

## 6. Kapitel

# Der Erwerb komplexer motorischer Fertigkeiten

*Alf C. Zimmer*

### *1 Die Rolle der Motorik in ingenieurpsychologischen Fragestellungen*

Verfolgt man die Entwicklungslinien der modernen Ingenieurpsychologie, dann wird deutlich, daß die Bedeutung kognitiver Faktoren ständig zunimmt (siehe Salvendy, 1987, oder Zeitschriften wie ‚Human Factors‘ oder ‚Ergonomics‘), aber von einer Bedeutung der Motorik kaum noch zu sprechen ist; lediglich vereinzelt tauchen Beiträge zum Nachführverhalten („tracking“) auf (siehe hier vor allem die Übersicht von Knight, 1987). Ähnliches ist im Bereich der Belastungsforschung zu beobachten: Während in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsumwelt vor allem auf physische Entlastung zielten (anfänglich durch Training und Mechanisierung, später durch Automatisierung), treten heute bei Untersuchungen zu arbeitsbedingten Belastungen nicht mehr physische, sondern vor allem psychische Belastungen in den Vordergrund, wie z. B. psychische Sättigung, Überforderungs- und Unterforderungsstress. Wenn es die Aufgabe der Ingenieurpsychologie ist, psychologisch begründete Kriterien für eine technische Bestgestaltung von Arbeitsumwelten zu erstellen, dann scheint die abnehmende Bedeutung der physischen Komponenten in der Arbeit und damit der motorischen Anforderungen kaum noch Anlaß zu geben, in diesem Rahmen die Motorik zu berücksichtigen.

Wie eine genauere Analyse von Arbeitsbedingungen jedoch zeigt, gibt es einige Bereiche, in denen weiterhin komplexe motorische Koordinationsaufgaben auftreten (z. B. das Führen von Fahrzeugen, Flugzeugen, Kränen oder Erdbewegungsmaschinen), die üblicherweise nur unter dem Gesichtspunkt der Mehrfachbelastung analysiert werden, wobei die motorischen Aspekte wie z. B. die zeitliche und räumliche Koordination oder die Koordination von Auge, Hand und Fuß meist als sekundär betrachtet werden. Diese Koordinationsaufgaben enthalten aber die Charakteristika von komplexen motorischen Leistungen, nämlich die regelhafte Abfolge von Aktionen und die Steuerung von Zeitdauer und Krafteinsatz durch Wahrnehmung. Diese Charakteristika komplexer motorischer Leistungen treten besonders deutlich auch bei Arbeiten auf, die vom

Ablauf her mit Schreibmaschineschreiben verwandt sind: Bedienung von Computer-Terminals oder von Schaltanlagen in Leit- bzw. Wartenstände. Die Zahl derartiger Arbeitsplätze nimmt aber zu, und da zumindest für die absehbare Zeit keine verlässlichen technischen Lösungen zur Umgehung der motorischen Anforderungen zu erwarten sind (z. B. haben sog. „voice-controlled systems“ eine hohe Fehlidentifikationsrate und können zudem nur für individuelle Nutzer angepaßt werden), bleibt die Analyse komplexen motorischen Verhaltens für ingenieurpsychologische Anwendungen eine wichtige, wenn auch vernachlässigte Aufgabe.

Im Kontext der Ingenieurpsychologie liegt es nahe, motorisches Verhalten systemtheoretisch zu betrachten, wie es in der Analyse von Nachführbewegungen üblich ist („tracking“; ursprünglich untersucht im Kontext von Flugabwehrleitung); implizit wird auch (so Salvendy, 1987) die Meinung vertreten, für den Bereich der Ingenieurpsychologie sei die Behandlung von Folgebewegungen für die gegebenen motorischen Anforderungen hinreichend. Daher ist es vorab notwendig, Nachführverhalten zu definieren und zu prüfen, inwieweit die ingenieurpsychologisch relevanten Aspekte der Motorik darauf zurückgeführt werden können.

Adams (1961) definiert die grundlegenden Eigenschaften des Nachführverhaltens folgendermaßen:

1. Ein extern vorgegebenes Signal definiert die Reaktion des Operateurs; diese wird durch die Manipulation eines Kontrollmechanismus durchgeführt.
2. Der Kontrollmechanismus generiert ein Ausgabe-Signal.
3. Die Differenz zwischen Eingabe- und Ausgabesignal ist die Fehlergröße des Nachführverhaltens; die Anforderung an den Operateur besteht darin, die Differenz auf Null zu bringen.

Folgende Probleme ergeben sich für die Generalisierung dieses Ansatzes auf motorische Anforderungen wie z. B. beim Schreibmaschineschreiben oder Kranführen:

1. Die Führungsgrößen für das Verhalten sind häufig intern (Pläne, Intentionen) und nicht durch ein externes Signal vorgegeben; darüber hinaus sind sie oft hoch komplex und lassen sich auf motorisch unterschiedliche Weise äquivalent realisieren.
2. Wegen dieser Äquivalenz verschiedener Realisierungen sind nicht Einzelbewegungen sinnvoll interpretierbar, sondern nur Bewegungsabläufe.
3. Die Unterschiede zwischen Vorgabe und Ausführung sind üblicherweise nicht quantifizierbar und schließen daher eine quantitative Systemanalyse aus. Allerdings sind qualitative Varianten systemtheoretischer Ansätze für Bewegungsverhalten z. B. von Hacker (1978) vorgeschlagen worden.

Interessanterweise treten aber selbst im Rahmen der Untersuchung von Nachführbewegungen Phänomene auf, die den systemtheoretischen Ansatz als nur eingeschränkt anwendbar erscheinen lassen. Es handelt sich dabei um Nichtlinearitäten des Systems, die entweder in der Vorgabe der Führungsgrößen (extern) oder in der Kontrolle (intern) liegen können. Externe Nichtlinearitäten (plötzliche Änderungen, Aufschaukelungsprozesse usw.) führen üblicherweise zu einer Verschlechterung, wenn nicht zum völligen Zusammenbruch im Kontrollverhalten des Operateurs. Interne Nichtlinearitäten (wie z. B. bei der drehzahlabhängigen Beschleunigung eines Fahrzeugs) erfordern entweder komplexe Steuerungsprozesse wie z. B. das Schalten in einen anderen Gang (d. h. eine Änderung des Systems) oder die gezielte Abweichung vom Kriterium der minimalen Distanz zwischen Vorgabe und Ausführung. Treten solche Nichtlinearitäten auf und können sie vom Operateur nicht aufgefangen werden (d. h. ihre Auswirkungen sind größer als die Fehlertoleranz des Systems), dann entfallen die formalen Vorteile einer Systembetrachtung, da keine *eindeutige* Systembestimmung mehr möglich ist.

Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoll, im Rahmen eines ingenieurpsychologischen Ansatzes ganz generell komplexes motorisches Verhalten zu untersuchen und sich nicht auf Nachführbewegungen (oder auch auf Zielbewegungen) zu beschränken. Da wegen der offensichtlichen konzeptuellen Nähe zwischen Ingenieurpsychologie und Systemtheorie in diesem Rahmen fast ausschließlich Nachführbewegungen untersucht worden sind, ist es für die Analyse komplexeren motorischen Verhaltens notwendig, auf Experimente aus dem Bereich der sportlichen Bewegungen zurückzugreifen. Deren Ergebnisse sind aber entweder direkt auf motorische Anforderungen bei ingenieurpsychologischen Fragestellungen (z. B. bei der Mensch-Computer-Interaktion) anwendbar oder sie präzisieren zumindest Fragestellungen für notwendige Untersuchungen. An diesem Beispiel läßt sich dies verdeutlichen: Bei kontinuierlicher Beschleunigung einer Gehbewegung kommt es zum sprunghaften Übergang zu Laufbewegungen (s. Abbildung 1), da — wie aus der Abbildung deutlich wird — Energieaufwand und Geschwindigkeit nichtlinear gekoppelt sind. Betrachtet man den Übergang vom Laufen zum Gehen bei Verlangsamung, läßt sich ebenfalls ein sprunghafter Übergang feststellen, aber bei einer niedrigeren Geschwindigkeit, d. h. es liegt eine Hysterese vor. Damit ist auch eine quasi-lineare Systemmodellierung dieses anscheinend so einfachen Vorgangs nicht mehr möglich; lediglich eine qualitative Modellierung im Rahmen der Theorie sprunghafter Veränderungen (Katastrophen-Theorie nach Thom, 1972) bietet sich an, ohne daß jedoch aus ihr abgeleitet werden könnte, nach welchen Kriterien der Laufende (der Operateur) den Übergang von der einen Bewegungsform in die andere wählt.

Geht man jedoch davon aus, daß hier zwei Bewegungsformen als gleichermaßen gut beherrschte Fertigkeiten vorliegen, und modelliert man diese Fertigkeiten entsprechend der in Abschnitt 4 dargestellten Schematheorie, dann ergibt

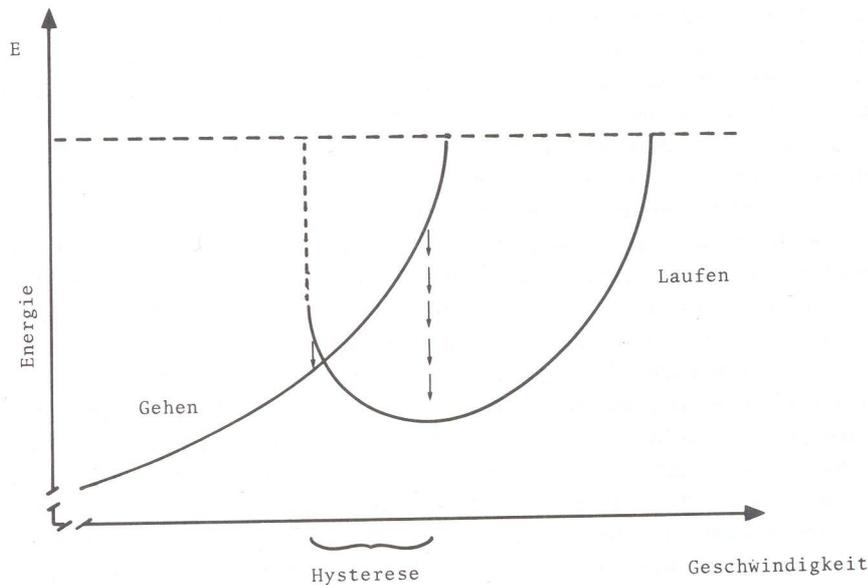


Abb. 1: Geschwindigkeits/Energie-Kurven des Gehens und Laufens mit sprunghaften Übergängen (1).

sich der Zeitpunkt des Überwechslns vom Laufen zum Gehen bzw. vice versa aus der Abgleichfunktion („trade-off“-Funktion) von Energieaufwand bei Beibehaltung der Bewegung und Steuerungsaufwand beim Wechsel. Solche Funktionen sind in der Regel nicht symmetrisch und führen daher zu dem in Abbildung 1 gezeigten Phänomen. Mit dem skizzierten Ansatz lassen sich Kontrollvorgänge im ingenieurpsychologischen Bereich modellieren, in denen Kontrolle durch Systemeingriffe zusammen auftreten.

Derartige Analysen sportmotorischer Prozesse lassen sich z. B. direkt auf die Probleme anwenden, die z. B. für einen geübten Typisten auftreten, wenn er von deutscher auf amerikanische Tastatur wechselt: Je nach Fertigungsgrad und Aufgabenstellung wird entweder die Fertigkeit des ‚blinden‘ Schreibens beibehalten (und werden die resultierenden Fehler toleriert) oder es wird auf das optisch kontrollierte Schreiben übergewechselt (und es werden als negative Konsequenzen Langsamkeit und höhere Belastung in Kauf genommen).

