungsmöglichkeiten dargestellt.

#### 1.3.4. Zusatzinformation zur Leitung sensorischer Impulse

Bei Beschreibung des Koordinationsmodells wurde zunächst stillschweigend die Kenntnis der Weiterleitung sensorischer Informationen aus der Peripherie angenommen. Hier soll kurz auf die Prinzipien eingegangen werden.

Die sensorische Information wird über mehrere Schaltstellen weitergeleitet. Damit besteht einerseits die Möglichkeit, auf peripheren Ebenen direkte Schaltungen zum Reaktionsbereich vorzunehmen, andererseits aber auch durch zentral ausgelöste Impulse (siehe Pyramidenbahnanteile aus den Feldern 3, 1, 2 und 5) eine Weiterleitung der Information bis zum Cortex und damit zum Bewußtsein zu verhindern. Durch diese Einflußmöglichkeiten

steht darüberhinaus ein Mechanismus der Konzentration und Schärfung von Informationen (z.B. zur Lokalisierung von Schmerzstellen), aber auch der Dilatation, der Dämpfung von Impulsen, zur Verfügung.

#### 1.4. Zusammenfassung

Es wurde zu zeigen versucht, daß das einfache Modell der Projektion eines Rezeptorfeldes auf die Aktivatoren (=Neuronen) des motorischen Inventars sehr wohl im menschlichen ZNS rekonstruiert werden kann. Die Auslösung motorischer Aktionen erfolgt dabei in den Segmenten des Rückenmarks und im Hirnstamm.

Die sensorischen Systeme innervieren dabei direkt oder indirekt (nach Umschaltung) aus verschiedenen Ebenen durch eigene Leitungsbahnen, deren Impulse i.A. über Zwischenneurone an die Motoneurone der Peripherie gelangen.

Auch der oft beschriebene (oder vielmehr postulierte) "Kampf um die letzte motorische Endstrecke" findet in diesem System sicher nicht statt:

Das System ist vielmehr so konstruiert, daß jedes Teilsystem die Möglichkeit hat, über spezifische Bahnen Impulse an die Zwischenneuronen im Rückenmark abzugeben. Es erfolgt keine zusätzliche zentrale Verarbeitung, wodurch die Reaktionsfähigkeit wesentlich verbessert wird: Jedes Teilsystem reagiert unmittelbar und wird gegebenenfalls durch andere Teilsysteme korrigiert oder verstärkt. Treffen mehrere Signale aus verschiedenen sensorischen Systemen ein, so erfolgt die Integration der Impulse unmittelbar am "Ausgang".

#### 2. Funktionsprinzipien und deren Nutzung

##### Grundfrage: Speicher versus Berechnung

Folgt man den Ausführungen BRAITENBERGS et. al. (1989), hat das menschliche Gehirn eine fast unbegrenzte Speicherkapazität, aber nur sehr eng begrenzte Rechenkapazität. Damit fallen alle Modelle, die auf der Annahme einer "on-line" Berechnung basieren, als unrealistisch weg. Es muß daher untersucht werden, ob mit Hilfe der unbegrenzten Speicherkapazität nicht zumindest eine äquivalente Leistungsfähigkeit erzielt werden kann.

Das Verwerfen der Berechnung als Grundlage bedingt aber wieder das Vorhandensein der Möglichkeit einer praktisch unbegrenzten Speicherung, die aber auch nicht in der vom Computer her bekannten Form erfolgen kann: Würde für jeden neuen Inhalt ein zusätzlicher Platz benötigt, wären die vorhandenen Speicherplätze bald ausgelastet.

##### Biochemische Grundlagen des Lernens

Um über ein Repertoire wirkungsvoller Bewegungsmuster im schnellen Zugriff zu verfügen, müssen diese einerseits gespeichert und andererseits weitergegeben werden können.

Es herrscht heute weitgehend Übereinstimmung darin, daß das neuronale Lernen durch die Veränderung der synaptischen Durchlässigkeit erfolgt. Dieses von HEBB (1949) vorgestellte Modell besagt, daß es sogenannte variable Synapsen gibt, die ihre Durchlässig-

sigkeit für den  $Ca^{++}$ -Einstrom bei häufiger gemeinsamer Nutzung dieser Verbindungen erhöhen. Dies erfolgt durch ein eigenes Enzym.

Enzyme wiederum sind Eiweißsubstanzen (Proteine), die über den Bauplan der DNA erzeugt werden, ebenso wie die Strukturelemente. Man kann daher annehmen, daß einerseits über den Mechanismus der Veränderung der synaptischen Durchlässigkeit gebahnte Wege für Verbindungen geschaffen werden, während andererseits die Baupläne für die Strukturen über die DNA weitergegeben werden können.

### 2.1.1. Prinzip und Eigenschaften des assoziativen Speichers

Basierend auf dem HEBB'schen Synapsenmodell wurde zunächst von STEINBUCH (1971) das Modell der Lernmatrix vorgestellt, das später zu Modellen des "assoziativen Gedächtnisses" (s.u.a. PALM, 1988) und den synergetischen Computern (HAKEN et al., 1992) ausgebaut wurde.

Assoziative Gedächtnismodelle haben gegenüber "konservativen" Computer - Speichermodellen einige Vorteile. Sie nutzen z.B. immer die gleichen Speicherplätze, verschiedene Muster werden durch 1/0 - Skalierung oder unterschiedliche Gewichtung der Verbindung zwischen zwei Elementen dargestellt. Angewandt auf das Nervensystem bedeutet dies, daß für die Neuinspeicherung eines Musters keine zusätzlichen Speicherplätze benötigt werden, sondern daß auf der Basis der bestehenden Menge von Neuronen eine Musterspeicherung durch deren Gewichtung allein erfolgt. Die Speicherkapazität ist dabei enorm.

Eine weitere Eigenschaft assoziativer Speicher ist die Fähigkeit zur Ergänzung nur teilweise angebotener Mustervorlagen. Nach dem Modell HEBB's genügt die Vorgabe genügend großer Teile (sog. Assemblies), um das Gesamtmuster aufzurufen und damit zu ergänzen. Ist ein vollständig übereinstimmendes Muster nicht vorhanden, wird das "ähnlichste" aktiviert. Liegt die Abweichung außerhalb eines individuellen Unschärfbereiches, so muß damit eine neue Musterklasse definiert werden.

