

# Kapitel 9: Psychomotorik

HERBERT HEUER, Bielefeld

Für hilfreiche Anmerkungen zu einer früheren Fassung dieses Kapitels danke ich ANDREAS ERNST, HANNELORE METZ-BERDELMANN, WOLFGANG PRINZ und HANS SPADA.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorbemerkungen</b> .....	497	<b>Koordination von Bewegungen</b> .....	520
<i>Mit der Bewegung hört alles auf</i> .....	497	<i>Über die Grundlagen der Koordination</i> .....	521
<i>Was erwartet Sie, wenn Sie weiterlesen?</i> .....	497	<i>Intersegmentale Koordination</i> .....	522
<b>Periphere Mechanismen der Bewegungssteuerung</b> .....	498	<i>Intermanuelle Koordination</i> .....	525
<i>Mechanische Eigenschaften von Muskeln</i> .....	499	<i>Rhythmen</i> .....	528
<i>Leistungen des Rückenmarks</i> .....	500	<i>Zielmotorik und Stützmotorik</i> .....	530
<i>Das Masse-Feder-Modell</i> .....	502	<b>Wahrnehmung und Bewegung</b> .....	531
<b>Regelung und Programmsteuerung</b> .....	506	<i>Aufruf motorischer Programme</i> .....	532
<i>Regelung</i> .....	506	<i>Visu-motorische Koordination</i> .....	534
<i>Regelung bei gezielten Bewegungen</i> .....	506	<i>Plastizität der visu-motorischen Koordination</i> .....	534
<i>Varianten der Regelung bei gezielten Bewegungen</i> .....	509	<i>Dynamische visu-motorische Koordination</i> .....	536
<i>Regelung bei der Benutzung von Werkzeugen</i> .....	509	<i>Spezifität der visu-motorischen Koordination</i> .....	537
<i>Programmsteuerung</i> .....	510	<i>Bewegungssteuerung und Erleben</i> .....	538
<i>Begründung des Konzepts</i> .....	511	<i>Visu-motorische Systeme</i> .....	539
<i>Bewegungen ohne periphere Rückmeldungen</i> .....	511	<b>Repräsentation von Bewegungen</b> .....	540
<i>Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn: Programmierung</i> .....	512	<i>Repräsentation einfacher Zielbewegungen</i> .....	541
<i>Generalisierte Bewegungsprogramme</i> .....	514	<i>Repräsentation von Bewegungsfolgen</i> .....	544
<i>Invariante Merkmale von Bewegungen</i> .....	515	<i>Sequenzen von Fingerbewegungen</i> .....	544
<i>Bewegungsprogramme und koordinative Strukturen</i> .....	517	<i>Sprechen</i> .....	546
<i>Das Zusammen wirken von Regelung und Programmsteuerung</i> .....	518	<i>Implizite Repräsentationen der Umwelt</i> .....	548
<i>Regelung und Programmsteuerung in verschiedenen Dimensionen</i> .....	518	<b>Bewegung und Vorstellung</b> .....	549
<i>Überwachung der Programmsteuerung durch einen Regelkreis</i> .....	518	<i>Interferenzen zwischen Bewegungssteuerung und räumlichen Vorstellungen</i> .....	549
<i>Abtast-Regelung</i> .....	519	<i>Funktionelle Äquivalenz von Bewegungen und Bewegungsvorstellungen</i> .....	551
<i>Parameter-Regelung</i> .....	520	<i>Mentale Übung</i> .....	552
		<i>Literaturverzeichnis</i> .....	554

## 1. Vorbemerkungen

### 1.1 Mit der Bewegung hört alles auf

Diese erste Überschrift im Kapitel zur Psychomotorik ist fast zwangsläufig, wenn das Kapitel zur Wahrnehmung mit der Überschrift «Mit der Wahrnehmung fängt alles an» beginnt. Zum einen sind Bewegungen in bestimmter Hinsicht das Gegenstück zu Wahrnehmungen: Was immer ein Lebewesen an Information aus der Umwelt aufnimmt - es geschieht durch die Wahrnehmung -, und was immer ein Lebewesen an Information an die Umwelt abgibt - es geschieht mit Hilfe von Bewegungen (abgesehen von einigen vegetativen Erscheinungen wie z.B. dem Erröten oder Schwitzen). Zum anderen ist auch die Lehre von den Bewegungen in gewisser Weise das Gegenstück zur Lehre von der Wahrnehmung: Letztere ist der historische Kern und eins der wichtigsten Teilgebiete der Allgemeinen Psychologie; Psychomotorik dagegen ist zwar auch ein altes Forschungsgebiet, aber es ist über Jahrzehnte stark vernachlässigt worden. Was sind die Ursachen für dieses geringe Interesse von Psychologen an Bewegungen?