## 2 *Geschichtlicher Abriss der Motorikforschung und Zielsetzung des Artikels*

Betrachtet man die Geschichte der Behandlung von Fragen der Motorik in der deutschen Arbeitspsychologie, dann steht am Beginn die Untersuchung der Physik von Greif- und Schreitbewegungen (Schlesinger, 1919) im Zusammen-

hang mit der Konstruktion von Hilfsgliedern bei Amputierten. Etwa gleichzeitig wird in den USA von Taylor (1911) unter dem Begriff des ‚Scientific Management‘ aufgegriffen, was Muybridge seit ca. 1880 in seinen photographischen Studien des Zeitverlaufs von natürlichen Bewegungen untersucht hatte (Muybridge, 1887). Standen aber für Muybridge z. B. die Fragen nach Charakteristiken des Galopps im Gegensatz zum Trab im Vordergrund, verband Taylor (1911) die Untersuchung des Zeitverlaufs mit der Analyse der Physik zu bewogender Massen und kam damit zur Frage nach der Optimierung von Bewegungsabläufen bei fixierten physikalischen Rahmenbedingungen. Die eigentlich wissenschaftlich primäre Frage, wie nämlich solche Bewegungen von Akteuren gesteuert bzw. repräsentiert werden, umging Taylor (1911) pragmatisch, indem er ausschließlich *physikalisch* optimale Verläufe (minimale Schwerpunktverlagerungen, Minimierung der Anzahl und Dauer ungestützter Haltevorgänge, minimale positive und negative Beschleunigungen) definierte und trainierte. Warum das Training teilweise erfolgreich war und in anderen Situationen nicht, lag für ihn an Eigenschaften der Lernenden bzw. Fehlern des Trainingsaufbaus. Kurz gesagt kann man diese auf Muybridge, Schlesinger und Taylor zurückgehende angewandte Motorikforschung als *Motorik von außen* und mit physikalischen Methoden betrachtet definieren.

Die Grenzen des auf Taylor (1911) zurückgehenden physikalischen Ansatzes wurden dadurch deutlich, daß die „optimalen“ Bewegungsabläufe nur schwer trainierbar waren und dauerhaft interferenzanfällig blieben; seine Gedanken sind jedoch in der Biomechanik bzw. einer physikalisch orientierten Bewegungslehre (z. B. Meinel, 1976) aktuell geblieben, doch weist Schnabel in seiner Bearbeitung der 2. Auflage von Meinel auf die eingeschränkte Gültigkeit dieses Ansatzes hin und erörtert, wie eine Psychologie der Bewegung dem abhelfen könnte, ohne allerdings den physikalischen Rahmen zu verlassen.

Schlesingers (1919) ursprünglich ganz auf die Praxis der Erstellung von Ersatzgliedern ausgerichtete Erörterungen haben zur Zeit eine Bedeutung über diesen engeren Bereich hinaus für die „robot vision“ (Brady, 1983) erhalten, und zwar speziell für die Frage der „prehensility“, d. h. wie kann man aufgrund visuell erfaßbarer Objektmerkmale entscheiden, an welcher Stelle dieses Objekt *stabil* ergriffen werden kann. Neuere psychologische Studien zu dieser Frage stehen allerdings bis auf eher triviale Probleme aus (Erfassen von Flaschen am Hals durch Kinder ab 2;6 Jahren und älter). Wie Jeannerod (1984) nachgewiesen hat, sind beim Greifen eine allgemeine Zielbewegung und eine für den jeweiligen Gegenstand spezifische Greifbewegung zu unterscheiden. Beide Bewegungen sind zeitlich derart koordiniert, daß bei einer durchschnittlichen Bewegungszeit von ca. 800 msec nach ungefähr 3/4 der Zeit von schneller Annäherung bzw. Handöffnung auf langsames präzises Zielen bzw. eine genaue Anpassung des Griffes an den Gegenstand umgeschaltet wird.

Eine Motorikforschung, die sich an Regulationsprozessen des Akteurs orientiert, ohne die physikalischen Randbedingungen der Umwelt zu vernachlässigen, setzt zum einen Grundlagenerkenntnisse über Regulation voraus (z. B. das Reafferenzprinzip von v. Holst & Mittelstädt, 1950) und zum anderen eine Neudefinition der Motorik, nämlich als einer zwar beobachtbaren, aber durch Wahrnehmung und Intention geregelten Handlung wie z. B. in Bernsteins (1935) Modell des offenen Regelkreises. Bei diesem Vorgehen stehen prinzipiell prozessuale Komponenten (z. B. Lernbarkeit, Automatisierbarkeit) und strukturelle Komponenten (Form der internen Repräsentation, Fehlertoleranz) in Wechselwirkung.

Parallel zu den Ansätzen von v. Holst aus den 30er und 40er Jahren (v. Holst, 1935) und Bernstein (1935, 1957) — die beide spät, endgültig erst mit den Sammelbänden von Gallistel (1980) und Whiting (1984), in die gängige psychologische Motorikforschung Eingang gefunden haben — entwickelte sich eine taxonomisch orientierte Motorikforschung (zur Geschichte und zum neuesten Stand Fleishman & Quaintance, 1984). Diesem Ansatz liegen folgende Annahmen zugrunde: Die vielfältigen beobachtbaren Bewegungsformen, die durch Aufgabenanforderungen und Anatomie eingeschränkt sind, lassen sich leicht und eindeutig in „Elementar“-Bewegungen (operationalisiert durch Motorik-Tests) zerlegen; die Korrelationen zwischen diesen Tests führen zur Aufdeckung der Grunddimensionen der Motorik mit Hilfe der Faktorenanalyse. Abgesehen von den impliziten, aber die Gültigkeit des Ansatzes in Frage stellenden, vorwiegend technischen Annahmen (Operationalisierung durch Tests, Anwendung der Faktorenanalyse) gehen mit der Suche nach festen Dimensionen zwei gravierende inhaltliche Annahmen einher: 1. die beliebige Kombinierbarkeit der Komponenten und 2. die prinzipielle Unabhängigkeit der Dimensionen vom Kontext. Stärker noch als in der Thurstoneschen oder Guilford'schen Intelligenzforschung und in ähnlicher Weise wie in der komponenten-analytischen Semantik ist dieser taxonomische Ansatz nur von extrem eingeschränkter externer Validität, da diese beiden Bedingungen ähnlich wie in der Semantik auch in der Motorik praktisch nie gegeben sind, anders als in der Intelligenzforschung, wo Standardprobleme wie syllogistische Schlüsse o. ä. einen solchen Ansatz zu rechtfertigen scheinen (siehe aber auch dazu die Kritik in Wason & Johnson-Laird, 1975).

### *3 Motorische Fertigkeiten*

Im folgenden werden Theorien dargestellt, die sich mit molaren Aspekten der motorischen Regulierung (also motorische Fertigkeiten als Systeme bedingter Operationen; Neumann & Prinz, 1986) befassen. Eine Abfolge von Bewegungen wird als integrierte motorische Fertigkeit bezeichnet, wenn die sie konstituierenden Einzelbewegungen zusammen eine wohlgeordnete Struktur bilden („sequencing“) und jeweils zeitlich eindeutig strukturiert sind („timing“). Diese

Definition ähnelt formal der einer kognitiven Fertigkeit („cognitive skill“), die nach Anderson (1983) als wohlgeordnete Struktur von Produktionsregeln auf der Basis einer Wissenstruktur verstanden wird. Die entscheidenden Unterschiede dieser Fertigkeitsdefinitionen bestehen zum einen in der Zeitstruktur, die für eine motorische Fertigkeit, aber nicht für eine kognitive, von entscheidender Bedeutung ist und zum anderen im sogenannten Format der Wissensbasis: Während Anderson (1983) annimmt, kognitive Operationen griffen ausschließlich auf propositional gespeichertes Wissen zu, ist das Wissen, das der Produktion von Bewegungen zugrundeliegt, nicht auf ein Format beschränkt. Wie Engelkamp und Zimmer (1985) sowie Zimmer (1982) nachgewiesen haben, spielen neben diskreten Wissenskomponenten (propositional und symbolisch-motorisch) auch analoge (visuell und kinästhetisch) eine Rolle bei der Erzeugung von Bewegungen. Dabei kommt der metaphorischen Repräsentation eine spezielle Bedeutung in der Koordination von diskretem und analogem Wissen zu, da in metaphorischer Sprache diskrete sprachliche Komponenten mit analogen (bildhaften oder zeitlich strukturierten) verbunden sind (s. Abschnitt 6).

Ziele dieses Beitrags sind nicht so sehr Vollständigkeit und Ausgewogenheit, sondern die Aufarbeitung dieser Theorien für die speziellen Probleme des motorischen Lernens bei ingenieurpsychologischen Problemstellungen, nämlich: Automatisierung, Plastizität, Transfer und Interferenz bzw. Fehlertoleranz. Am Beispiel des motorischen Lernens im Sport werden diese speziellen Probleme im Rahmen eines schematheoretischen Modells diskutiert und paradigmatische Ergebnisse dazu vorgestellt. Sportmotorische Vorgänge sind im Gegensatz zu den sonst häufig untersuchten Zeigebewegungen oder dem Fingerklopfen hinreichend komplex, um die dabei gewonnenen Ergebnisse auf motorische Steuerung z. B. im industriellen Bereich (vom Kranführen bis zum Bedienen von Tastaturen) zu verallgemeinern. Ähnlich wie für Anderson (1983) bei seinen Ausführungen über kognitive Fertigkeiten wird die im folgenden dargestellte Entwicklung von Theorien motorischer Fertigkeiten dadurch motiviert, daß basale Bestimmungsstücke der Motorik, wie z. B. von Gallistel (1980) dargestellt, die Bedingungen für den Erwerb motorischer Fertigkeiten nicht hinreichend einschränken, so daß von einer gegebenen Ausführung nicht eindeutig auf die basalen Bestimmungsstücke zurückgeschlossen werden kann. Da zudem ähnlich wie im Bereich der kognitiven Fertigkeiten damit gerechnet werden muß, daß auch motorische Fertigkeiten domänen- oder kontextspezifisch sind, besteht ein Ziel dieser Darstellung darin, ein allgemeines Modell für die motorische Regelung zu entwickeln, in dem gleichermaßen Zustände und Prozesse repräsentiert sind. Domänenspezifische Fertigkeiten können so über eindeutig definierbare Verbindungen von Prozessen und Repräsentationen abgebildet werden.

Viele Situationen im Berufs- oder Freizeitleben zwingen auch Erwachsene, neue Fertigkeiten zu erwerben, die mehr oder weniger auf Bewegungen beru-

hen (Weimer, 1977). Diese Bewegungen sind entweder völlig neu (z. B. die Koordination von Pedaldruck und Steuerknüppelbewegung beim Fliegen) oder sie unterscheiden sich von Bewegungen, die im Verhaltensrepertoire auf die eine oder andere Art schon vorhanden sind (z. B. die Hebelbedienung eines Krans), wobei die neuen koordinativen Anforderungen dadurch entstehen, daß Verzögerungen bzw. Schwingvorgänge berücksichtigt werden müssen. Von außen betrachtet geschieht mit dem Lernenden in einer solchen Situation folgendes: Er nimmt eine Bewegung wahr, die jemand anderes ausführt, oder er hört, liest oder betrachtet eine verbale, symbolische oder bildliche Beschreibung einer Bewegung. Was der Lernende wahrnimmt oder versteht, nutzt er für das Einleiten und für die Kontrolle der Bewegung (siehe Rosenbaum, 1980). Die Ähnlichkeit zwischen der durchgeführten Bewegung und der Aufgabe, so wie sie beschrieben oder demonstriert ist, dient als Kriterium für die Durchführung des Lernenden. Gewöhnlich wird die Bewegung solange wiederholt, bis die neue oder die modifizierte alte Fertigkeit erworben wurde, das heißt, ein vorher festgelegtes Qualitätsniveau für die Durchführung erreicht ist oder der Lernende selbst den Eindruck hat, daß es „sitzt“, daß „es paßt“. Dies erinnert an die Test-Operate-Test-Exit- (TOTE) -Einheiten von Miller, Galanter und Pribram (1960) bzw. an die Vergleichs-Veränderungs-Rückkoppelungs- (VVR) -Einheiten von Hacker (1978). Jedoch bleibt in diesen Ansätzen unklar, wie durch das Wahrnehmen der Bewegung eines anderen oder durch die Beschreibung einer Bewegung Veränderungen beim Wahrnehmenden herbeigeführt werden können, die es ihm ermöglichen, dieselbe Aufgabe durchzuführen.