Diese Eigenschaft bietet für die Schnelligkeit der Wahrnehmung einen nicht zu unterschätzenden Vorteil: So zeigt die Computersimulation, daß das Ergänzen von Gesichtern bereits bei Vorliegen von Teilen über das assoziative Gedächtnis gelingt. Nicht verschwiegen werden soll dabei ein Problem, das auch mit der Fähigkeit der Musterergänzung zusammenhängt: Die Ergänzung von teilweise verdeckten Figuren erfolgt durch Vervollständigung über den Speicher, es wird dabei auf die abgelagerten Muster zurückgegriffen. Dabei können selbstverständlich nur vergangene Muster aktiviert werden, Muster hohen Neuigkeitswerts gehen dabei verloren. Ein Faktum, das gerade bei der Bewegungsbeurteilung beachtet werden sollte.

Ein weiterer Mechanismus wird ebenfalls über das assoziative Gedächtnis aktiviert: So zeigt z.B. FREEMAN (1991), daß bereits das Vorhandensein minimaler Mengen von Duftstoffen über das assoziative Gedächtnis explorative motorische Aktivitäten entwickelt, die durch "Schnüffeln" den Luftdurchsatz an den Riechrezeptoren erhöhen und damit genügend Material zum Erkennen des Geruches schaffen.

Ähnlich ist die Situation bei anderen Sinnessystemen: FREUND (1988) zeigte, daß sowohl zum Diagnostizieren von Bildvorlagen als auch beim Palpieren (diagnostizierendes Abtasten durch die Finger) ganz spezifische Bewegungen notwendig sind, die individuell charakteristisch - wahrscheinlich durch Assemblies - aktiviert werden.

Beim visuellen Diagnostizieren handelt es sich um die sogenannten Sakkaden (kleine ruckartige Augenbewegungen), die entlang der wesentlichen Merkmale einer Bildvorlage erfolgen. Sie haben zusätzlich die Aufgabe, im Rezeptorenbereich für einen Wechsel der Aktivierung zu sorgen, damit die benutzten Zellen wieder regenerieren können.

Zum Diagnostizieren der Detailstrukturen von Gegenständen werden kleine Bewegungen der Finger entlang der Kanten des Objektes eingesetzt. ECCLES (1990) berichtet von eigenen Zentren in den Feldern 5 und 7, die für die Steuerung dieser Bewegungen zuständig sind.

Ganz wichtig für das Verständnis der Wahrnehmung ist jedoch auch FREEMAN's Ergebnis, daß gleiche Materialien je nach zentraler Einstellung unterschiedliche Muster ergeben: gleiche Gerüche mit unterschiedlicher Erwartungshaltung erzeugen reproduzierbar andere Muster am Riechkolben.

Damit haben wir einige ganz wesentliche Eigenschaften dargestellt, die erheblich zur beobachtbaren Wahrnehmungsleistung beitragen:

Die Wahrnehmung eines Objektes erfolgt nicht durch schrittweise innere Rekonstruktion entlang der Verarbeitungsstufen, sondern durch einen holistischen Vergleich mit gespeicherten Mustern: Eine Neuaufnahme ist "nur" eine Bildung einer neuen Klasse, die sich von einem der bisher gespeicherten Muster (über einen individuellen "Graubereich" hinaus) abhebt.

Man befindet sich damit in großer Nähe zur Gestaltpsychologie, die Eigenschaften beschreibt, durch die eine Gestalt beschrieben wird. Das Assembled wäre die funktionelle Begründung der Gestaltwerdung!

Es wird nicht ein Objekt über ein Sinnessystem abgebildet, sondern grundsätzlich jedes Objekt in jedem Sinnessystem. Damit ist jede innere Abbildung multimodal.

Die Wahrnehmung ist eine bidirektionale Angelegenheit: Die zentrale Einstellung bestimmt wesentlich die Art der Aufnahme und Verarbeitung eines Objektes der Umgebung.

Mit dem Auftreten der Assemblies auf dem Rezeptorfeld werden nicht nur zentrale Projektionsfelder aktiviert, sondern auch motorische Zentren, die durch explorative Tätigkeit das Informationsangebot vergrößern und vervollständigen sollen.

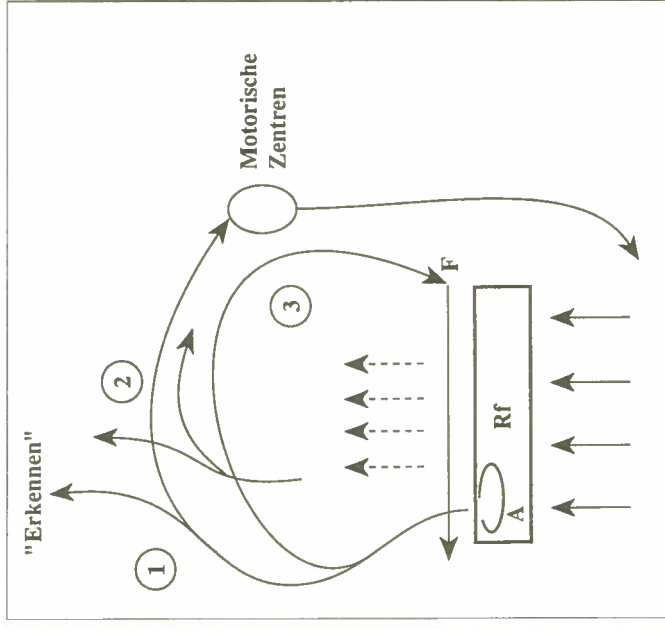


Abb. 6: Schema des Wahrnehmungsvorganges unter Zuhilfenahme assoziativer Speicher. Rf..Rezeptorenfeld, A..Assemblies, F..Filter, 1, 2, 3 ... Wege der Wahrnehmung. Weitere Erklärungen im Text.



### 2.1.2. Mögliche Nutzung der Eigenschaften der assoziativen Speicher

Mit den Fähigkeiten zur Aktivierung explorativer Bewegungen und der Musterergänzung lassen sich einige mögliche Funktionen im System der Wahrnehmung sehr einfach erklären und darstellen.

In einem Mehrstufenmodell lassen sich nun einige Schritte der Nutzung der Möglichkeiten des assoziativen Gedächtnisses in der Wahrnehmung ableiten (Abb. 6):

Der Weg (1) wird eingeschlagen, wenn am Rezeptorfeld genügend Information einlangt, sodaß sofort das Gesamtmuster weitergeleitet werden kann. Es wird zugeordnet (erkannt) und die damit assoziierte Reaktion in Gang gesetzt.

Ist die Informationsmenge nicht ausreichend, setzt über den Weg (2) exploratives Verhalten ein. Kann damit das vorliegende Muster ergänzt werden, so wird Weg (1) wie oben beschritten.