Eine gewichtige Rolle scheinen die vorherrschenden Rahmenvorstellungen zu spielen. Solange sich die Psychologie zum Beispiel in erster Linie als eine Wissenschaft vom Erleben versteht, erscheint die Untersuchung von Bewegungen als Fremdkörper. Auch die behavioristische Richtung hat wenig über die Steuerung von Bewegungen zu sagen. Ein zweiter Grund kann in der - wohl auch unter Psychologen - verbreiteten Auffassung gesehen werden, daß Problemeder Bewegungssteuerung eigentlich gar keine psychologischen Probleme sind. Bewegungen stellen nach dieser Auffassung rein körperliche Vorgänge dar, die nichts mit Psychologie zu tun haben, wenn man von der Entwicklungspsychologie einmal absieht. Sie werden gewissermaßen als «Anhängsel des Seelenlebens» betrachtet. Als drittes schließlich mögen technische Probleme bei der Vernachlässigung der Psychomotorik eine Rolle gespielt haben. Besonders die Aufzeichnung

der Verläufe uneingeschränkter Bewegungen ist auch heute noch aufwendig und teuer.

Das dünne Rinnsal psychomotorischer Untersuchungen bis vor etwa 10-20 Jahren betraf zu einem großen Teil angewandte Probleme, z.B. der Übungsgestaltung oder der Vorhersage psychomotorischer Leistungen. Nur selten knüpften die Fragestellungen an Theorien der Allgemeinen Psychologie an. Ausnahmen sind z.B. Experimente aus der Leipziger Schule der Ganzheitspsychologie, aber auch eine Reihe von Untersuchungen zu den Konzepten der reaktiven und konditionierten Hemmung der Hullschen Lerntheorie. Dieses Bild hat sich in der jüngeren Zeit geändert. Markierungspunkte für das wachsende Interesse an der Psychomotorik stellen neben dem Erscheinen neuer spezialisierter Zeitschriften drei von Stelmach herausgegebene Bücher dar (STELMACH, 1976, 1978; STELMACH & REQUIN, 1980). Mit einiger Verzögerung folgten auch einschlägige Lehrbücher (z.B. KELSO, 1982; SCHMIDT, 1982; SMYTH & WING, 1984).

### 1.2 Was erwartet Sie, wenn Sie weiterlesen?

Bewegungen kann man auf unterschiedliche Arten analysieren. Zum einen sind sie physikalisch beschreibbare Änderungen der räumlichen Position verschiedener Körperteile. Man kann z.B. das Problem behandeln, auf welche Weise die Absicht, nach einem Gegenstand zu greifen, tatsächlich ausgeführt wird. Wie sieht die räumliche Bahn der Hand zum Objekt aus? Welche Prozesse liegen dieser Leistung zugrunde? Wie hängt sie mit anderen Funktionen wie z.B. Wahrnehmung oder Vorstellung zusammen? Antworten auf diese Fragen sollten Grundlagen liefern für die Lösung angewandter Probleme etwa im Bereich der Sport-, Arbeits- oder Klinischen Psychologie, und mit solchen Fragen befaßt sich dieses Kapitel.

Eine Vielzahl von Bewegungen kann man aber auch auf eine andere Art beschreiben. Sie stellen nicht nur Änderungen der räumlichen Position von Körperteilen dar, sondern haben gleichzeitig eine Bedeutung. Deutlich wird das beim Tanzen oder Gestikulieren. In einem ge-

wissen Sinne kann man also von einer «Semantik von Bewegungen» sprechen. Dieser Bedeutungsaspekt von Bewegungen wird im folgenden vollständig vernachlässigt werden. Er wird jedoch in Kapitel 7 (Emotionen) behandelt.

Analog der Abhängigkeit der Wahrnehmung vom Aufbau unserer Sinnesorgane hängen auch Bewegungen z.T. vom Aufbau unseres Skeletts und unserer Muskulatur ab. Die folgenden Abschnitte beginnen daher mit einer kurzen Darstellung solcher Muskeleigenschaften, die Konsequenzen für die Eigenschaften von Bewegungen haben. Dann folgt ein längerer Abschnitt über die zentrale Steuerung willkürlicher Bewegungen, in dem grundlegende Konzepte wie das des Bewegungsprogramms eingeführt werden. Da eine einzelne Bewegung selten isoliert auftritt, sondern in der Regel

kombiniert mit anderen, betrifft der nächste Abschnitt die Koordination verschiedener Bewegungen.