#### *4 Vergleich von Theorieansätzen zum Erwerb motorischer Fertigkeiten*

Psychologische Theorien über Bewegungslernen versuchen zu erklären, wie extern definierte Bewegungen erworben und so ein Teil des Verhaltensrepertoires werden. Diese Theorien können grob in folgende Kategorien klassifiziert werden:

1. der behavioristische Ansatz (paradigmatisch vertreten von Greenwald & Albert, 1968, oder Skinner, 1968, wo das Lernen des Hochsprungs analysiert ist). Dieser Ansatz konzentriert sich ganz auf die situationalen Variablen und die dazugehörenden Reaktionen;
2. der regelungstheoretische Ansatz (z. B. Adams, 1971; Bernstein, 1967), der sich auf die Regulationsprozesse der Bewegung konzentriert, das heißt die Modifikation von Bewegungen, die auf einem Vergleich der beobachteten Ergebnisse mit internen oder externen Kriterien beruht;
3. der Ansatz der internen Repräsentation (Bartlett, 1932; Hacker, 1978), der annimmt, daß Wahrnehmungs- wie regulatorische Prozesse durch interne Mo-

delle gelenkt sind; eine Spezifikation dieser internen Modelle sind „motorische Programme“ (siehe Henry & Rogers, 1960; Pew, 1966; Schmidt, 1975);

4. der schema-theoretische Ansatz (Arbib, 1980; Head, 1920; Norman & Rumelhart, 1983; Rumelhart & Norman, 1982; Schmidt, 1975; A. Zimmer, 1986), der durch die Annahme charakterisiert ist, daß generalisierte interne Verarbeitungsprozesse die Benutzung der Information in der Umwelt ermöglichen.

Eine Evaluation dieser Ansätze kann sich an Stelmachs und Diggles' (1982) Vorschlag orientieren. Theorien motorischen Verhaltens sollten in der Lage sein, folgende Phänomene zu erklären:

1. *Motorische Äquivalenz*: Offensichtlich können dieselben oder einander ähnliche Bewegungen durch Kombination völlig verschiedener Muskeln erzeugt werden. Eine direkte reliable Korrespondenz zwischen der produzierten Bewegung und den sie verursachenden neuronalen Vorgängen existiert nicht (Hebb, 1949; Lashley, 1938).
2. *Die Variabilität von Bewegungen*: Untersucht und registriert man Bewegungen, die identisch erscheinen, so stellt man trotz konstant gehaltener Ausgangsbedingungen Variationen in den kinematographisch oder elektromyographisch erfaßten Bewegungsabläufen fest, unabhängig davon, ob es sich um zyklische oder azyklische Bewegungen handelt (Bartlett, 1932; Gentner, Grudin & Conway, 1980; Glencross, 1980; Schmidt, 1975).
3. *Die Komplexität des motorischen Systems*: Die Komplexität des motorischen Systems läßt sich durch die Anzahl der unabhängig voneinander zu steuernden Freiheitsgrade des menschlichen Körpers verdeutlichen. Bernstein (1967) errechnet dafür 127, während die Zählweise von Tomovic und Bellmann (1970) 792 Freiheitsgrade ergibt. Daraus resultiert ein großer Steuerungsaufwand, der im System durch die Reduktion von Freiheitsgraden bewältigt werden muß. Eine adäquate Theorie motorischen Verhaltens muß Mechanismen spezifizieren, die eine solche Reduktion von Komplexität leisten können (Bernstein, 1967; Tomovic & Bellmann, 1970).

Der behavioristische Ansatz stellt sich diesen Kriterien nicht, da zum einen die funktionalistische Betrachtungsweise die Frage nach dem Zustandekommen von Bewegungen (oder allgemein: ‚operants‘) umgeht, und da zum anderen mentale Zustände (also auch systematische Veränderungen im Gedächtnis und die sogenannten Repräsentationsprobleme) aus der Forschungskonzeption ausgeschlossen werden. Bernsteins (1967) ursprünglicher Ansatz und Schmidts Ansatz (1975) erfüllen nur teilweise obigen Kriterienkatalog. Bernsteins regelungstheoretischer Ansatz ist vor allem auf die Frage konzentriert, wie die hohe Zahl physikalischer Freiheitsgrade reduziert werden kann; sein Lösungsansatz besteht in einem offenen Regelkreis, der allerdings die Annahme eines starren Programms zur Folge hat. Dies führt immer dann zu nicht überwindbaren Problemen, wenn Bewegungsabläufe ohne externe Rückmeldung verbes-

sert werden können. Adams (1971) versucht der Variabilität und Plastizität motorischen Verhaltens dadurch Rechnung zu tragen, daß er Regelung sowohl durch eine motorische wie auch eine perzeptuelle Gedächtnisspur annimmt. Diese zweifache Kontrollstruktur spezifiziert aber nicht die Koppelung ihrer zwei Subsysteme und ist zudem schwer auf komplexes Bewegungsverhalten übertragbar.

Schmidt (1975) bewältigt die Schwierigkeiten, indem er separate Erinnerungs- und Wiedererkennungsschemata einführt. Aber sein Ansatz reicht beim Kriterium der Komplexität des motorischen Systems nicht aus. Er berücksichtigt nicht, daß das Charakteristische an einer Bewegung sich ändert, wenn sie in eine Handlung von größerer Komplexität eingebunden ist. Zum Beispiel ist es ein Unterschied, ob „Arm hochheben“ im Funktionszusammenhang ‚Kommunikation‘ (Warnung etc.) oder im Funktionszusammenhang ‚Bedienung von Schaltern in Kopfhöhe oder darüber‘ (wie z. B. in Cockpits) steht. Wie der systematische Einfluß des Kontextes auf das Ausführen von biomechanisch äquivalenten motorischen Mustern zeigt, weisen Bewegungen und nicht biomechanisch definierte motorische Muster das Kriterium für kontrollierbare psychische Prozesse auf, das Pylyshyn (1979) prinzipielle kognitive Durchdringbarkeit („penetrability“) nennt. Nur wenn dieses Kriterium gegeben ist, kann es eine zentral gesteuerte Generierung der Bewegung geben, d. h. biomechanisch definierte Freiheitsgrade sind von Kontrollparametern für die Bewegungssteuerung zu unterscheiden; für die psychologischen Aspekte der Bewegungssteuerung sind ausschließlich diese von Bedeutung.

Der Ansatz der internen Repräsentation bei der Wahrnehmung wurde implizit von Gibson (1979) angegriffen, der darauf hinwies, viele Effekte, die normalerweise Prozessen an oder in solchen internen Repräsentationen zugeschrieben werden, könnten sparsamer mit der Theorie der „Affordances“ (Gibson, 1979) erklärt werden. Unter „Affordances“ ist das Informationsangebot der Umwelt zu verstehen, das sich phylogenetisch und ontogenetisch in der Mensch-Umwelt-Interaktion herausgebildet hat. Nach dieser Theorie ist Wahrnehmung durch die direkte Aufnahme von Information, die durch die Umwelt geboten wird, charakterisiert. Die Ergebnisse von Runeson (1977) zeigen, wie „intelligent“ Mechanismen sein können, die dem Prozeß der Aufnahme vorhandener Information unterliegen. Eine koordinierte Organisation von mehreren solcher Mechanismen zur Informationsaufnahme und zur Aktionsgenerierung scheint für komplexes Verhalten wie für als Einheit erlebte, trainierte Bewegungen nötig zu sein. Für Probleme dieser Art hat Neisser (1976) vorgeschlagen, Schemata bei Wahrnehmung und Kognition anzunehmen. Diese stellen dem Organismus die interne Organisation zur Verfügung, die für die adaptive Nutzung der Umweltinformation und für die Fähigkeit nötig sind, separate Bewegungen in ganzheitliche oder gestaltähnliche Fertigkeiten zu integrieren.

Die Anwendung des Schema-Ansatzes von Kant (1781) auf den Erwerb von Bewegungen geht zurück auf Head (1920); bei seiner Analyse von Bewegungen und der Wahrnehmung des eigenen Körpers (Propriozeption) versteht er Schemata ganz im Sinne Kants als aktive kognitive Prozesse, die eine Zuordnung von Empfindungen („Bilder“ bei Kant) zu Begriffen leisten und umgekehrt. Bartlett (1932) übernimmt den Begriff des Schemas für seine Psychologie des Gedächtnisses als „aktive Organisation vergangener Erfahrungen“ (a.a.O., S. 201) und wendet ihn auf die motorische Regulation u. a. beim Tennis an: „Wenn ich einen Schlag ausführe, dann produziere ich in Wirklichkeit nichts absolut Neues und ich wiederhole auch nicht lediglich Altes. Der Schlag wird tatsächlich aus den lebendigen visuellen und kinästhetischen ‚Schemata‘ des jeweiligen Augenblicks und ihren Wechselwirkungen hergestellt“ (S. 202, Übers. v. Verf.). Schmidt (1975) und Rosenbaum (1977) haben dieses Konzept in ihre Ansätze zum Bewegungserlernen einfließen lassen. Dort werden Schemata jedoch mit spezifischen Schablonen oder statischen Filtern identifiziert, von denen man nicht annehmen kann, daß sie die allgemeine organisatorische Funktion für eine aktive Auseinandersetzung mit der Realität erfüllen, die Neisser (1976) gefordert hat.

Schmidt (1975) integriert Adams' (1971) Modell eines geschlossenen Regelkreises für Zielbewegungen mit Ansätzen der „motorischen Programm“-Theorien (Pew, 1966), die über das einfache Steuerungsmodell analog einer „memory drum“ (Henry & Rogers, 1960) hinausgehen. Der für eine Schematheorie im engeren Sinn zentrale Begriff der Invarianz (s. Cutting, 1983) wird von ihm nur eher am Rande erwähnt, obwohl das angeführte Beispiel der Invarianz von zeitlichen und räumlichen Relationen bei Größenveränderungen hätte verallgemeinert werden können.

Arbib (1980) nimmt Handlungs-/Wahrnehmungszyklen analog zu Neissers Modell (1976) für den Erwerb von Bewegungen an und postuliert dann aber die Existenz von Schemata auf der Ebene neuronaler Strukturen. Dieser Ansatz liegt auf einer Linie mit der Annahme allgemeiner organisierender Funktionen, wie z. B. der von Kelso und Kay (1987) untersuchten Selbstorganisation von gekoppelten angeregten Oszillatoren bei einfachen Bewegungen, aber es scheint schwierig, auf dieser Grundlage eine Theorie komplexer motorischer Fertigkeiten im oben definierten Sinn aufzubauen, da die Rolle der zentralen Regulation in diesem Ansatz nicht berücksichtigt wird. Aus diesen Gründen wird im folgenden eine abstraktere Definition des Schemabegriffs gewählt; die Ansätze von Schmidt (1975) und von Rosenbaum (1980) sowie Arbibs (1980) Modell stellen jeweils Spezialfälle dieses allgemeineren Modells dar.

Diese abstraktere Definition basiert auf Cassirer (1944), der auf Kants Schema-konzept und auf gruppentheoretischen Modellen der Geometrie aufbaut, wie sie von Klein und Poincaré vorgeschlagen wurden. Dieser Ansatz bildet einen

Rahmen für die Integration von systemtheoretischen und schematheoretischen Gesichtspunkten bei der Analyse des Erwerbs von motorischen Fertigkeiten.