Kann über den Weg (3) auf das Muster am Rezeptorfeld eine negative Kopie appliziert werden, so sind damit die Voraussetzungen für Abweichungsanalysen geschaffen: Entspricht das einlangende Muster dem gespeicherten, so werden die einlangenden Signale durch das Vorschaltmuster kompensiert, es gelangen keine Impulse zu weiterer Verarbeitung. Gibt es Abweichung, so werden diese - und nur diese - angezeigt und können in weiteren Verarbeitungsschritten (an anderen Vergleichsmustern) aufgeklärt werden.

Mit diesen beschriebenen Mechanismen können nun viele praktische Erfahrungen leichter erklärt werden als ohne Anwendung des Modells der assoziativen Speicher.

#### 2.1.2.1. Ausführung einer beobachteten Bewegung

Man kann damit z.B. das Zustandekommen von Bewegungsausführungen nach dem Beobachten von Bewegung(svorgaben) erklären: Die Vorgabe wird an gespeicherten Mustern verglichen (über Assemblies ergänzt) und das ähnlichste vorhandene Muster ausgewählt. Dieses wird i.A. nicht hundertprozentig mit der Vorgabe übereinstimmen. Zum "ähnlichsten" Muster existiert ein Ausführungsprogramm, sodaß dessen Start eine Bewegung produziert, die zwar dem "ähnlichsten" Muster total, dem Vorgabemuster jedoch nur zum größten Teil entspricht. Die verbleibende Restabweichung wird nun weiteren gespeicherten Mustern zugeordnet und schrittweise dem "ähnlichsten" aufgepfropft. Da dies nicht automatisch (d.i. durch Ablauf eines Festprogrammes) erfolgen kann, geschieht dies noch sehr holprig und in nicht vorhersagbaren Schritten. Die Annahme des Modells zeigt hohe Übereinstimmung mit der Praxis: Nach einem ersten Ausführungsversuch, der der "ähnlichsten" Form entspricht und weitgehend mit der gezeigten übereinstimmt, folgen weitere Versuche unterschiedlicher Distanz zum angestrebten Ergebnis. Es kann dabei keine kontinuierliche Steigerung der Qualität, sondern vielmehr ein unregelmäßiges oszillierendes Verhalten festgestellt werden: Das reale Verhalten entspricht damit nur sehr entfernt den sogenannten Lernkurven, die sich stetig asymptotisch einem Grenzwert "1" annähern.

#### 2.1.2.2. Nutzung der negativen Kopie

Auch in der Automatisierungsphase von Bewegungen kann der über das assoziative Gedächtnis mögliche Mechanismus hilfreich sein: Jede Anzeige des Gleichgewichtsverlusts führt zu einer automatischen Reaktion zur Wiederherstellung der Stabilität des Systems. So gut dieser Mechanismus i.A. ist, so störend wäre er bei der Ausführung eines

Tiefstarts: Mit dem Lösen der Hände vom Boden und dem Beginn der Bewegung müßte sofort eine Reaktion zur Wiederherstellung des Gleichgewichts erfolgen. Dies widerspricht aber dem Funktionsprinzip des Gleichgewichtsverlustes beim Starten. Kann man aber auf das Gleichgewichtsorgan eine negative Kopie des Impulsmusters der erwünschten Lage aufschalten, so werden nur mehr von diesem abweichende Lagen zu Signalen und damit kompensatorischen Reaktionen führen.

Man kann nun ein Funktionsprinzip gleicher Art für alle Mechanismen annehmen. So kann z.B. angenommen werden, daß auch für die effektorische Seite (Menge der Motoneuronen) das gleiche Prinzip gilt, daß über eine ausreichend große Menge von aktivierten Elementen (Assemblies) das Gesamtmuster aufgerufen werden kann. Da bisher eine 1:1 Verbindung zwischen Reiz und Reaktion angenommen wurde, muß also auch ein - ausreichend großes - Assemblie auf der Afferenzseite das korrespondierende Efferenzmuster auslösen.

Dies ist z.B. bei der Reaktion auf Geräusche zu beobachten: Tiefstarts werden bei der geringsten Veränderung der Reizsituation in der Umgebung ausgelöst, auch wenn diese mit dem Schuß keine Ähnlichkeit haben.

#### 2.1.2.3. Antizipation

Mit diesem Modell lassen sich auch Fakten wie die Antizipation und damit auch das bessere Reagieren (z.B. in der Situation Werfen - Fangen) erklären, wenn die Aufmerksamkeit ausschließlich auf die Wahrnehmung gerichtet ist.

Antizipation beruht auf der gekoppelten Speicherung von Zeitmustern, d.h. die relative Positionsveränderung des Objektes im Wahrnehmungsraum wird als Reihe von Bildern dargestellt und mit den gespeicherten verglichen. Mit jedem zusätzlichen "Momentbild" wird die Unsicherheit bezüglich der zu erwartenden Flugbahn eingeschränkt, sodaß letztlich ein ("ähnlichstes") gespeichertes Muster überbleibt, das die assoziierte Reaktion(sbewegung) auslöst. Wir können dabei die Bewegung der Hand und des Armes gleichsam als Anpassung an die Präzisierung der Bahn ansehen. Sind - wie beim Fangen - als Reaktion Präzisionsbewegungen verlangt, so ist ein erfolgreiches, Reagieren allerdings nur dann möglich, wenn die Endbewegung vollständig beherrscht wird.

#### 2.1.2.4. Beobachtung und Beurteilung von Bewegungen

Das Erkennen von Mustern setzt deren eindeutige Identifizierung durch Vergleich mit vorhandenen, abgespeicherten Mustern voraus. Ist das neu angebotene Muster in individuellen Grenzen identisch, wird es als dem gespeicherten ident erkannt. Liegen die Abweichungen außerhalb individueller Grenzen, muß eine neue Klasse (Kategorie) gebildet werden.

Ähnliche Annahmen müssen auch für die Bewegungsbeurteilung durch Beobachtung (Eigen- oder Fremdbeurteilung) gemacht werden: Beurteilung kann nur an einem gespeicherten Modell erfolgen. Die objektive Qualität der Beurteilung wird dabei von der Qualität des gespeicherten Musters abhängen: Sind nur grobe Umrisse vorhanden, kann auch nur in grober Nuancierung beurteilt werden. Sind die individuell gespeicherten Abbildungen einer Bewegung objektiv falsch, werden auch objektiv richtige Bewegungen als falsch eingestuft, weil sie mit dem gespeicherten Abbild nicht übereinstimmen.

Hierin ist auch die Problematik der Videografie zu sehen: Wenn beim Beobachter kein internes Vorgabemuster vorhanden ist, können auch "Fehler" (= Abweichung zum Mu-

ster) nicht erkannt werden. Video sollte als "Sehbehelf" eingesetzt werden und nicht als Sehersatz.