Einige Bewegungen müssen wir fortlaufend an eine veränderliche Umwelt anpassen - das Dribbeln beim Fußball oder auch der Schlag mit dem Tennisschläger sind Beispiele dafür. Solche Bewegungsmuster werden als offene Fertigkeiten («open skills») bezeichnet. Andere Bewegungen dagegen, die als geschlossene Fertigkeiten («closed skills») bezeichnet werden, finden in einer gleichbleibenden Umwelt statt oder in einer Umwelt, deren Änderungen für den Bewegungsverlauf irrelevant sind, - Beispiele dafür sind das Geräteturnen, das Sprechen oder das Klavierspielen. Der Anpassung von Bewegungen an die wahrgenommene Umwelt und der inneren Repräsentation geschlossener Fertigkeiten sind zwei weitere Abschnitte gewidmet. Als letztes schließlich soll der Zusammenhang zwischen Bewegungen und kognitiven Aktivitäten, insbesondere räumlichen Vorstellungen, besprochen werden. Spätestens nach der Lektüre dieses Abschnitts sollte deutlich geworden sein, daß die Steuerung von Bewegungen kein «Anhängsel des Seelenlebens» ist, sondern ein integrierter Bestandteil.

## 2. Periphere Mechanismen der Bewegungssteuerung

Eine der einfachsten und im Alltag häufigsten Bewegungen ist die gezielte Bewegung von einer Startposition zu einer Zielposition. Abbildung 1a zeigt links eine typische Weg-Zeit-Kurve, bei der die Position des bewegten Körpergliedes in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt ist. Diese Kurve ist in der Regel S-förmig und unsymmetrisch. Die Annäherung an das Ziel erfolgt langsamer als die Entfernung vom Start.

Die Kurven in Abbildung lastammenvon trainierten Rhesusaffen, deren Ellbogengelenk auf dem Drehpunkt eines horizontalen Hebelarms ruhte. Der Unterarm war mit dem Hebelarm verbunden. Die Position des Hebelarms, die bei dieser Anordnung mit der des Unterarms identisch ist, wird durch einen Winkel an-

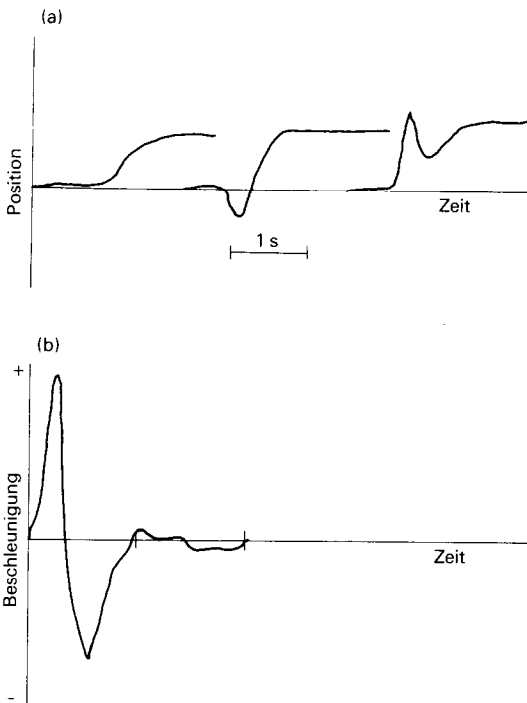


Abbildung 1: Verlaufsmerkmale gezielter Bewegungen. (a) Weg-Zeit-Kurve einer ungestörten Bewegung (links) und zweier Bewegungen, bei denen das bewegte Körperglied kurz vor Bewegungsbeginn vom Ziel weg verlagert wurde (Mitte) oder auf das Ziel hin (rechts; nach POLIT & BIZZI, 1979, S.186). (b) Beschleunigungs-Zeit-Kurve (nach HEUER, 1981, S.86).

gegeben; ein Wert von 0 entspricht der Startposition.