Ein Schema kann gemäß Cassirer (1944) durch folgende Bestandteile definiert werden:

1. durch eine Menge von basalen Einheiten („primitives“), die im gegebenen Kontext nicht weiter analysierbar sind: z. B. Reflexe und Oszillatoren, denen Bewegungen zugrunde liegen; siehe Gallistel, 1980; einige Theorieansätze reduzieren die Variabilität der basalen Einheiten noch weiter, so postulieren z. B. Kelso und Kay (1987) lediglich Systeme von angeregten Oszillatoren, bei denen Selbstorganisation i. S. Hakens (s. Haken, 1977) auftritt;
2. durch eine Menge von Organisationsregeln: z. B. die sogenannten Gestaltgesetze, bezogen auf Wahrnehmungs- und Gedächtnisprozesse, Runesons (1977) „intelligente“ Mechanismen bei der Wahrnehmung, Servomechanismen (s. Gallistel, 1980) und die oben angeführten Formen der Selbstregulation (s. a. Pattee, 1977);
3. durch eine Menge von zulässigen Transformationen, die die Klasse von Invarianten der betrachteten Objekte erzeugt (hier: Bewegungen, Bewegungsabläufe bzw. motorische Aktionen; so kann z. B. die motorische Aktion ‚Schreiben des Buchstabens X‘ aufgrund verschiedener Bewegungsabläufe von Hand bzw. Arm *invariant* realisiert werden).

Diese Definition hat eine wichtige Konsequenz: Die Schemata bestimmter Bewegungen können nicht nur entsprechend 1. und 2. auf ihre basalen Einheiten und deren Beziehungen reduziert werden, z. B. Zielbewegungen und deren zeitliche Ordnung oder Fingerklopfen und dessen Frequenz (siehe Summers, Sargent & Hawkins, 1984), sondern auch die Menge der zulässigen Transformationen dieser Fertigkeiten muß beachtet werden (z. B. der Rhythmus, der erhalten bleibt, wenn die Geschwindigkeit verändert wird). Diese Sichtweise von Bewegung wird — zumindest teilweise — durch Untersuchungen aus der Physiologie (s. Arbib, 1980) gestützt. Daß dieses Modell der funktionalen Struktur des motorischen Kortex entspricht, ergibt sich aus den Verhaltensauswirkungen bei operativen Abtragungen im motorischen Kortex (Pribram, 1971); dabei verschwinden komplexe motorische Fähigkeiten, einzelne Muskel-funktionen werden aber nicht beeinträchtigt. Pribram (1971) schließt daraus „... Bewegungsabläufe, nicht Muskeln oder Bewegungen, sind im Motorkortex encodiert“ (S. 14).

### 5 Paradigmatische experimentelle Untersuchungen zur Kontrolle von komplexem motorischen Verhalten

Wie in Abschnitt 1 ausgeführt, hat die an der Regelungstechnik orientierte Ausrichtung der Ingenieurpsychologie dazu geführt, daß in diesem Kontext vorwiegend Nachführverhalten untersucht worden ist. Aus diesem Grunde stammen experimentelle Untersuchungen zur Regelung komplexen Verhaltens aus den Bereichen ‚Sportmotorik‘ und ‚Schreibmaschine-Schreiben‘.

In einem Experiment über das Erlernen des „Schneidens“ im Tischtennis wurde von Zimmer (1983) der Einfluß von unterschiedlichen Instruktionmethoden auf die Generierung von verschiedenen motorischen Schemata für ein und dieselbe Aufgabe untersucht, wobei diese vom Standpunkt der Biomechanik eindeutig definiert war. Die beiden Instruktionmethoden waren „Lernen des zugrundeliegenden Prinzips“ (Gruppe 1), einschließlich der Konsequenzen für die Flugbahnen eines angeschnittenen Balles, und „Lernen durch Beobachten der korrekten Bewegung“ (Gruppe 2).

Im ersten Teil des Experiments lernten beide Gruppen das Überschneiden. Wie in einer ersten Analyse gezeigt werden konnte, wechselte Gruppe 1 vom Zustand der Nichtkompetenz (N) zum Zustand der Kompetenz (K) ohne Zwischenstadien direkt über. Im Gegensatz dazu zeigten die Versuchspersonen in Gruppe 2 die durchgängige Tendenz, starr die letzte verstärkte Bewegung zu wiederholen, ohne die veränderten Situationsvariablen in Rechnung zu stellen (z. B. die Geschwindigkeit des Balls etc.). Am Ende jedoch lernten beide Gruppen das Überschneiden, d. h. sie erlangten dasselbe korrekte motorische Muster. Die Diagramme der Zustands-Übergänge in Abbildung 2 (a und b) be-

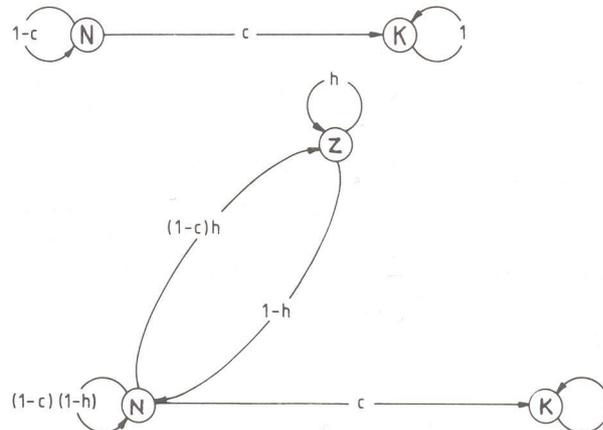


Abb. 2: Diagramm der Zustands-Übergänge für Gruppe 1 (a) und Gruppe 2 (b).

Anmerkung:

N zeigt den Anfangszustand, K den Endzustand und Z den Wiederholungszustand;  $c$ ,  $h$ ,  $(1-c)$ ,  $1$ ,  $(1-h)$ ,  $(1-c)h$  und  $(1-c)(1-h)$  sind die Übergangswahrscheinlichkeiten.

schreiben die Unterschiede in der Komplexität des Lernvorgangs bei den beiden Experimentalgruppen.

Im zweiten Teil des Experiments mußten die Versuchspersonen das Unterschneiden lernen. Diese Aufgabe wurde deshalb gewählt, weil von der Mechanik her gesehen die zugrundeliegende Invariante (der tangentielle Impuls auf den Ball) dieselbe für Über- und Unterschneiden ist. Jedoch sind die dazu benötigten Muskelbewegungen (d. h. die zu kontrollierenden Freiheitsgrade) völlig verschieden. Deshalb wurde erwartet, daß die Vermittlung der generalisierbaren Prinzipien der physikalischen Vorgänge beim Schneiden den Transfer erleichtern würde. Im Gegensatz dazu sollte ein motorisches oder visu-kinästhetisches Schema (wie man es für Gruppe 2 annehmen kann) nicht dazu führen, daß die neue Aufgabe ohne zusätzliche Übung beherrscht werden kann.

In Gruppe 1 konnten sechs von zehn Versuchspersonen das Unterschneiden (i. e. die Transfer-Aufgabe) spielen, während in Gruppe 2 nur eine von zehn Versuchspersonen es konnte. Die „erfolgreichen“ Versuchspersonen in Gruppe 1 hatten das Schema „Schneiden“ gelernt, das durch alle Transformationen von Handlungen charakterisiert ist, die eine Rotation des Balls verursachen und seine Flugbahn beeinflussen. Die Versuchspersonen in Gruppe 2 hatten nur das Schema „Überschneiden“ erworben und mußten das „Unterschneiden“ als neues Schema lernen. Wie jedoch die Zeiten zeigen, die für den Erwerb des neuen Schemas benötigt wurden, waren diese Versuchspersonen in der Lage, die vorangegangene Übung teilweise zu nutzen: Ihre Lernzeiten sind signifikant kürzer als die Lernzeiten der Versuchspersonen in Gruppe 1, die nicht die neue Aufgabe als eine Transformation des Schemas „Schneiden“ identifizierten. Nach diesen Ergebnissen gibt es bei der Reduktion von Komplexität durch Integration eines motorischen Schemas in eine interdependente Hierarchie eine wichtige negative Konsequenz: Eine integrierte Struktur erlaubt nicht ein Zunutzemachen von partiellem Wissen. Ein Beispiel für eine solche interdependente Hierarchie wird in Abbildung 3 gezeigt.

In diesem Graph sind Schemata aufwärts in eine Schemahierarchie integriert, was zu einer Reduktion der Komplexität des Systems führt und schließlich zu einer automatischen Ausführung der Aufgabe. Parallel zu der Integration nach oben legen jedoch die höher geordneten Schemata den niedriger angeordneten Schemata Randbedingungen auf. Eine solche Hierarchie, die nach oben integriert und nach unten Randbedingungen auferlegt, ist nicht im Sinn von Simon (1965) zerlegbar. Falls für eine andere Aufgabe nur ein Teil der Schemata mit niedrigerem Niveau nötig ist, können sie nicht einfach aus der Schema-Hierarchie getrennt werden, zu der sie gehören. Das Postulat der Randbedingungen nach unten unterscheidet dieses Modell von dem der Increasingly Complex Microworlds (ICMs), das von Burton, Brown und Fischer (1984) zum Erlernen des Skifahrens vorgeschlagen wurde. Wie im Gegensatz zu den Annahmen von Burton et al. (1984) experimentell gezeigt werden konnte, sind Fähigkeiten, die beim Skifahren integriert sind, für einen Transfer nicht mehr zugänglich, wenn ein hohes Durchführungsniveau erreicht wurde (Leist, in Vorbereitung). Dieses Ergebnis widerspricht der impliziten Annahme dieses Ansatzes, ICMs könnten als austauschbare Bestandteile beim Erwerb der Fertigkeit benutzt werden.

Die Konsequenzen der zerlegbaren versus der nicht zerlegbaren Repräsentation von Bewegungen sind von Körndle (1983) und Zimmer (1984) untersucht worden. Die allgemeine Hypothese unserer Experimente ist, daß das beschriebene Modell der Schema-

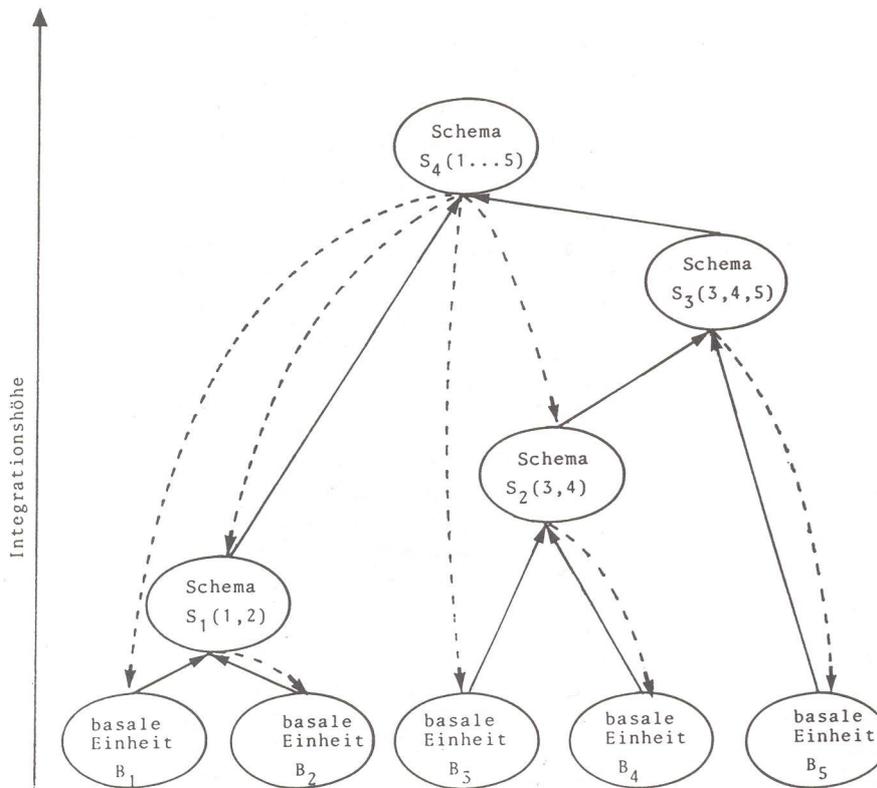


Abb. 3: Das Modell einer interdependenten Schemahierarchie mit Integration von unten nach oben und der Wirkung von Randbedingungen von oben nach unten.