Auch der Ablauf der Fehlerdetektion erfolgt nach einem Schema, das durch das assoziative Gedächtnis erklärt werden kann: Legt man - bildlich gesprochen - das neue Muster auf das alte, so wird zunächst unmittelbar nur erkennbar, ob Abweichungen vorliegen oder nicht. "Es ist anders" - Was anders ist und wieviel es abweicht, bedarf einer zusätzlichen Analyse.

Von der Detektion eines Fehlers ist deutlich die Feststellung der Ursache und die Methodik zur Behebung zu unterscheiden: Während die Detektion gleichsam aus der Differenz zwischen beobachtetem und gespeicherten Muster entsteht, ist für die Lösung der Probleme ein kognitiver Prozeß, der auf einem vorangegangenen Lernvorgang beruht, erforderlich. Maßnahmen zur Fehlerbehebung sind keine Leistungen der Wahrnehmung.

#### 2.1.2.5. Kopplung unterschiedlicher Aktivierungskreise

Die Nutzung assoziativer Speicher und deren Kopplung kann auch bei verschiedenen Stufen "gleichartiger" sportlicher Bewegungen angenommen werden: Es werden bei zunehmender Geschwindigkeit der Lokomotion verschiedene Muster aktiviert. Ist dies beim Pferd noch sehr deutlich zu sehen (vom Schritt bis zum gestreckten Galopp), so ist beim Menschen zunächst nur der Unterschied zwischen dem Gehen und dem Laufen evident. EMG - Untersuchungen zeigen jedoch deutliche Unterschiede der Aktivität einzelner Muskelgruppen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, sodaß hier mit hoher Wahrscheinlichkeit verschiedene Muster anzunehmen sind. Zu klären wäre dann noch die Tatsache kontinuierlich steigender Geschwindigkeit bei sprunghaft wechselnden Innervationsmustern. Auch hier kann durch die Funktion des assoziativen Speichers eine Erklärung gefunden werden.

Es gibt - wie angeführt - verschiedene Innervationsmuster, die ihren optimalen Wirkungsbereich nur in einem kleinen Ausschnitt des möglichen Geschwindigkeitsspektrums haben (siehe Schema). Diese Bereiche sind leicht überlappend, d.h. es gibt Bereiche, in denen z.B. das Muster des langsamen Laufens bereits anwendbar ist, aber auch noch gegangen werden kann (z.B. Überlappen "sportliches Gehen" - "Jogging"). Beginnt man nun, das Muster A anzuwenden und steigert die Intensität (= erhöht die Geschwindigkeit), so erhöht sich auch die Aktivität an kritischen Stellen des Aktivitätsmusters. Wird dadurch ein ausreichend großer Bereich (Assemblie) des nächsthöheren Musters B aktiviert, springt das aktuelle Muster auf B. (Abb. 7,8)

Damit werden zwei Fakten erklärt: Zunächst erfolgt eine Anwendung diskreter Muster ("Stufenfunktionen") in einer Form, die man am besten mit dem Arbeitsbegriff "Fuzzy Logic" (etwa mit "weiche Logik" übersetzt) beschreiben kann: Völlig verschiedene Muster werden durch kontinuierliche Veränderung der Ausführungsintensität so ineinander übergeführt, daß kein sprunghafter Übergang zwischen den Mustern zu erkennen ist. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß einerseits alle notwendigen Muster vorhanden sind und andererseits auch durch die Aktivierung der richtigen Elemente ("führende Bewegungselemente") angesprochen werden.

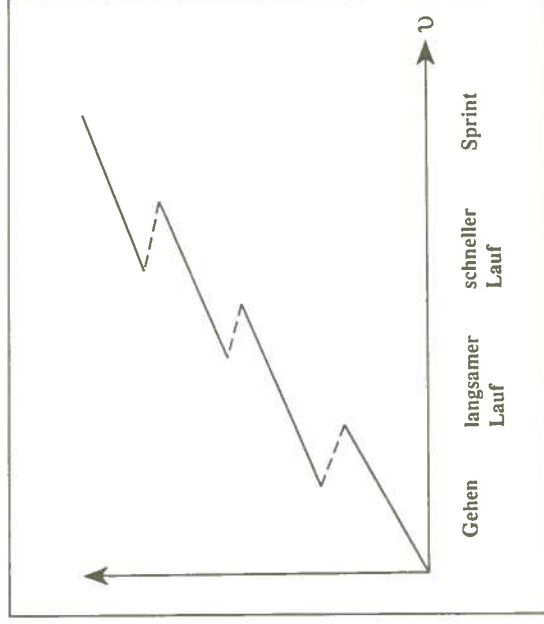


Abb. 7: Schematische Darstellung der optimalen Wirkungsreiche unterschiedlicher Fortbewegungsarten beim Menschen.

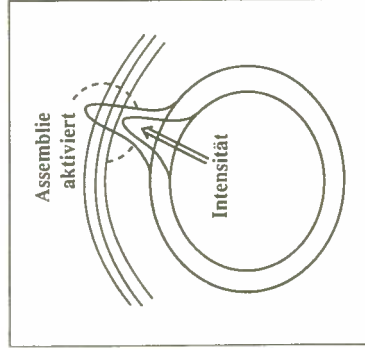


Abb. 8: Schema der Aktivierung "höherer" Musterkreise über Ansprechen durch Assemblies: Wird an geeigneter Stelle des Bewegungsmusters (kleinere Kreise) die Intensität eines Parameters erhöht (Pfeil), so wird ein ausreichend großer Teil des "nächsthöheren" Musters, und damit dieses als Ganzes aktiviert und ausgeführt.

## 2.2. Erstellung von Innervationsmustern

Gemäß der allgemeinen Beschreibung des Systems liegen nun folgende Möglichkeiten der Erstellung von Ausführungsprogrammen vor:

- feste Verbindungen im elementaren Reiz - Reaktionssystem
- Verbindungen als Reaktion auf "höhere" Muster
- die Variation der Muster durch zentrale Einflüsse

Schon aus ihrer Entstehungsgeschichte müssen diese Programme als starr und wenig flexibel angesehen werden. Aktuelle - während des Ablaufes auftretende - Einflüsse aus dem Körper und aus der Umgebung werden nicht berücksichtigt.

Es soll nun zunächst der "Zylinder" des elementaren Systems betrachtet werden. Die einzelnen Etagen sind über den Fasciculus proprius (den Eigenapparat des RM) miteinander verbunden. Der Anschluß in den Segmenten erfolgt über Zwischenneurone (Schaltneurone). An solchen enden auch die afferenten Eingänge aus den protopathischen/nozizeptiven Rezeptoren und aktivieren die korrespondierenden Flexoren.