Eine gleichartige Versuchsanordnung wurde bei der Registrierung der Beschleunigungs-Zeit-Kurve in Abbildung 1b verwendet. Allerdings stammt sie von einem Menschen. Diese Kurve erhält man durch zweimalige Ableitung der Weg-Zeit-Kurve nach der Zeit. (Die einmalige Ableitung ergibt die Geschwindigkeits-Zeit-Kurve.) Beschleunigungs-Zeit-Kurven sind vor allem deshalb von Interesse, weil die Beschleunigung der Kraft proportional ist (bzw., wie im Fall von Abb. 1b, die Drehbeschleunigung dem Drehmoment). Zunächst findet sich eine große positive Beschleunigungsphase; sie ist der relativ schnellen Entfernung vom Start zugeordnet. Dann folgt eine länger dauernde Phase negativer Beschleunigung (Bremsphase), deren Maximum kleiner ist und die der langsamen Annäherung an das Ziel zugeordnet ist. Nach diesen beiden Hauptphasen folgen oft weitere Phasen mit sehr viel kleineren Amplituden.

Wie kommen die in Abbildung 1 gezeigten Verlaufsmkmale gezielter Bewegungen zustande? Man kann zunächst die Auffassung haben, daß sie in allen Einzelheiten das Ergebnis zentraler Steuerung sind und somit Gegenstand der psychologischen Theorienbildung. Die Analogie eines Pendels zeigt aber, daß diese Auffassung sicherlich falsch ist. Die Bewegungen des Pendels hängen nicht nur von den Bewegungen der Hand ab, die das Pendel hält, sondern auch von den mechanischen Eigenschaften des Pendels selbst, z.B. seiner Länge und seinem Gewicht. Bewegungen der Hand entsprechen den zentralen Kommandos an die Muskulatur, das Pendel entspricht der Körperperipherie. Die Analogie zeigt also, daß die Verlaufsmkmale unserer Bewegungen zu einem Teil durch die mechanischen Eigenschaften von Muskeln und Knochen bestimmt sein dürften.

PEW (1984) betont, daß die Eigenschaften von Bewegungen, die sich auf die Mechanik der Körperperipherie oder auf Leistungen niederer Zentren des Zentralnervensystems zurückführen lassen, keiner psychologischen Theorie bedürfen. Trotzdem sind auch für einen Psychologen rudimentäre Kenntnisse dieser Eigenschaften erforderlich. Er muß wissen, was

durch eine psychologische Theorie nicht erklärt werden muß. Welchen Beitrag leistet also die Körperperipherie zur Steuerung von Bewegungen? Zunächst sollen mechanische Eigenschaften von Muskeln betrachtet werden, dann einige Leistungen des Rückenmarks und schließlich die Konsequenzen für Verlaufsmkmale von Bewegungen.

## 2.1 Mechanische Eigenschaften von Muskeln

Ein Muskel entwickelt eine Kraft. Diese Kraft hängt unter anderem von seiner Länge ab. Bei zunehmender Länge - der Muskel wird gedehnt - steigt seine Kraft auch dann, wenn er gar nicht aktiv ist. In dieser Hinsicht ist er einem Gummiband ähnlich. Wie stark aber die Kraft des Muskels mit seiner Länge ansteigt, hängt davon ab, wie stark er durch die Motoneurone des Rückenmarks oder, im Experiment, durch künstliche Reizung aktiviert wird.

Die Abbildung 2 zeigt die Kraft eines Muskels in Abhängigkeit von seiner Länge (RACK & WESTBURY, 1969; im speziellen Fall handelt es sich um einen Wadenmuskel der Katze). Die verschiedenen Kurven stammen aus Experimenten, in denen der Muskel mit unterschiedlichen Frequenzen gereizt wurde. Bei jeder Reizfrequenz wurde er auf verschiedene Längenge dehnt, und die Kraft wurde gemessen. Bei der kleinsten Frequenz von 3 Imp/s wächst die Kraft erst dann, wenn die Länge des Muskels schon relativ groß ist, und der Anstieg der Kraft bei weiter zunehmender Länge ist auch nur gering.

Wenn der Muskel mit zunehmend höherer Frequenz gereizt wird, ändern sich die Kurven in Abbildung 2 in zweifacher Weise. Zum einen beginnt die Kraftentwicklung bei zunehmend kleinerer Länge, und zum anderen wird der Anstieg der Kraft mit der Länge steiler. Dieser Anstieg ist zunächst etwa linear, beim speziellen Muskel bis etwa 1.5 kp. Beschränkt man sich auf diesen Teil der Kurven, so wird die Analogie zwischen einem Muskel und einer Feder oder einem Gummiband deutlich.