*Anmerkung:*

Dies ergibt einen teilweise geordneten Baum, bei dem nur zwei Arten von Bögen (aufwärts und abwärts) angenommen werden. Horizontale Bögen, die zum Modellieren der Grenzwerte gemäß der Allokation der Aufmerksamkeit benutzt werden könnten, sind hier noch nicht implementiert worden (siehe dafür Abb. 7).  $S_4(1...5)$  bezeichnet das Schema, das auf dem Integrationsniveau 4 die basalen Einheiten  $B_1$  bis  $B_5$  integriert.

Integration dem Erwerb motorischer Fertigkeiten unterliegt, d. h. der vollständige Transfer von einer Aufgabe zu einer anderen ist nur möglich, wenn beide Aufgaben zulässige Transformationen desselben Schemas sind. Teilweiser Transfer (z. B. einige, aber nicht alle Teilfertigkeiten, die für eine Aufgabe nötig sind, sind es auch für die anderen) ist nur so lange möglich, wie die Teilfertigkeiten nicht in das übergeordnete Schema integriert, d. h. automatisiert sind.

Der beschriebene Mechanismus wurde in einem Experiment untersucht, bei dem Erwachsene das Pedalfahren lernten (ein Instrument, das z. B. benutzt wird, um den Gleichgewichtssinn bei motorisch behinderten Kindern zu trainieren).

Die Leistungsgüte der Versuchspersonen wurde gemessen, indem die Differenz zwischen der Soll-Geschwindigkeit, die von einem Metronom vorgegeben wurde, und der tatsächlichen Geschwindigkeit ausgerechnet wurde. In Abbildung 5 ist diese Differenz

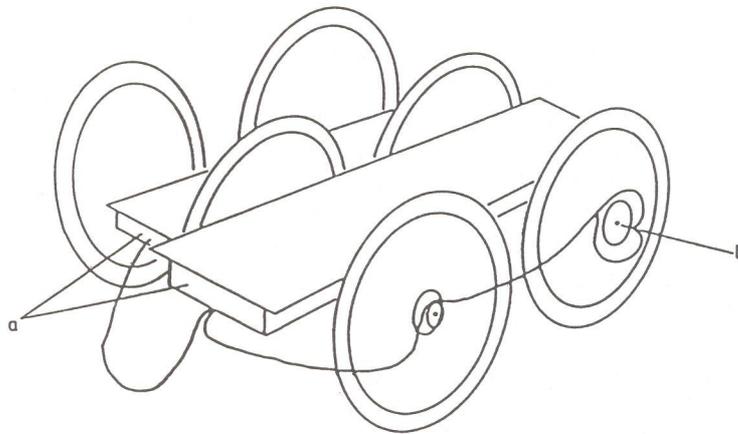


Abb. 4: Ein Pedalo, wie es in dem Experiment benutzt wurde, mit (a) Meßvorrichtungen für die horizontalen und vertikalen Kräfte und (b) einer zur Geschwindigkeitsmessung.

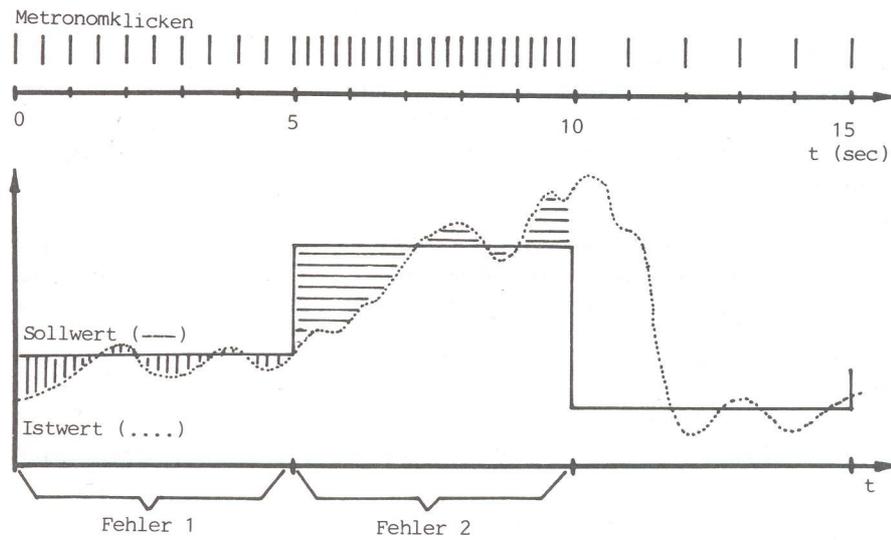


Abb. 5: Das Maß der Leistung beim Pedalofahren: die Differenz zwischen der vorgeschriebenen Geschwindigkeit (---) und der beobachteten Geschwindigkeit (.....) (das schraffierte Feld).

als schraffiertes Feld zwischen der Kurve, die die vorgeschriebene Geschwindigkeit angibt, und der tatsächlichen Pedalgeschwindigkeit, die von der Versuchsperson produziert wurde, gezeichnet.

Eine detaillierte Analyse der Bewegung, die dieser Performanz unterliegt, ist möglich, wenn man die vertikalen Kräfte (Druck), die horizontalen Kräfte (Schub) und die resultierenden Kräfte mißt. Typische Beispiele für diese Daten sind in Abbildung 6 für ein niedriges Performanzniveau (6a), für ein mittleres (6b) und für ein hohes Niveau (6c) dargestellt. Wie der Vergleich der wirksamen Kräfte bei den verschiedenen Leistungsniveaus zeigt, ist der Erwerb der Bewegung von einem zunehmend gleichmäßigen Fluß der wirksamen Kräfte begleitet (z. B. kleine Veränderungen in der Richtung und Stärke). Dies erreicht man durch Integration der getrennten Schub- und Druckaktionen in eine höhere Ordnung.

In einer Transferaufgabe (das Pedalo *rückwärts* fahren) wurde untersucht, wie die unterschiedlichen Leistungsniveaus in der ersten Aufgabe den Erwerb der neuen Fertigkeit beeinflussen. Wie erwartet war der Transfer aufgrund des beschriebenen Mechanismus der Schemaintegration bei den Versuchspersonen mit einem mittleren Niveau der Leistungsgüte am besten. Den Grund dafür kann man in der Abbildung 6b sehen: Versuchspersonen auf einem mittleren Niveau können Schub und Druck getrennt kontrollieren, aber nicht in der perfekten Koordination, die nötig ist, um eine glatte Bewegung auf dem Pedalo zustande zu bringen (z. B. wie bei einem hohen Niveau, dargestellt in Abbildung 6c). Da die Koordination von Schub und Druck beim Rückwärtsfahren anders ist, können die Versuchspersonen auf einem mittleren Niveau „Schub“ und „Druck“ als zerlegbare Teilfertigkeiten nutzbar machen (z. B. Schemata auf niedrigerem Niveau), um ein neues Koordinationsmuster aufzubauen, wogegen die Versuchspersonen mit hohem Leistungsniveau den Lernprozeß von neuem beginnen müssen.

Die verbalen Berichte der Versuchspersonen über die Aufgabe „Pedalofahren“ stimmen mit den Interpretationen der Leistungsdaten überein. Die Berichte des mittleren Stadiums waren sehr detailliert und bestanden zu einem großen Teil aus Beschreibungen von Wahrnehmung und spezifischen Bewegungen. In dem letzten Stadium berichteten die Versuchspersonen jedoch nur selten globale Strategien (z. B. „Ich versuche zu treten“).

Ähnliche Phänomene hat Lewin (1926) beim Schreibmaschineschreiben beobachtet:

... in Wirklichkeit ist jedoch das Schreiben der geübten Schreibmaschinistin nicht etwa ein gleichartiger, nur stärker geübter Vorgang wie der der Anfängerin, sondern ein psychologisch von Grund aus andersartiger Vorgang. Das Schreiben der Anfängerin stellt im wesentlichen ein Suchen nach den einzelnen Buchstaben dar. Ein derartiger Orientierungsprozeß läßt sich üben. Man kann Übung im Suchen bekommen. Es wäre jedoch völlig verkehrt, die Handlungen der geübten Schreibmaschinistin als ein derartiges geübtes Suchen charakterisieren zu wollen. Gewiß muß auch sie die einzelnen Tasten anschlagen. Aber selbst wenn man daraus theoretisch folgern wollte, daß immerhin irgendein Suchprozeß stattfinden müsse (in Wirklichkeit kennt die geübte Schreibmaschinistin ihre Maschine so gut, daß sie nicht mehr zu suchen braucht), so ist dieser

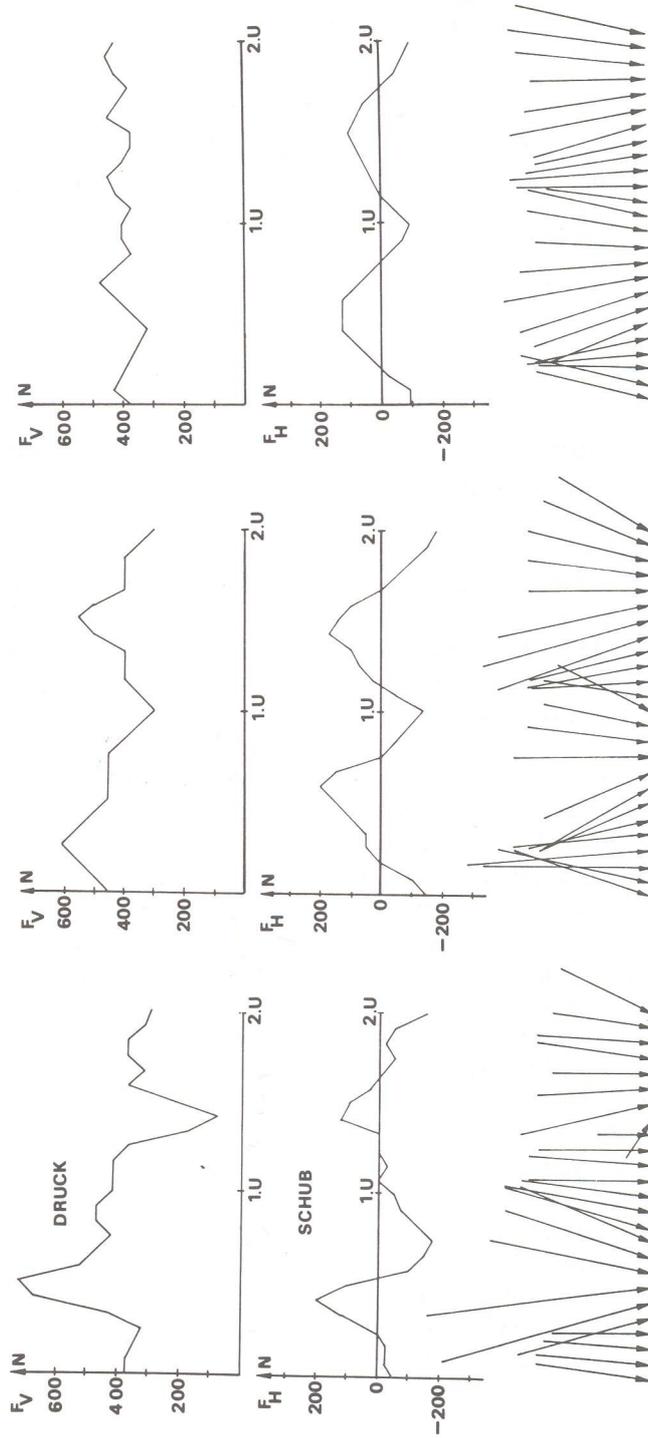


Abb. 6: (a) vertikale, horizontale und resultierende Kräfte beim Pedalfahren mit einem niedrigen Leistungsniveau bei zwei vollen Umdrehungen der Räder.  
 (b) dasselbe bei einem mittleren Leistungsniveau,  
 (c) dasselbe bei einem hohen Leistungsniveau.  
 Die Länge der Pfeile zeigt die Stärke der Kraft an, der Winkel zeigt die Richtung der angreifenden Kraft.