### 2.2.1. Grundlagen eines Arbeitsmodells

Die Einwirkung von Afferenzen aus der "Umgebung" erzwingt einen Symmetriebruch in der Erklärung des Systems:

*Das motorische System - bzw. dessen Betrachtung - ist ab dem Zeitpunkt der Aufschaltung von Afferenzen aus der Umgebung grundsätzlich anders geworden und mit dem*

bisherigen Inventar der (technischen) Regelsysteme nicht mehr zufriedenstellend zu beschreiben.

Können die Systeme der Regelung des Skelettmuskels als geschlossene Systeme mit Führungs- und/ oder Störgrößenaufschaltung betrachtet werden, so liegt nun ein offenes System vor:

*Information aus der Umgebung wirkt (über Rezeptoren) auf das System ein, das (über Effektoren) wiederum eine Veränderung in/an der Umgebung bewirkt.*

Verfolgt man nun den Ablauf der Systemaktion weiter, so ergibt sich folgendes, erläuterte am besten an einem Beispiel: Die Person tritt auf einen Reißnagel. Erstreaktion: Zurückziehen des betroffenen Fußes, i.A. auch der anderen Extremitäten ("allgemeines Zurückziehen").

Das Ergebnis ist Gleichgewichtsverlust, der automatisch kompensiert werden muß. Dies erfolgt über die Rezeptoren für die Vertikalbeschleunigung und auch über Rezeptoren vor allem im Bereich Fußsohlen, Bein sowie Hals und Nacken.

Damit bewirkt der Impuls - ausgelöst vom Reißnagel - keine Reduktion von Information und Signalen, sondern im Gegenteil eine richtiggehend explosionsartige Vermehrung von Impulssequenzen: Jede neue Reaktion bewirkt über die Umgebung eine Reaktion der Flexoren bzw. Extensoren, je nachdem, welche Kategorie unmittelbar zuvor aktiv war. Folge ist ein permanentes "Pendeln" zwischen den beiden Extremitäten, sodaß letztlich eine - möglichst gedämpfte - "Schwingung" zu einem Stabilitätsverhalten im Sinne eines Grenzzyklus oder Torus führt.

Das hier beschriebene Beispiel kann auch als Muster zur Erklärung für die Auslösung des Laufens betrachtet werden: Bei Gleichgewichtsverlust (nach vorne) führt eine Überdehnung im Bereich der Achillessehne zu einer Beugeaktion des Beines mit Abheben des Fußes. Damit wird das System zusätzlich instabil, zur Wiederherstellung des Gleichgewichts muß daher in einer Streckaktion ein Aufsatz des Fußes vor dem Körper erfolgen. Bleibt die initiale Gleichgewichtssituation bestehen, ist ein permanentes "stolperndes" Vorwärtsbewegen die Folge.

Auch die umgekehrte Variante ist vorstellbar: Ein Signal zeigt Gleichgewichtsverlust an und erzeugt eine kompensatorische Stützbewegung, z.B. der Arme gegen eine horizontale Fläche (Aktivator dabei: N. radialis). Trifft die Handfläche nun auf Unebenheiten (wie z.B. spitze Oberfläche bei einem Stein), wird über den Flexorenbereich (differenzierte Nervenversorgung: N. musculocutaneus, medianus, ulnaris) eine Abstimmung so getroffen, daß sowohl dem Hauptanliegen der Stabilität als auch dem sekundären der Verletzungsvermeidung Rechnung getragen wird.

Elementare Bewegungen, aber auch das Inventar der Halte- und Stellreflexe nach MAGNUS (1924), können über die oben beschriebene Funktionsweise erklärt werden.

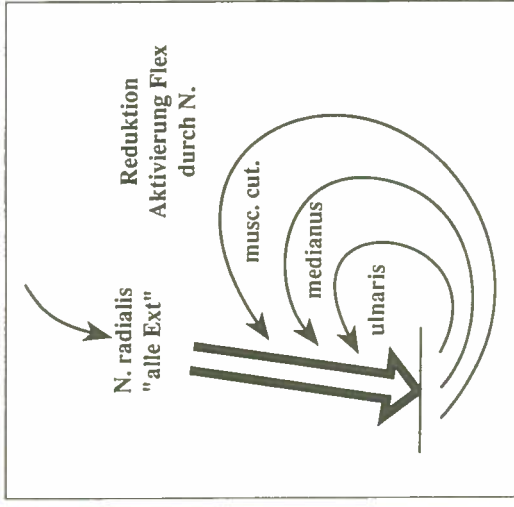


Abb. 9: Schema der Anpassung der Extension des Armes durch drei Aktivierungsbereiche; Extension über N. radialis, Flexion über N. musculocutaneus, medianus und ulnaris. Die generelle Extension des Armes über Innervation durch den N. radialis wird über die differenzierten Innervationsbereiche der die Flexoren aktivierenden Nerven N. musculocutaneus, medianus und ulnaris moduliert und damit an die Umgebungssituation "fein angepaßt".

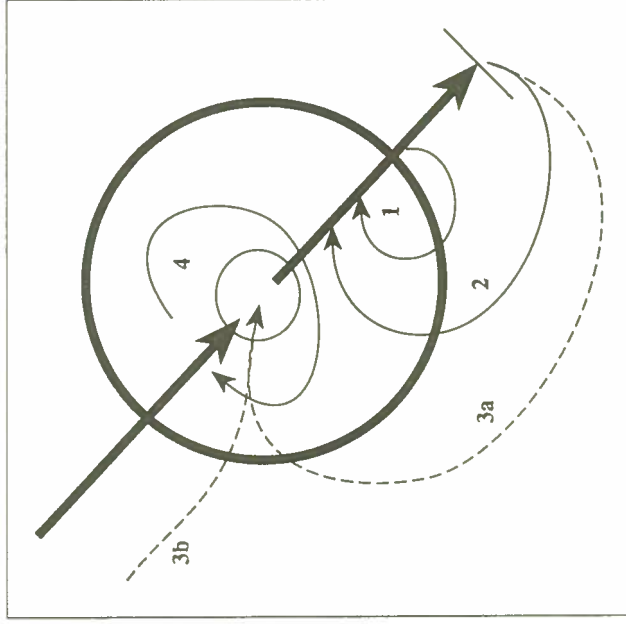


Abb. 10: Schema der Generierung von Information (und damit zusätzlicher Innervationsimpulse) bei Ausführung einer Bewegung. Die in das System (großer Kreis) eintretende Information (dicker Pfeil) erzeugt eine Primärreaktion, die Ausgangspunkt für eine Vielzahl von Sekundärinformationen und damit - reaktionen ist. 1..propriozeptiv, 2..Rezeptoren für Druck, Schmerz etc., 3a. Information aus Eigenbeobachtung über visuelles und akustisches System, 3b. Fremdinformation, 4.. Information aus Reflexion.