Die Feder besitzt eine Ruhelänge  $x_0$ . Wenn man sie dehnt, wächst ihre Kraft, und zwar steigt sie proportional der Abweichung von der Ruhelänge an:  $K = c(x - x_0)$ . Der Parameter  $c$  kenn-

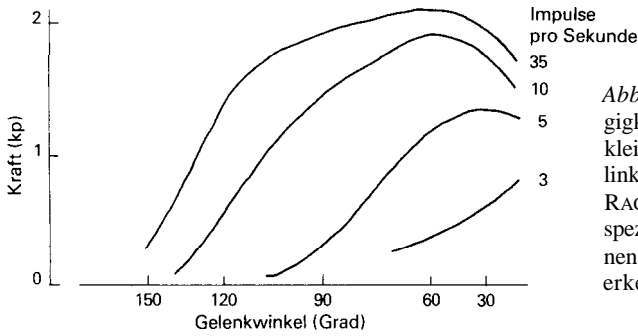


Abbildung 2: Kraft eines Muskels in Abhängigkeit von seiner Länge (die Länge nimmt bei kleiner werdendem Gelenkwinkel zu, also von links nach rechts) und der Reizfrequenz (nach RACK & WESTBURY, 1969, S.455; wegen der speziellen Art der Reizung sind auch bei kleinen Reizfrequenzen keine Einzelzuckungen zu erkennen).

zeichnet die Elastizität. Je größer  $c$  ist, desto geringer ist die Elastizität und desto stärker steigt die Kraft mit der Länge an. Wenn  $x < x_0$  ist, tritt bei einer Feder eine negative Kraft auf. Sie drückt jetzt anstatt zuziehen. Eine solche negative Kraft kommt beim Muskel allerdings nicht vor, genausowenig wie bei einem Gummiband. Für  $x < x_0$  gilt also  $K = 0$ . Wendet man die Federanalogie als eine grobe Näherung auf die in Abbildung 2 gezeigten Ergebnisse an, so kann man die Wirkung verstärkter Muskelreizung als eine Verkürzung der Ruhelänge ( $x_0$  wird kleiner) und eine Verminderung der Elastizität ( $c$  wird größer) beschreiben.

## 2.2 Leistungen des Rückenmarks

Das Rückenmark gehört zwar zum Zentralnervensystem und nicht zur Körperperipherie, dennoch soll ein Teil seiner Leistungen hier

besprochen werden. Der Grund dafür ist, daß diese Leistungen auf eine Art und Weise wirken, die sich mit Hilfe der Feder-Analogie beschreiben läßt. Außerdem, und das ist der Grund für eine relativ ausführliche Darstellung, lassen sich am Beispiel von Strukturen des Rückenmarks Funktionsprinzipien verdeutlichen, die auf höheren Ebenen der Bewegungssteuerung ebenfalls zu finden sind.

Die wohl am gründlichsten untersuchte Struktur des Rückenmarks ist der sog. Gamma-Kreis, der in Abbildung 3 illustriert ist. Es handelt sich dabei um einen Regelkreis für die Regelung der Muskellänge. Der Muskel ist die Regelstrecke und die Muskellänge die Regelgröße. Die Führungsgröße ist durch die Aktivität der kleinen Gamma-Motoneurones des Rückenmarks gegeben. Die Differenz zwischen Führungsgröße und Regelgröße wird in den Muskelspindeln gebildet, und zwar durch eine

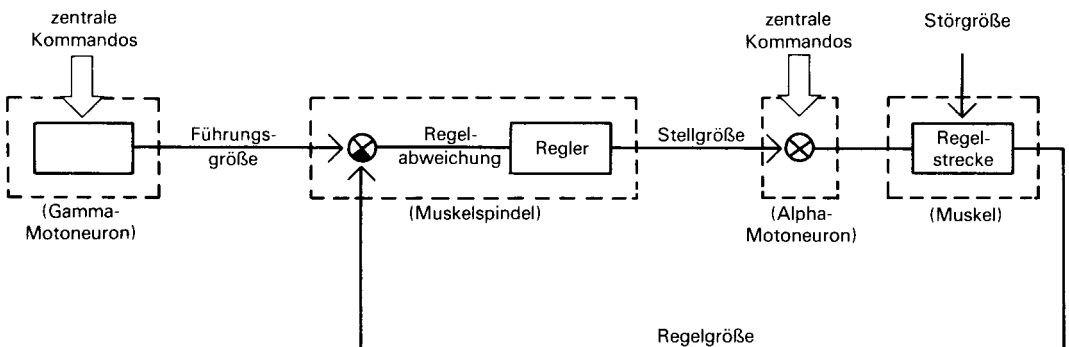


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Regelkreises für die Muskellänge (Gamma-Kreis). Physiologische Begriffe sind in Klammern geschrieben und die zugehörigen Einheiten gestrichelt gezeichnet.