Vorgang hier jedenfalls zu einem völlig unselbständigen Moment in einem Gesamtgeschehen geworden, dessen Struktur von ganz anderen, hier nicht näher zu erörternden Fakten beherrscht wird. Diesen Gesamtprozeß kann man so wenig als ein Suchen charakterisieren wie etwa das Schreiben der Anfängerin als ein Fingerheben. (S. 306 f.)

Ähnlich beschreiben auch Norman und Rumelhart (1983) den Bewegungsablauf beim geübten Maschineschreiben als „... the movement of seagrass weaving in the waves ... all in motion at the same time“ (S. 47). In dieser Beschreibung wird besonders das Phänomen der Gleichzeitigkeit bzw. Überlappung von Bewegungsfolgen herausgehoben, das Rumelhart und Norman (1982; Norman & Rumelhart, 1983) angeregt hat, ein massiv paralleles Modell zu entwickeln (s. Teil 7).

### *6 Konsequenzen des integrierten Schemamodells der motorischen Steuerung für die Gestaltung von Training und Unterweisung*

Wie die Ergebnisse der erwähnten Experimente zeigen, liegt der beste Zeitpunkt für den Transfer vor dem Stadium, in dem nahezu perfekte Beherrschung (und damit zumindest eine teilweise Automatisierung) erreicht wird, weil hier die Einschränkungen in der Schemahierarchie nach unten die Nutzbarmachung der Teilfertigkeiten behindern, die von der ursprünglichen Aufgabe auf die neue Aufgabe transferiert werden müssen.

Die Analyse der Protokolle des lauten Denkens bzw. der strukturierten Befragung der Versuchspersonen zu den vorliegenden Aufgaben deuten auf eine Lösung des Problems der Verbindung zwischen Sprache und motorischer Kontrolle. So hat z. B. die häufig beobachtete anscheinende Unwirksamkeit verbaler Instruktionen für motorisches Lernen zur Empfehlung geführt, motorisches Lernen soll ohne verbale Instruktionen erfolgen. Das Sprachzentrum und das Zentrum, von dem die Bewegung gesteuert wird, sind — anatomisch gesehen — topologisch nahe und durch Neurone eng verbunden, was aufgrund der Korrelationen zwischen bestimmten Arten von Aphasien und Apraxien evident ist. Außerdem sind Sprache und Bewegung funktionsmäßig typisch für Prozesse in der linken Hemisphäre (Gazzaniga, 1970), d. h. sie sind in Richtung auf eine temporale und kausale Ordnung hin orientiert. Das Konzept der Schemahierarchie mit Integration nach oben und Einschränkungen nach unten löst das Problem der Koordination von Sprache und motorischer Kontrolle: Die Entwicklung von vielen Bewegungen (z. B. Gehen, Laufen, Springen und sogar Radfahren) und von verbaler Kompetenz finden gleichzeitig statt. Aus diesem Grund entwickeln Menschen spezifische verbale Etiketten für basale Einheiten von Bewegungen (z. B. die angemessene Spannung in der Fuß-Bein-Kombination zum Laufen) nur, *nachdem* die höher angeordneten Schemata (z. B. Laufen) automatisiert worden sind. Frühzeitig vorhandene verbale Etiketten wie „Springen“, „Laufen“ etc. gehören zu jenen höhergeordneten Schemata, die der

Zerlegung aufgrund des beschriebenen Mechanismus bei der Schemaintegration widerstehen. Für motorisches Training, vor allem beim sogenannten sensumotorischen Ansatz (Volpert, 1971) oder beim ICM-Ansatz von Burton et al. (1984), hat man versucht, das Problem des ungenügenden verbalen Repertoires für Bewegung zu umgehen, indem man exakte physikalische Beschreibungen oder Darstellungen der verlangten Bewegung gab. Diese Art von Instruktionen hat jedoch sehr häufig nicht funktioniert, da die physikalisch korrekte Beschreibung nicht in den Bezugsrahmen der sensorischen Erfahrungen der Akteure paßt (z. B. gibt es keine interne Repräsentation für „ungefähr 10 cm über dem Kopf“). Außerdem drängen diese Instruktionen den Aufgaben auf jeden Fall eine sequentielle Struktur auf, obwohl sie parallel ausgeführt werden müssen. Die dargestellte Schematheorie hat stattdessen zur Konsequenz, daß nicht solche scheinbar exakten sprachlichen (oder bildlichen) Beschreibungen zu Instruktionszwecken herangezogen werden, sondern übergeordnete Schemata, für die erfahrungsgemäß reiche verbale Etikettierungen existieren und die eine zur neuen Aufgabe äquivalente Struktur haben. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Zeitstrukturen, die die parallele Ausführung der Teilfertigkeiten steuern. Ein Werkzeug, das die Sprache für diese Art von verbaler Modifizierung der internen Repräsentation bereitstellt, sind Analogien und Metaphern (s. z. B. Ortony, 1979, oder Hohneck & Hoffman, 1980). Volger (1980) hat eine Reihe von Instruktionstexten in metaphorischer Sprache entwickelt (z. B. zum Skifahren oder Schwimmen) und die Effizienz dieses Ansatzes gezeigt. Wie die schematheoretische Analyse dieses Ansatzes zeigt, ist das Treffende der Metaphern und ihre instruktionsmäßige Effizienz durch das Aufdrängen einer neuen Randbedingungsstruktur auf eine bestehende Schematheorie verursacht. Die begleitenden Veränderungen bei den zulässigen Transformationen der zugrundeliegenden Schemata erlauben eine neue Zusammenstellung der zeitlichen und räumlichen Abfolge von Bewegungen. Dies ist für die motorische Regulation der neuen Fertigkeit nötig.

Diese Modellierung von Bewegungsabläufen durch interdependente Schemahierarchien erfüllt einerseits die von Stelmach und Diggles (1982) aufgestellten Kriterien für eine Theorie der Bewegungssteuerung und ermöglicht darüber hinaus die Identifikation von automatisierten Bewegungseinheiten, wenn man die Reihenfolge von Teilbewegungen als horizontale Randbedingungen zusätzlich in der Schemahierarchie abbildet. Eine solche Hierarchie stellt einen „vollständigen Baum“ im Sinne der optimalen Kodierungstheorie dar (siehe Abbildung 7) mit zyklischen und nicht-zyklischen Komponenten.

Eine in diesem Sinne automatisierte Bewegungsfolge wird vor allem durch die quasi-ballistische Form der Durchführung gekennzeichnet, d. h. wenn sie initiiert ist, kann sie — selbst bei der Registrierung von Fehlern — weder abgebrochen noch modifiziert werden. Darüber hinaus läßt sich aus den Übergangszeiten zwischen Bewegungsteilen bzw. -sequenzen der Grad der Automatisierung ablesen:

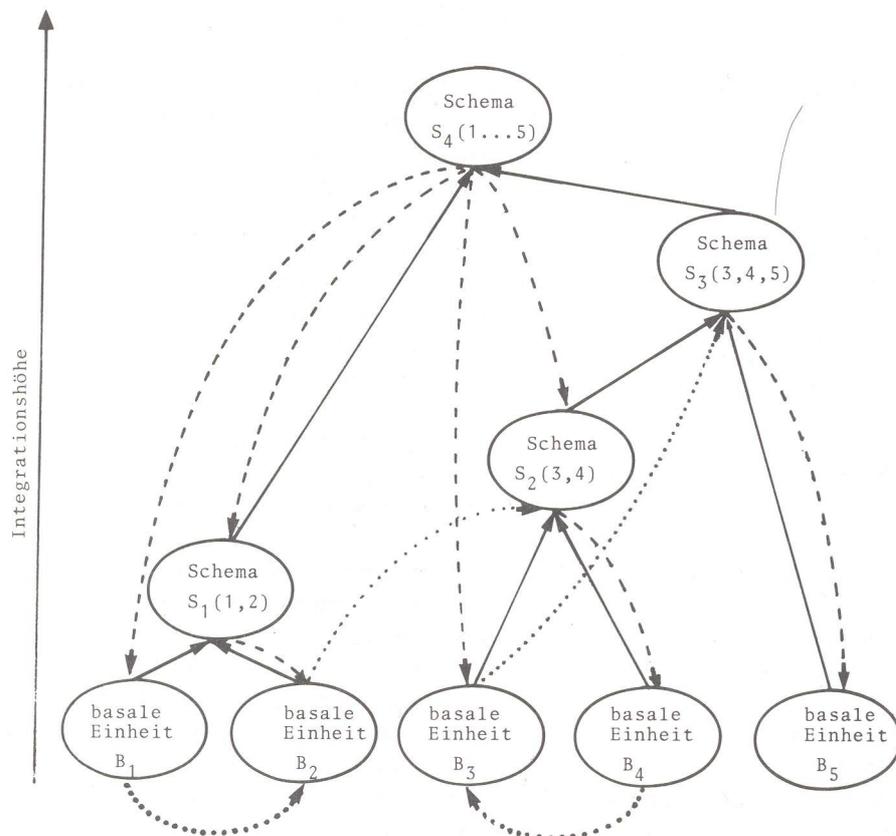


Abb. 7: Schema-Hierarchie mit vollständiger Baumstruktur. Die horizontal wirkenden Randbedingungen für Aufeinanderfolge und zeitliche Struktur regulieren das Ausmaß der für die Bewegungsdurchführung notwendigen Aufmerksamkeit (siehe Gopher & Navon, 1979).

1. Liegen die Übergangzeiten zwischen Bewegungsteilen deutlich unter den Zeiten, die für die Initialisierung neuer Bewegungsteile notwendig sind, dann ist die durch sie konstituierte Sequenz als automatisiert anzusehen,
2. liegen die Übergangzeiten zwischen Sequenzen im gleichen Größenbereich wie die oben genannten Übergangzeiten, dann ist die Folge der Sequenzen als automatisiert anzusehen.

Weitere Kriterien für Automatisierung sind in diesem Modell die Reduktion von Sequenzfehlern und die Robustheit gegenüber Interferenz.

Den positiven Konsequenzen der Automatisierung (Geschwindigkeit, Fehlerfreiheit, Stabilität gegenüber Interferenzen und daher geringe Anforderungen an die Aufmerksamkeit) steht als negative Hauptkonsequenz für das Bewegungslernen die Verhinderung spezifischen Transfers gegenüber, d. h. für einen

neuen komplexen Bewegungsablauf sind physikalische und physiologisch identische Bewegungsteile oder -sequenzen *nicht* aus dem automatisierten Bewegungsablauf herauslösbar; es kommt sogar bei Veränderung der horizontalen, den Rhythmus und die Abfolge steuernden, und der vertikalen Randbedingungen (Einschränkung der zulässigen Transformationen) zu negativem Transfer, der allerdings häufig deshalb unidentifiziert bleibt, weil er durch den unspezifischen Übungstransfer überdeckt wird.

Zusammenfassend läßt sich sagen: Die Ergebnisse der berichteten Experimente stützen das vorgeschlagene Modell für die Organisation von Bewegungen, wonach der Lernprozeß durch eine progressive Integration von Schemata mit niedrigerem Niveau in Schemahierarchien charakterisiert ist. Die verschiedenen Leistungsniveaus entsprechen den Integrationsniveaus: Beginnend mit einer reinen Ansammlung von Teilfertigkeiten mit niedrigem Schemaniveau wird ein erstes Niveau von Integration erreicht, wenn unabhängige Teilfertigkeiten grob koordiniert werden. In diesem Stadium sind die Teilfertigkeiten noch als Einheiten (Rumelhart, 1980) für alternative Koordinationsformen vorhanden. Wenn jedoch im letzten Stadium der Integration Einschränkungen nach unten die zulässigen Transformationen der Schemata auf niedrigerem Niveau behindern, ist die Schemahierarchie nicht mehr zerlegbar. Deshalb können dann ihre Bestandteile nicht einfach für alternative Fertigkeiten benutzt werden. Wird das Stadium der automatischen Durchführung erreicht, dann wird die Verringerung der für die Steuerung notwendigen Aufmerksamkeit damit erkaufte, daß sowohl die Abfolge von Teilbewegungen wie auch die zeitliche Struktur (z. B. Rhythmus) unverändert bleiben müssen.