### 2.2.2. Erweiterung des Modells positiver Rückkopplung

Erweitert man nun das Modell auf mehrere mögliche Affferenzbereiche, so könnte man mindestens folgende Ergänzungen vornehmen:

*Es erfolgt eine Beobachtung der Bewegung über höhere Sinnessysteme, vor allem visuell und akustisch, wobei beim Menschen auch die Fremdinformation von einem Beobachter über den akustischen Kanal eingeht.*

Eine weitere, allerdings auch nur dem Menschen vorbehalten Informationsquelle ist das "Reflektieren" über die ausgeführte oder gerade in Ausführung begriffene Bewegung und die sich daraus eventuell ableitenden Korrekturmaßnahmen.

Es ist nun evident, daß zur Beschreibung der Funktion derartigen Systemverhaltens die Modelle der technischen Regelung, die eine Reduktion von Abweichungen bzw. Angleichung an eine Führungsgröße zum Ziel haben, hier nicht zielführend angewandt werden können. Auch die Versuche ASHBYS (1952), über die Begriffe der Ultra- und Multistabilität befriedigende Erklärungen zu erzielen, können für die Entwicklung eines Systems über seine bisherigen Grenzen hinweg keine Lösung anbieten.

#### 2.2.2.1. Der Begriff des dissipativen Systems

Zu Beginn der Siebzigerjahre wurde von PRIGOGINE et al. zunächst für chemische Reaktionen der Begriff des dissipativen Systems eingeführt. Es zeigte sich bald, daß hier anscheinend die Entwicklung eines allgemeinen Modells für offene Systeme begonnen wurde.

Da - wie bereits weiter oben beschrieben - das sensorische System als offenes System in permanentem Austausch mit seiner Umgebung zu betrachten ist, scheint auch hier dieses Modell anwendbar und das allgemeine Systemverhalten besser zu beschreiben als bisherige Modelle (JANTSCH, 1992).

Dissipative Strukturen (dS) sind Strukturen, die drei wesentliche Eigenschaften aufweisen:

1. Das System ist "offen", d.h. es steht in permanentem Austausch mit der "Umgebung" hinsichtlich Materie, Energie und Information.
2. Es befindet sich fern vom Gleichgewicht. Die scheinbare Stabilität wird über den Durchsatz von Energie, Materie und Information mit der Umgebung aufrecht erhalten.
3. Dissipative Strukturen umfassen mindestens einen auto- oder crosskatalytischen Prozeßbaustein. Dieses sogenannte nichtlineare Teilsystem arbeitet nach dem Prinzip der positiven Rückkopplung: Je mehr, desto mehr.

Ein dS evolviert durch die permanente Zufuhr von Energie und Information und zeigt dies durch Änderung seiner Struktur: Nach einem (linearen) Anstieg des Outputs bei gleicher Struktur erfolgt über eine mehr oder weniger lange Phase der Fluktuation die spontane Entwicklung der neuen Struktur. Dieser Prozeß wird laufend fortgesetzt.

Damit läßt sich die Ausbildung von Innervationsmustern, deren Vervollständigung und Speicherung, als Prozeßablauf eines dissipativen Systems beschreiben:

GEORGOPOULOS (ref. bei FISCHBACH, 1992) fand, daß die Absicht, den Arm in eine bestimmte Richtung zu bewegen, um z.B. einen Gegenstand zu ergreifen, elektrische Aktivität in Neuronenfeldern der motorischen Rinde erzeugt, die die gewünschte Richtung frequenzkodiert repräsentieren. Die Mittelung aller dieser kodierten Winkel stimmt wesentlich besser mit der angestrebten Richtung überein als bei jedem einzelnen Neuron allein, die Aktivität stand auch nicht in Verbindung mit der Kontraktion eines Muskels allein oder mit dem Kraftaufwand.

Dies zwingt nun einfach dazu, zunächst einmal zur Kenntnis zu nehmen, daß die auf den Gegenstand hin gerichtete Bewegung aus einer Salve von Innervationsimpulsen besteht, die mehr oder weniger exakt eine Aktion in "ungefähr die gewünschte Richtung" erzeugen.

Um jedoch trotz der unpräzisen Ausgangssalve zu einer befriedigenden Lösung der Aufgabe zu gelangen, ist es notwendig, daß die Bewegung des Armes zum Ziel während des gesamten Verlaufes beeinflußt wird (siehe die weiter oben gemachten Aussagen über die Schleifen über das Kleinhirn). Dazu ein Beispiel.

Soll die Hand durch eine Streckbewegung des Armes einen Apfel ergreifen, der in Reichweite liegt, genügt zunächst das Ansteuern des Zieles durch Armstrecken in die "ungefähre Richtung". Unter ständiger visueller Rückmeldung werden laufend Grobkorrekturen der Bewegungsrichtung angebracht. Je näher nun die Hand dem zu ergreifenden Gegenstand kommt, desto feiner müssen die Korrekturbewegungen sein. Das visuelle System wird beim tatsächlichen festen Ergreifen durch haptische Informationen und Korrekturen ergänzt.

Erst wenn diese Bewegung bei gleicher Ausgangssituation immer wieder ausgeführt wird, erfolgen weitergehende Änderungen:

*Über die sich wiederholenden Innervationsmuster entsteht ein synaptischer Lernprozeß: Die in gleicher Kombination auftretenden Verbindungen verstärken einander allmählich - es entsteht ein "gelernter" Ablauf, der gleichsam zwischen "allen Bewegungen gemeinsamen" und "spezifischen" Innervationen unterscheidet. Dieser hat allerdings dann den Nachteil, weniger Lücken für die Integration der Umgebung aufzuweisen. Es wird gleichsam "post factum", also unmittelbar nach dem Auftreten einer Affferenz re-agiert.*

Daher ist jeweils in Abhängigkeit von der verlangten Bewegung darauf zu achten, welche Anteile relativ starr und welche relativ offen zu gestalten sind: Es wird sicher ein Unterschied zwischen einer extrem dynamischen Bewegung (wie z.B. dem Kugelstoß) oder einer solchen mit hoher Wiederholungsgenauigkeit (seinerzeitige Pflichtfiguren im Eiskunstlauf) bestehen müssen!