sinnvolle mechanische Vorrichtung. Die mechanisch gebildete Regelabweichung, die Abweichung der Solllänge des Muskels von seiner tatsächlichen Länge, wird nun in Aktionspotentiale umgesetzt. Diese Umsetzung läßt sich der Funktion des Reglers zuordnen, der sowohl für die Größe der Regelabweichung empfindlich ist wie auch für die Geschwindigkeit ihrer Änderung. Die Aktivität der Muskelspindeln entspricht also der Stellgröße. über die Alpha-Motoneurone wird dann die Kontraktion des Muskels gesteuert. Das Alpha-Motoneuron ist in der Abbildung durch ein einfaches Summierungs-Symbol dargestellt; tatsächlich wirken an dieser Stelle des Regelkreises noch weitere Größen ein, die im momentanen Zusammenhang aber vernachlässigt werden können.

Im Prinzip ist dieser Regelkreis geeignet, eine vorgegebene Muskellänge gegen Kräfte, die von außen auf unseren Körper einwirken, konstant zu halten. Eine äußere Kraft, die ununterbrochen in variierender Weise auf unsere Glieder einwirkt, ist die Schwerkraft. Z.B. unterstützt sie das Senken eines Fingers, wirkt aber dem Heben des Fingers entgegen, und dieselben Bewegungen werden ganz anders durch die Schwerkraft beeinflusst, wenn wir die Hand drehen.

Wenn der Muskel durch äußere Kräfte (Störgröße) gedehnt wird, feuern die Muskelspindeln stärker, die Alpha-Motoneurone werden stärker erregt, und der Muskel entwickelt eine erhöhte Kraft. Das umgekehrte Geschehen läuft ab, wenn eine äußere Kraft abnimmt, so daß die Muskellänge kleiner wird. Ein solcher peripherer Mechanismus für den Ausgleich variabler äußerer Kräfte entlastet die höheren Zentren: sie brauchen nicht mehr zu berücksichtigen, ob ein Finger z.B. gegen die Schwerkraft gestreckt wird, oder mit der Schwerkraft, oder ob die Bewegung in irgendeiner anderen Richtung relativ zur Schwerkraft erfolgt.

Natürlich muß die Muskellänge nicht nur gegen variierende äußere Kräfte aufrechterhalten werden, sondern sie muß auch verändert werden können. Wie geschieht das? Der offensichtliche Weg ist die Änderung der Führungsgröße des Regelkreises, also der Aktivität der Gamma-Motoneurone (MERTON, 1953). Wenn diese Aktivität z. B. erhöht wird, steigt auch die Aktivität der Muskelspindeln (Stellgröße),

und der Muskel wird auf dem Weg über die Alpha-Motoneurone verkürzt. Diese sog. «Servo-Hypothese» läßt sich überprüfen.

Wenn eine Änderung der Muskellänge über eine Aktivierung oder Hemmung der Gamma-Motoneurone (Führungsgröße) initiiert wird, dann sollte sich zuerst die Aktivität der Muskelspindeln (Stellgröße) verändern und erst danach die Muskelaktivität. VALLBO (1971) zeigte, daß bei langsamen und schnellen Kontraktionen von Fingermuskeln des Menschen aber eher das Gegenteil der Fall ist: in den meisten Fällen geht die Muskelaktivität der Spindelaktivität voraus. Die Folgerung aus diesen und einer Vielzahl entsprechender Ergebnisse ist, daß die Servo-Hypothese falsch ist. Zutreffend dürfte vielmehr eine Hypothese der «Servo-Unterstützung» sein.

Abbildung 3 zeigt, daß die Alpha-Motoneurone nicht nur auf dem indirekten Weg über die Gamma-Motoneurone aktiviert werden können, sondern auch direkt von höheren Zentren. Nach der Hypothese der Servo-Unterstützung erfolgt die Aktivierung auf beiden Wegen etwa gleichzeitig. Das hat zwei Vorteile: Auf dem direkten Weg kann eine *schnelle* Änderung der Muskellänge erreicht werden; der indirekte Weg sichert eine genaue Einstellung der Muskellänge trotz variierender äußerer Kräfte. Das allgemeine Funktionsprinzip ist also: Eine bestimmte Größe (hier: die Muskellänge) wird direkt eingestellt; gleichzeitig wird aber die Führungsgröße eines Regelkreises verändert, der dann die direkt eingestellte Größe überwacht und bei Fehlern eingreift. Diesem Funktionsprinzip werden wir später in einem weniger elementaren Zusammenhang wieder begegnen.