### *7 Die Untersuchung von Handlungsfehlern bei motorischen Fertigkeiten*

Während das bisher dargestellte Modell an der Kontrolle kontinuierlicher Bewegungen orientiert war und damit Leistungsgüte analog gemessen wurde, ergibt sich bei der Analyse diskreter motorischer Fertigkeiten (z. B. Maschineschreiben, Pianospiele u. a.) die Möglichkeit einer *qualitativen* Fehleranalyse. Das Ziel einer solchen Fehleranalyse ist es dann, aus der Art der Fehler und der zeitlichen Struktur ihres Auftretens *Produktionsmodelle* für motorische Fertigkeiten zu erstellen. Solche Modelle spezifizieren, wie eine mentale Repräsentation der Fertigkeit die qualitativen Aspekte der motorischen Ausführung bedingt, ohne sich allerdings der Frage nach dem Zustandekommen der mentalen Repräsentation und dem Erwerb der Fertigkeit zu stellen. Daher und vor allem auch, weil diese Modelle von einer hierarchischen Schemastruktur der motorischen Fertigkeit ausgehen, sind sie als komplementär zu dem in Teil 6 beschriebenen Ansatz anzusehen.

Ganz allgemein lassen sich bei motorischen Handlungen zwei Grundkategorien von Fehlern unterscheiden:

1. Fehler, die auf einer Fehlinterpretation von Information oder auf deren Unvollständigkeit beruhen (z. B. Lesefehler beim Maschineschreiben) und die zu falschen Handlungsplanungen führen, und
2. Fehler, die bei der Ausführung einer an sich korrekten Handlungsplanung auftreten und z. B. durch Ermüdung, psychische Sättigung oder Interferenz durch andere Aktionen verursacht sind.

Um die Bedeutung der ersten Fehlerkategorie einschätzen zu können, ist es notwendig, die Informationsaufnahme für motorische Handlungsplanungen genau zu kontrollieren; Shaffer (1978) hat dies am Beispiel des Maschineschreibens gemacht. Dabei stellte sich heraus, daß geübte Typisten (100 Worte pro Minute) nicht mehr als neun Buchstaben voraus planen: Bei geringerem Informationsangebot sinkt die Leistung, aber bei einer Erhöhung bleibt sie gleich. Dies ändert sich aber, wenn anstelle von Worten (auch zufällig aneinandergereiht) sinnlose Buchstabenfolgen vorgegeben werden; in diesem Fall kommt es zu einer Leistungseinbuße von ca. 50 %. Vergleicht man die Informationsaufnahme auf verschiedenen Leistungsniveaus, dann stellt sich bei repetitiven Aufgaben wie Maschineschreiben heraus, daß ein Optimum für die Informationsvorgabe dann vorliegt, wenn diese in etwa mit dem Pensum übereinstimmt, das in ca. einer Sekunde motorisch ausgeführt werden kann. Wie der Vergleich darüber hinaus zeigt, beruht die schnellere motorische Ausführung der Worte darauf, daß schon bei der Handlungsplanung die Redundanz vertrauten Materials zu einer Optimierung führt.

Die Ausführungsfehler bei korrekter Handlungsplanung sind bisher ebenfalls am umfassendsten beim Maschineschreiben untersucht worden (Grudin, 1983); dabei treten neben Ausführungsungenauigkeiten (Anschlagen von zwei Tasten gleichzeitig) vor allem drei für die Frage der motorischen Steuerung wichtige Fehlerformen auf: 1) Austauschungen zwischen den Händen (a — h), 2) zwischen den Fingern (e — r) und 3) zwischen zwei Fingerpositionen (q — a). Bei der Analyse von Fehlerprotokollen wird deutlich: Für jede dieser Fehlerformen treten solche Fehler am häufigsten auf, die den richtigen Ausführungen am nächsten kommen (siehe die oben angeführten Beispiele); die Vertauschungen von zwei benachbarten Positionen des gleichen Fingers sind absolut am häufigsten zu finden. Nach dieser Fehlerverteilung ist zumindest beim Maschineschreiben die Ausführung hierarchisch geordnet (Hand — Finger — Position); nach weiteren Untersuchungen von Reason (1979, 1987) läßt die Häufigkeitsverteilungen von Ausführungsfehlern bei Fertigkeiten ganz allgemein darauf schließen, daß diesen eine hierarchische Struktur zugrundeliegt.

Shaffer (1982, aufbauend auf Reason, 1979), Norman und Rumelhart (1983) und Rumelhart und Norman (1982) haben Produktionsmodelle für die Fertig-

keit des Maschineschreibens entwickelt. Beiden Ansätzen ist die Annahme einer hierarchischen Struktur gemeinsam; sie unterscheiden sich aber hinsichtlich der Annahmen über die Generierung und Kontrolle der Bewegungen. Der Ansatz von Reason (1979) basiert auf einer Trennung von Planung und Ausführung; dabei wird davon ausgegangen, daß die mentale Verarbeitungskapazität auf jeweils einen Plan zur gleichen Zeit beschränkt ist. Die Vermittlung von der Planung zur Ausführung besteht in der Festlegung einer Sequenz von zu kontrollierenden Einzelaktionen; diese Einzelaktionen können aber durchaus aus mehreren, auch komplexen und parallel ablaufenden Bewegungen bestehen, sofern deren Koordination automatisiert ist. Fehler werden verursacht durch die Interferenz mehrerer Ausführungen bzw. durch das Versagen der angenommenen zentralen Instanz für die Kontrolle der Sequenzen („... loses its place“). Dies führt zu den nach Reason und Mycielska (1982) häufigsten Fehlerkategorien:

1. Unnötige Wiederholung von Einzelaktionen,
2. Ausführung der korrekten Einzelaktionen am falschen Objekt,
3. Einfügung nicht zum Plan gehöriger Einzelaktionen und
4. Auslassung von Einzelaktionen.

Das Modell von Reason (1979) wird vor allem durch die Daten von Shaffers (1982) Analyse des Maschineschreibens gestützt. Eine häufige Fehlerkategorie bei repetitiven Arbeiten widerspricht allerdings diesem Modell, nämlich das spontane Auslassen häufig nacheinander durchgeführter Einzelaktionen bzw. deren qualitative Veränderung durch das Zusammenbrechen der Koordination der Bewegungen, wie es z. B. bei psychischer Sättigung zu beobachten ist (Lewin, 1926).

Das alternative Modell von Norman und Rumelhart (1982), entwickelt am Beispiel des Maschineschreibens, setzt gerade an diesem und verwandten Phänomenen an, die auf inhibitorische bzw. exzitatorische Prozesse der Aktivierung zurückgeführt werden können. Norman und Rumelhart (1983) und Rumelhart und Norman (1982) gehen genauso wie Reason (1979) von einer hierarchischen Struktur der motorischen Fertigkeiten aus, wonach übergeordnete Schemata aus untergeordneten bestehen, unter denen wieder andere subsumiert sind. Anders als Reason wird aber nicht in Planung und Ausführung getrennt, sondern es wird angenommen, daß sich die Koordination der Ausführung aufgrund exzitatorischer und inhibitorischer Verbindungen zwischen den Schemata parallel organisiert. Damit wird jeweils die Aktion realisiert, deren sie kontrollierendes Schema am stärksten aktiviert ist (s. Abbildung 8). Dieses Modell unterscheidet sich in drei Hauptaspekten vom Modell in Abbildung 7: Es fehlen die Integration nach oben (der Aspekt des Fertigungserwerbs) und die horizontale Koordination (die Bildung einer Sequenz im Handhabungsplan nach Reason); dagegen weisen alle Schemata „Autoinhibition“ auf, die Mehrfach-

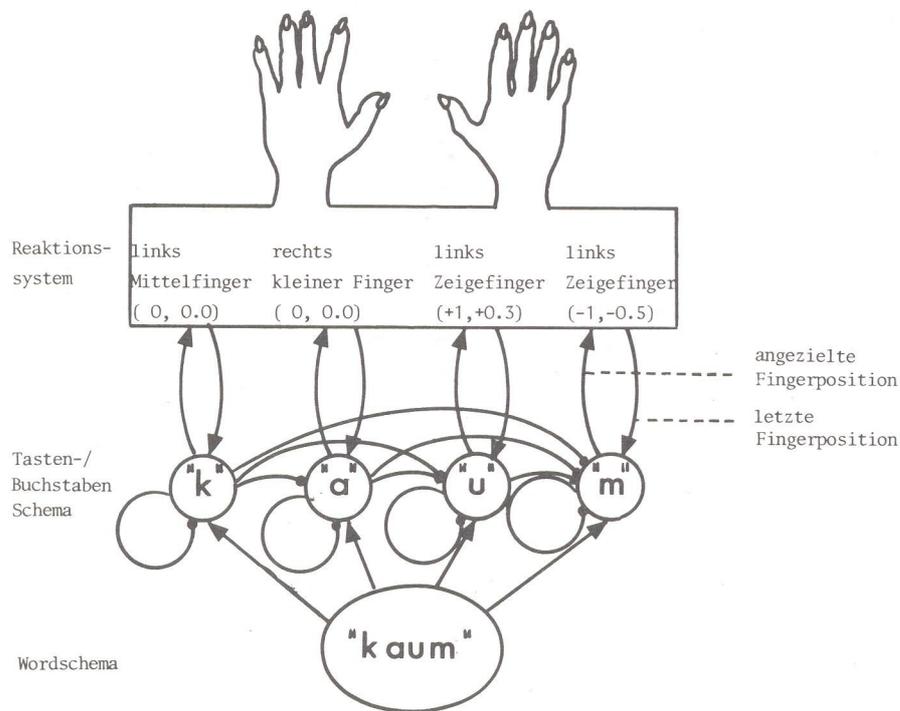


Abb. 8: Das Schemamodell von Rumelhart und Norman (1982) mit exzitatorischen ( $\rightarrow$ ) und inhibitorischen ( $-\bullet$ ) Verbindungen zwischen Schemata.

*Anmerkung:*

Im Reaktionssystem gibt die erste Zeile die aktivierte Hand an und die zweite den aktiven Finger. In Zeile 3 werden die Koordinaten für die Fingerbewegungen angegeben: zuerst oben (+1), mitte (0) und unten (-1), daneben stark (0,5) oder schwach nach außen (-) oder nach innen (+) verschoben (modifiziert nach Rumelhart & Norman, 1982, S. 12).

durchführungen verhindert, also dem Phänomen der psychischen Sättigung Rechnung trägt.

Wie Simulationsstudien mit diesem Modell gezeigt haben, wird die Häufigkeit von Vertauschungsfehlern beim Maschineschreiben korrekt vorhergesagt, allerdings wird die Häufigkeit von fehlerhaften Nichtwiederholungen („Mase“ statt „Masse“) extrem überschätzt. Eine weitere prüfbare Konsequenz dieses Modells ist, daß im Schnitt die Ausführung von Fehlern schneller sein sollte, als die Ausführung korrekter Aktionen, da bei diesen die vollständige Bewertung der Erregung aller infrage kommender Schemata abgeschlossen sein muß; Grudin (1983) hat allerdings keine Unterschiede finden können. Rosenbaum (1985) hat ein Produktionsmodell für motorische Aktionen vorgeschlagen, das die Ansätze von Reason (1979) bzw. Shaffer (1982) und Norman und Rumelhart (1983) sowie Rumelhart und Norman (1982) integrieren könnte. Dabei geht er von

einer Struktur aus, wie sie in Abbildung 7 gegeben ist, und interpretiert die horizontale Verbindung als „Schema X aktiviert Schema Y“.