#### 2.2.2.2. Modell: Dissipative Struktur und assoziativer Speicher

Wir können nun den Prozeß der Erzeugung der Innervationsmuster und damit der Bewegung als dissipatives System betrachten und daher wie folgt definieren:

Bewegung ist als Reaktion auf einen Reiz aus der Umgebung zu betrachten, die eine Veränderung (in) der Umwelt zur Folge hat. Die Zufuhr von Information (Reiz aus der Umgebung) erzeugt nun auf direktem Weg einen Output (Primärreaktion), der jedoch eine Sequenz von weiteren "Kreisen" zur Folge hat: Die Aktion in der Umwelt (Umgebung) ist damit Erzeuger weiterer Information durch Entstehen von Afferenzen aus folgenden Teilbereichen:

- Rezeptoren in exekutiven Körperteilen (Winkel-, Spannungsrezeptoren)
- Afferenzen aus der Wechselwirkung mit der Umgebung (Fremdreiflexe)
- Afferenzen aus höheren Sinnessystemen (visuell, akustisch, haptisch)
- Zufuhr aus intern erzeugter Information ("Nachdenken", "Beurteilen")

Wird die Bewegung nun häufig ausgeführt, so tritt in den wesentlichen Bereichen jener Mechanismus in Gang, der auch für die Ausbildung von Lernverbindungen zuständig ist: An den Orten häufiger gemeinsamer Nutzung entsteht Bahnung, und damit eine Verfeinerung des Musters. Da i.A. die Umgebung nicht exakt gleich gehalten werden kann, bilden sich nur jene Strukturteile stabil aus, die für die Ausführung der Bewegung in allen ähnlichen Situationen wesentlich sind.

Die Fähigkeit der Integration von Informationen unmittelbar an der Peripherie gibt Bewegungen jene Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, die permanent zu beobachten ist und die für die Bewältigung der Alltagsaufgaben auch notwendig ist: So ist bei einer Muskelverletzung des Beines das Laufen nicht prinzipiell unmöglich: Durch Abregeln des verletzten Teiles erfolgt eine Umschaltung aktueller Information auf das Grundmuster, das Laufen wird zwar noch grundsätzlich möglich, aber "schonend" erfolgen: Man hinkt.

Zur Erklärung der endgültigen Innervation bei Lokomotionen kann man daher mehrere Einflußgrößen annehmen, die zum aktuellen efferenten Output integriert werden (siehe dazu die Versuche MÖHLs, 1990, an Wanderheuschrecken):

1. das jeweilige aktuelle Grundmuster
2. die Umschaltung der Bewegungsfrequenz
3. Einflüsse aus der Umgebung, wie Boden, Wind
4. Reafferenzen aus dem Individuum (z.B. Verletzung)

Damit werden auch eindrucksvoll die Annahmen BERNSTEINs (1975), daß die endgültige Bewegungsinervation an der Peripherie erzeugt wird, bestätigt: Nach dem ersten Impuls der Ausführung (als Reaktion auf den Umgebungstreiz) folgen ganze Salven von Reaktionen, die durch die Bewegung in der Umwelt erzeugt werden.

Es wird nun zu überlegen sein, ob sich nicht auch andere Untersuchungsergebnisse mit Hilfe der Modelle der dissipativen Strukturen erklären lassen, wie z.B. Phänomene des Problemkreises "Wachstum durch Nutzung":

- Schneidet man Mäusen die Tasthaare ab, erfolgt keine Entwicklung des zugehörigen sensorischen Feldes (COWAN, 1987)
- Verbindet man jungen Katzen ein Auge, sodaß sie damit nichts sehen können, bleibt der entsprechende Bereich des Cortex unausgebildet (KALLIL, 1987; SINGER, 1987).
- Läßt man Affen ein isoliertes Übungsprogramm für bestimmte Finger absolvieren, so vergrößert sich das korrespondierende motorische Projektionsfeld im Cortex (KANDEL u.a. 1987).

Makroskopisch gesehen, wird hier Information in Struktur transformiert. Unter diesem Aspekt können aber auch alle anderen Strukturen betrachtet werden, die für bestimmte Funktionen im ZNS gefunden werden. Diese Überlegungen könnten aber auch dazu füh-

ren, den vielen Schaltkreisen im ZNS nicht nur die Funktion der Kontrolle und Abgleichung, sondern auch die der Evolution des Systems zuzuordnen.

Zu diesem Beitrag finden Sie ein Interpretorial auf Seite 109f.

### Literatur

- ASHBY, W.R., Design for a brain, London, Chapman & Hall Ltd, 1952
- BERNSTEIN, N.A., Bewegungsphysiologie, Sportmedizinische Schriftenreihe, Bd. 9, Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1975
- BIESOLD, VIATHIS, (Hg.), Neurobiologie, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1977
- BRAITENBERG, V.; SCHÜTZ, A., Cortex: hohe Ordnung oder größtmögliches Durcheinander? Spektrum der Wissenschaft, 5/1989
- BRODMANN, K., Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde, in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaus. Leipzig, 1909.
- CIOMPI, L., Die Hypothese der Affektlogik, Spektrum d. Wissenschaft, 2/1993
- COWAN, M., Die Entwicklung des Gehirns, Spektrum der Wissenschaft, Gehirn und Nervensystem, 1978
- ECCLES, J.C., Das Gehirn des Menschen (Original 1973: The Understanding of the Brain, Verlag McGraw-Hill 600k Company, New York). Durchgesehene Neuausgabe 1990, Serie Piper, München.
- ECCLES, J.C., ROBINSON, D.N., Das Wunder des Menschseins - Gehirn und Geist (Original 1984: The Wonder of Being Human. Our Brain and Our Mind. Free Press, New York, London). Neuausgabe 1991, Serie Piper.
- FINKE, R.A., Bildhaftes Vorstellen und visuelle Wahrnehmung Spektrum der Wissenschaft, 5/1986
- FISCHBACH, G.D., Gehirn und Geist, Spektrum der Wissenschaft, 11/1992
- FREEMAN, W.J., Physiologie und Simulation der Geruchswahrnehmung Spektrum der Wissenschaft, 4/1991
- FREUND, H.-J., Selbstorganisation des Zentralnervensystems, in: GEROK, s.d.
- GEROK, W. (Hg) Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart, 1989
- GOLDMAN - RAKIC, P.S., Das Arbeitsgedächtnis, Spektrum der Wissenschaft, 11/1992
- HAKEN, H., HAKEN - KREIL, M., Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung, DVA, Stuttgart, 1992
- HEBB, D.O., Organization of Behavior. New York: Wiley, 1949
- HERZ, A., Biochemische und pharmakologische Aspekte der Drogensucht, Spektrum der Wissenschaft, Gehirn und Nervensystem, 1987
- JANTSCH, E., Die Selbstorganisation des Universums, Hanser Verlag München, Wien Neuausgabe 1992
- JUNG, R., Einführung in die Sinnesphysiologie, in: GAUER, KRAMER, JUNG, Physiologie des Menschen, Bd. 11, Somatische Sensibilität, Geruch und Geschmack. Urban & Schwarzenberg, München, Berlin, Wien (1972)
- KAHLE siehe unter PLATZER/ LEONHARDT/ KAHLE (Band 3)
- KALLIL, R.E., Nervenverknüpfung im jungen Gehirn, Spektrum der Wissenschaft, 2/90
- KANDEL, E., HAWKINS, R., Molekulare Grundlagen des Lernens, Spektrum der Wissenschaft, 11/1992
- KLAUS G., LIEBSCHER H., Systeme - Informationen - Strategien VEB Verlag Technik Berlin, 1974
- KLAUS G., LIEBSCHER H. (Hg), Wörterbuch der Kybernetik, dietz - Verlag, Berlin, 1976
- KLIX, F., Information und Verhalten. Kybernetische Aspekte der organismischen Informationsverarbeitung VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1978
- KORNHUBER, H.H., Tastsinn und Lagesinn, in: GAUER, KRAMER, JUNG, Physiologie des Menschen, Bd. 11, Somatische Sensibilität, Geruch und Geschmack. Urban & Schwarzenberg, München, Berlin, Wien (1972)
- MÖHL, B., Die Flugsteuerung der Wanderheuschrecken, Spektrum der Wissenschaft, 7/1990
- NETTER, F.H., Farbatlant der Medizin, Bd. 5: Nervensystem I G. Thieme Verlag Stuttgart-New York, 1987