Obwohl der Gamma-Kreis im Prinzip in der Lage ist, eine vorgegebene Muskellänge gegen variable äußere Kräfte aufrechtzuerhalten, dürfen diese Kräfte nicht beliebig groß sein. Die Abweichung von der vorgegebenen Länge erhöht zwar auf alle Fälle die Aktivität der Muskelspindeln und damit die Aktivität der Alpha-Motoneurone, aber die dadurch bewirkte Vergrößerung der Muskelkraft ist nicht immer hinreichend groß, um den äußeren Widerstand zu überwinden. Wenn man z. B. einen unerwartet schweren Gegenstand in die Hand gedrückt bekommt, so sinkt die Hand nach un-

ten, ohne daß der schnelle korrigierende Eingriff des Gamma-Kreises das verhindern kann (s. HOPF et al., 1967).

Die Grenzen des Gamma-Kreises bei der Kompensation äußerer Kräfte lassen vermuten, daß diese ja recht komplizierte Einrichtung auch noch andere Funktionen haben könnte. Was ist die Beziehung dieses Regelkreises zu den elastischen Eigenschaften des Muskels, wie wir sie im letzten Abschnitt besprochen haben? Zunächst fällt auf, daß der Gamma-Kreis die elastischen Eigenschaften des Muskels unterstützt bzw. in einer prinzipiell gleichartigen Weise wirkt. Bei gegebener Aktivität der Gamma-Motoneurone steigt die Spindelaktivität mit der Muskellänge. Zu der eigenen Kraftentwicklung des Muskels infolge der Dehnung kommt also noch eine zusätzliche Kraft hinzu - die Alpha-Motoneurone werden zusätzlich stärker erregt.

Eine weniger offensichtliche Konsequenz des Gamma-Kreises - im Zusammenwirken mit anderen Strukturen des Rückenmarks - wird von NICHOLS und HOUK (1976) beschrieben. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, ist der Anstieg der Muskelkraft mit der Länge des Muskels nur über einen gewissen Bereich näherungsweise linear. Diese Ergebnisse stammen von Muskeln, bei denen die Wirkungen von Rückenmarks-Strukturen ausgeschaltet waren. Bei einem normal innervierten Muskel dagegen ist der Bereich der Linearität vergrößert. Die Analogie zwischen einem Muskel und einer Feder ist also tatsächlich enger als in den Daten von Abbildung 2 zu erkennen. Die Konsequenzen dieser elastischen Eigenschaften von Muskeln sollen jetzt besprochen werden.

### 2.3 Das Masse-Feder-Modell

Die kleinste mechanische Vorrichtung, die man für eine Bewegung benötigt, ist ein einfaches Gelenk mit zwei gegeneinander arbeitenden Muskeln (Abb. 4a). Jeder dieser Muskeln kann aktiv verkürzt werden, aber nicht gedehnt - deshalb ist ein Paar erforderlich. Eine Kontraktion des Beugers bewirkt eine Beugung des Gelenks, eine Kontraktion des Streckers eine Streckung. Funktionell gesehen ist im ersten Fall der Beuger der Agonist und der Streckter der Antagonist, während im zweiten Fall der

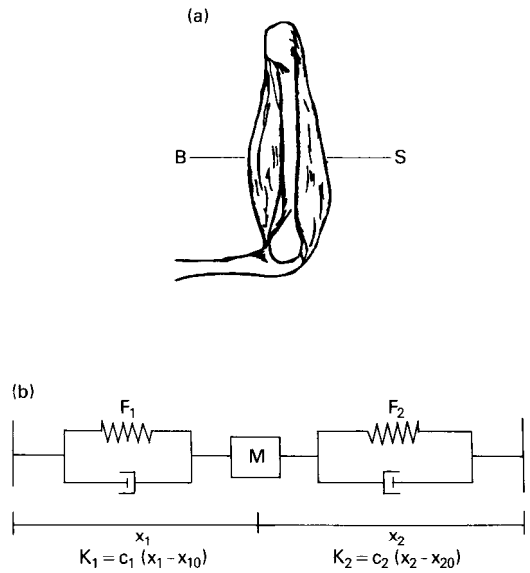


Abbildung 4: Das Masse-Feder-Modell. (a) Gelenk mit zwei antagonistisch arbeitenden Muskeln (B: Beuger, Flexor; S: Streckter, Extensor). (b) Die Muskeln sind als gedämpfte Federn F1 und F2 dargestellt, der bewegte Körperteil als Masse M.