### *8 Schlußbemerkung*

Wie die vorgestellten Theorieansätze, Modelle und Ergebnisse deutlich zeigen, gibt es auf dem Gebiet des Erwerbs und der Kontrolle motorischer Aktionen bislang noch keinen Ansatz, der den Kriterien von Stelmach und Diggles (1982) genügt und gleichzeitig die eindeutige Vorhersage von Lern- und Transferleistungen, Fehlern und Ausführungszeiten ermöglicht. Allerdings lassen sich aus den — wenn auch nur teilweise — erfolgreichen Modellen eine Reihe von Eigenschaften ableiten, die ein integratives Modell aufweisen müßte:

1. Schemata als Grundeinheiten
2. hierarchische Struktur der Schemata
3. multiple Verbindungen zwischen den Schemata
4. Koordination von sequentieller und paralleler Ausführung
5. Gegebenheit von Selbstorganisationsprozessen bei automatisierten Bewegungen.

Darüber hinaus lassen sich speziell für die Trainings- und Instrukionspraxis einige nicht-triviale Konsequenzen ableiten:

1. Das Fertigniveau beeinflusst den Lerntransfer derart, daß auf einem mittleren Niveau die Übertragbarkeit maximal ist.
2. Die Vermittlung von Funktionsmodellen in der Instruktion führt zu einem besseren Lerntransfer als die Beobachtung und Imitation erfolgreicher motorischer Aktionen.
3. Instruktionstexte und -material müssen sich an der Struktur der vorhandenen Fertigkeiten orientieren; d. h. sie dürfen nur kontrollierte oder kontrollierbare Aktionen behandeln.
4. Biomechanisch unterscheidbare Aktionen sind nicht unbedingt auch nach der Fertigkeitstruktur unterscheidbar; allerdings gilt das Gegenteil.
5. Handlungsfehler sind durch die Fertigkeitstruktur bedingt und ermöglichen daher im Rückschluß zumindest teilweise die Aufklärung dieser Struktur.

*Literatur*

- Adams, J. A. (1961). Human tracking behavior. *Psychological Bulletin*, 58, 55—79.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111—149.
- Anderson, J. R. (1983). *Cognitive skills and their acquisition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Arbib, M. A. (1980). Interfacing schemas for motor control. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 71—79). Amsterdam: North-Holland.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering*. Cambridge: University Press.
- Bernstein, N. A. (1935). *Untersuchungen zur Biodynamik der Bewegung (Normaler Gang, Belastung und Ermüdung)*. Moskau: Institut für Experimentelle Medizin (in russisch).
- Bernstein, N. A. (1957). Some emergent problems of the regulation of motor acts. Nachgedruckt in: H. T. A. Whiting (Ed., 1984), *Human motor actions. Bernstein Reassessed* (pp. 343—371). Amsterdam: North-Holland.
- Bernstein, N. A. (1967). *The coordination and regulation of movement*. New York: Pergamon Press.
- Brady, M. (1983). Criteria for representation of shape. In A. Rosenfeld & J. Beck (Eds.), *Human and machine vision* (S. 39—84). New York: Academic Press.
- Burton, R. R., Brown, J. S. & Fischer, G. (1984). Skiing as a model of instruction. In B. Rogoff & J. Lave (Eds.), *Everyday cognition: Its development in social context* (pp. 139—150). Cambridge/MA: Harvard University Press.
- Cassirer, E. (1944). The concept of group and the theory of perception. *Philosophy and Phenomenological Research*, 5, 1—36.
- Cutting, J. E. (1983). Four assumptions about invariance in perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 310—317.
- Engelkamp J. & Zimmer H. D. (1985). Motor programs and their relation to semantic memory. *The German Journal of Psychology*, 9, 239—254.
- Fleishman, E. A. & Quaintance, M. K. (1984). *Taxonomies of human performance*. New York: Academic Press.
- Gallistel, C. R. (1980). *The organization of action*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gazzaniga, M. W. (1970). *The bisected brain*. New York: Appleton Century Crofts.
- Gentner, D. R., Grudin, J. & Conway, E. (1980). *Finger movements in transcription typing*. (Tech. Rep. 8001) La Jolla Cal. University of California at San Diego, Center for Human Information Processing.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glencross, D. J. (1980). Levels and strategies of response organization. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 551—566). Amsterdam: North-Holland.

- Gopher, D. & Navon, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86, 214—255.
- Greenwald, A. G. & Albert, S. M. (1968). Observational learning: A technique for elucidating S-R mediation processes. *Journal of Experimental Psychology*, 76, 273—278.
- Grudin, J. T. (1983). Error patterns in novice and skilled transcription typing. In W. E. Cooper (Ed.), *Cognitive aspects of skilled typewriting* (pp. 121—144). New York: Springer Verlag.
- Hacker, W. (1973/1978). *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Haken, H. (1977). *Synergetics and introduction: non-equilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology*. Berlin: Springer.
- Head, H. (1920). *Studies in neurology*. Oxford: Oxford University Press.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York: Wiley.
- Henry, F. M. & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency in complicated movements and the „memory drum“ theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, 31, 448—458.
- Hohneck, R. & Hoffmann, R. (Eds.). (1980). *Cognition and figurative language*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Holst, E. von (1935). Über den Prozeß der zentralnervösen Koordination. *Pflügers Archiv der gesamten Physiologie*, 236, 149—158.
- Holst, E. von & Mittelstädt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaft*, 37, 464—476.
- Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16, 234—254.
- Kant, I. (1781). *Kritik der reinen Vernunft*. Leipzig: Hartknoch.
- Kelso, J. A. S. & Kay, B. A. (1987). Information and control: A macroscopic analysis of perception-action coupling. In H. Heuer & A. F. Sanders (Eds.), *Perspectives on perception and action* (pp. 3—32). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Knight, J. L., jr. (1987). Manual control and tracking. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors* (pp. 183—218). New York: Wiley.
- Körndle, H. (1983). *Zur kognitiven Steuerung des Bewegungslernens*. Unveröffentl. Diss., Universität Oldenburg.
- Lashley, K. S. (1938). Factors limiting recovery after central nervous lesions. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 88, 733—755.
- Leist, K.-H. (in Vorbereitung). Transfer beim Lernen von Bewegungshandlungen.
- Lewin, K. (1926). Untersuchungen zur Handlungs- und Affektpsychologie. Vorbemerkungen über die psychischen Kräfte und Energien und über die Struktur der Seele. *Psychol. Forschung*, 7, 294—329.
- Meinel, K. (1960/1976). *Bewegungslehre. Abriß einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt*. Berlin: Volk und Wissen.

- Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt.
- Muybridge, E. (1887). *Animal locomotion*. Rochester: G. Eastman House.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality*. San Francisco: Freeman.
- Neumann, O. & Prinz, W. (1987). Kognitive Antezedentien von Willkürhandlungen. In H. Heckhausen, P. M. Gollwitzer & F. E. Weinert (Hrsg.), *Jenseits des Rubikon: Der Wille in den Humanwissenschaften* (S. 195—215). Berlin: Springer.
- Norman, D. A. & Rumelhart, D. E. (1983). Studies of typing from the LNR research group. In W. E. Cooper (Ed.), *Cognitive aspects of skilled typewriting* (pp. 45—66). New York: Springer Verlag.
- Ortony, A. (Ed.). (1979). *Metaphor and thought*. Cambridge: University Press.
- Pattee, H. H. (1977). Dynamics and linguistic modes of complex systems. *International Journal of General Systems*, 3, 259—266.
- Pew, R. W. (1966). Acquisition of hierarchical control over the temporal organization of skill. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 764—771.
- Pribram, K. H. (1971). *What makes man human?* New York: Museum of Natural History.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). Validating computational models: A critique of Anderson's indeterminacy of representation claim. *Psychological Review*, 86, 383—394.
- Reason, J. T. (1979). Actions not as planned. In G. Underwood & R. Stevens (Eds.), *Aspects of consciousness* (Vol. 1, pp. 67—89). London: Academic Press.
- Reason, J. T. (1987). *Errors and violations: A framework for aberrant behaviors*. Fourth International Conference on Event Perception and Action, Trieste.
- Reason, J. T. & Mycielska, K. (1982). *Absent minded? The psychology of mental lapses and everyday errors*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Rosenbaum, D. A. (1977). *Processes of human movement initiation*. Unpublished doctoral dissertation. Stanford University.
- Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 444—474.
- Rosenbaum, D. A. (1985). Motor Programming: A review and scheduling theory. In H. Heuer, U. Kleinbeck, K. H. Schmidt (Eds.), *Motor behavior: programming, control, acquisition* (pp. 1—33). Berlin: Springer.
- Rumelhart, D. E. (1980). Schemata — the building of cognition. In R. J. Spiro, B. C. Bruce & B. F. Brewer (Eds.), *Theoretical issues in reading comprehension: Perspectives from cognitive psychology, linguistics, artificial intelligence, and education* (pp. 33—58). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Rumelhart, D. E. & Norman, D. A. (1982). Simulating a skilled typist: A study of skilled perceptual motor performance. *Cognitive Science*, 6, 1—36.
- Runeson, S. (1977). On the possibility of 'smart' perceptual mechanisms. *Scandinavian Journal of Psychology*, 18, 172—179.
- Salvendy, G. (Ed.). (1987). *Handbook of human factors*. New York: Wiley.

- Schlesinger, G. (1919). Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder. III. Künstliche Hände. In: *Ersatzglieder und Arbeitshilfen für Kriegsbeschädigte und Unfallverletzte*. Hrsg. von der Ständigen Ausstellung für Arbeiterwohlfahrt (Reichs-Anstalt) in Berlin-Charlottenburg und der Prüfstelle für Ersatzglieder (Gutachterstelle für das Preussische Kriegsministerium) in Berlin-Charlottenburg. S. 497—547. Berlin: Springer.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225—260.
- Shaffer, L. H. (1978). Timing in the motor programming of typing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 30, 333—345.
- Shaffer, L. H. (1982). Rhythm and timing in skill. *Psychological Review*, 89, 109—122.
- Simon, H. A. (1965). The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106, 467—482.
- Skinner, B. F. (1968). *The technology of teaching*. New York: Appleton Century Crofts.
- Stelmach, G. E. & Diggles, V. A. (1982). Control theories in motor behavior. *Acta Psychologica*, 50, 83—105.
- Summers, J. J., Sargent, G. I. & Hawkins, S. R. (1984). Rhythm and the timing of movement sequences. *Psychological Research*, 46, 107—119.
- Taylor, F. W. (1911). *Principles of scientific management*. New York: Harper & Row.
- Thom, R. (1972). *Stabilité Structurelle et Morphogénèse*. New York: Benjamin.
- Tomovic, R. & Bellmann, R. (1970). A system approach to muscle control. *Mathematical Bioscience*, 8, 265—277.
- Volger, B. (1980). *Metapher und Transfer im Sport*. Unveröff. Diplomarbeit, Universität Oldenburg.
- Volpert, W. (1971). *Sensumotorisches Lernen. Training und Beanspruchung 1*. Frankfurt: Akademie Verlag.
- Wason, P. C. & Johnson-Laird, P. N. (1972/1975). *Psychology of reasoning. Structure and content*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Whiting, H. T. A. (Ed.) (1984). *Human motor actions. Bernstein reassessed*. Amsterdam: North-Holland.
- Weimer, W. B. (1977). A conceptual framework for cognitive psychology: Motor theories of the mind. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting, and knowing* (pp. 267—311). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Zimmer, A. C. (1982). Do we see what makes our script characteristic — or do we only feel it? Modes of sensory control in handwriting. *Psychological Research*, 44, 165—174.
- Zimmer, A. C. (1983). Stadien beim Erwerb komplexer Bewegungsmuster. *Sportwissenschaft*, 3, 287—299.
- Zimmer, A. C. (1984). The role of internal representations in the acquisition of motor skills. In W. Kintsch (Ed.), *Proceedings of the Sixth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 365—373). Boulder: Institute of Cognitive Science.
- Zimmer, A. C. (1987). *Identifikation von automatisierten Bewegungsabläufen*. 29. Tagung experimentell arbeitender Psychologen. Aachen.