- NIEWENHUYNS, R., VOOGD, J., v. HUIZEN Chr., The Human Central Nervous System - A Synopsis and Atlas, Springer Verlag - Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio; 3. Auflage, (1988)
- PALM, G., Assoziatives Gedächtnis und Gehirntheorie. Spektrum der Wissenschaft 6/1988
- PLATZER, LEONHARDT, KAHLER: div - Atlas der Anatomie, insb. Bde 1 und 3, Deutscher Taschenbuchverlag & G. Thieme Verlag, Stuttgart, 1976
- POPPER, K.R., ECCLES J.C., Das Ich und sein Gehirn, R. Piper & Co. Verlag, München. 9. Auflage 1990
- ROUTHENBERG, A., Das Belohnungssystem des Gehirns, Spektrum der Wissenschaft, Gehirn und Nervensystem, 1987
- SCHMIDT, R.F., Propriozeptoren in Muskeln und Sehnen, in: GAUER, KRAMER, JUNG, Physiologie des Menschen, Bd. 11, Somatische Sensibilität, Geruch und Geschmack. Urban & Schwarzenberg, München, Berlin, Wien (1972)
- SCHAEFER, K.P., Vestibularapparat: Physiologie des zentralen vestibulären Systems, in: GAUER, KRAMER, JUNG, Physiologie des Menschen, Bd 12, Hören, Stimme, Gleichgewicht. Urban & Schwarzenberg, München, Berlin, Wien (1972)
- SEYFARTH, R., CHENEY, D., Wie Affen sich verstehen, Spektrum der Wissenschaft, 2/1993
- SINGER, W., Hirnentwicklung und Umwelt, Spektrum der Wissenschaft, 3/1985
- STEINBUCH, K., Automat und Mensch, Heidelberger Taschenbücher, Band 81, Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York; 4. Auflage 1971

Henning Eichberg

## Die Krise und die Gnade

### Über Fußball in Dänemark

#### Abstract: Crisis and Grace: Soccer in Denmark.

What is Danish in Danish football? The question marks a new horizon in the sociology of identity in an era of internationalization and Europeanization. But it also challenges us to find new methods to analyzing cultural particularity and societal relativity in body culture. Starting from differentiations between roligan (peaceful fan) vs hooligan and *dyst* (jousting) vs sport, the study proceeds from the class body over the configuration of space, time and product towards gender aspects and the culture of laughter, ending at the level of "flying", mystique and grace, at the phenomenological limits of what can be sociologically rationalized in body experience and body practice. But it is not least from the level (or this intermediary space) that the questions concerning identity in movement culture arise.

#### Zusammenfassung

Was ist das Dänische am dänischen Fußball? Die Frage bezeichnet einen neuen Horizont für die Soziologie der Identität im Zeitalter der Internationalisierung und Europäisierung. Aber sie fordert zugleich dazu heraus, neue Methoden zu finden, um kulturelle Besonderheiten und soziale Relativität im Bereich der Körperkultur zu erfassen.

Die vorliegende Studie geht von der Differenzierung des Fußballfan in den Roligan (den 'friedlichen' Fan) und den Hooligan aus sowie von der Unterscheidung zwischen *dyst* (Turnierkampf) und Sport. Sie schreitet vom Klassenkörper fort über die Konfigurationen von Raum, Zeit und Produkt zu den Aspekten der Geschlechtlichkeit und der Lachkultur. So gelangt sie schließlich an die phänomenologischen Grenzen dessen, was die Soziologie herkömmlicherweise an der Körpererfahrung und Körperpraxis realisieren kann. Aber es ist vielleicht gerade dies der Ort - oder Zwischenraum -, von dem her sich die Fragen der Identität der Bewegungskultur erheben.

"Niemand kann fliegen, natürlich nicht.  
Aber jetzt will ich dir mal etwas  
Seltsames erzählen..." (Hans-Jørgen Nielsen)

Warum sollte Fußball in Dänemark etwas anderes sein, als er in anderen Ländern ist? Also: ein Spiel nach internationalem Standard, von beachtlicher Popularität. Hochgradig unterhaltsames Treiben einer Elite von Spezialisten, das mittelmäßige Diskurse aus sich hervortreibt. Augenblicke höchster kollektiver Spannung und Euphorie auf dem Spielfeld, die sich auflösen in die Langeweile der - international auswechselbaren - Anekdoten und Erinnerungen. Das ist Fußball auch in Dänemark (Lundberg 1986-89).

Doch zugleich ist Fußball in Dänemark etwas anderes. Vielleicht etwas ganz anderes? Die äußere Erscheinung des Fußballfans gibt dazu Hinweise.

Hinsichtlich des Anhängerverhaltens im Fußball hat man international - für das Europa der 1980er Jahre - zwei Prototypen gekennzeichnet: den Hooligan und den Roligan (Williams/Goldberg 1989). Der gewaltbereite und gewaltsuchende Hooligan formte sich