Streckter der Agonist ist und der Beuger der Antagonist.

Abbildung 4b illustriert eine vereinfachte Beschreibung des Gelenks von Abbildung 4a. Die beiden antagonistischen Muskeln (oder Muskelgruppen) werden durch zwei Federn dargestellt, die gegeneinander arbeiten. Zwischen diesen beiden Federn ist eine Masse eingespannt, die dem bewegten Körperteil entspricht. Diese einfache Darstellung genügt, um einige wichtige Konsequenzen der Masse-Feder-Anordnung zu erkennen. (In der Abbildung sind die beiden Muskeln als gedämpfte Federn dargestellt - bei der Änderung ihrer Länge gibt es einen Widerstand, der der Geschwindigkeit proportional ist. Die Dämpfung wirkt sich nur auf die Bewegung der Masse aus, aber nicht auf ihre Ruhelpositionen. Daher kann sie hier vernachlässigt werden.)

Die beiden Federn  $F_1$  und  $F_2$  entwickeln zwei Kräfte  $K_1$  und  $K_2$ , die in entgegengesetzte Richtungen auf die Masse M einwirken. Die Kräfte  $K_1$  und  $K_2$  hängen von den Elastizitätskonstanten  $c_1$  und  $c_2$  sowie den beiden Ruhelängen  $x_{10}$

und  $x_{20}$  ab. Die Ruheposition der Masse liegt bei den Werten von  $x_1$  und  $x_2$ , für die  $K_1 = K_2$  gilt. Wenn die Position der Masse  $M$  geändert werden soll, muß das Verhältnis der beiden Kräfte  $K_1$  und  $K_2$  verändert werden. Das kann geschehen, indem man die Ruhelängen und/oder die Elastizitätskonstanten der Federn verändert. Wie in Abbildung 2 gezeigt ist, hat die Aktivierung eines Muskels eine analoge Wirkung.

Wenn z.B.  $c_1$  vergrößert wird oder  $x_{10}$  verkleinert, so steigt die Kraft  $K_1$  der linken Feder. Die Masse wird dann nach links bewegt. Umgekehrt kann auch eine Bewegung nach rechts erfolgen. Stets gilt das Prinzip, daß die Masse in einer Position zur Ruhe kommt, die durch die Gleichheit der beiden Kräfte  $K_1$  und  $K_2$  bestimmt ist (Gleichgewichtsposition). Welche Konsequenzen hat nun eine derartige Anordnung, bei der eine Masse durch die Veränderung der Konstanten zweier Federn bewegt wird? Und gibt es Eigenschaften realer Bewegungen, die diesen Konsequenzen entsprechen?

Eine wichtige Eigenschaft eines Masse-Feder-Systems wird gelegentlich als Äquifinalität bezeichnet. Die Konstanten der beiden Federn definieren eine Gleichgewichtsposition, die die Masse unabhängig von ihrer vorhergehenden Position einnimmt (Kontextfreiheit). Äquifinalität wurde in einem der zentralen Experimente zum Masse-Feder-Modell von POLIT und BIZZI (1979) demonstriert.

Aus diesem Experiment stammen die drei in Abbildung 1a gezeigten Weg-Zeit-Kurven. Vor dem eigentlichen Experiment hatten die Rhesusaffen gelernt, mit dem Arm auf nacheinander aufleuchtende Lämpchen zu zeigen. In etwa 80% der Versuchsdurchgänge konnten die Bewegungen dann ungestört ausgeführt werden; unter diesen Bedingungen entsprechen die Weg-Zeit-Kurven der linken Kurve in Abbildung 1a. In etwa 20% der Versuchsdurchgänge aber wurde die Startposition verändert, und zwar mit Hilfe eines Motors. Die Kraft des Motors setzte 150-200 msec vor Bewegungsbeginn ein und dauerte 100-180 msec. In der mittleren Kurve von Abbildung 1a wird der Arm vom Ziel weg verlagert, in der rechten zum Ziel hin. Trotz dieser passiven Verlagerung des Arms durch den Motor wird das Ziel aber ge-

nau erreicht. Die Masse des Arms kommt also in einer definierten Gleichgewichtsposition zur Ruhe unabhängig davon, wo sie sich vorher befunden hat.

Dieses Ergebnis erscheint ziemlich trivial, solange noch nicht gesagt ist, daß die Tiere ihren Arm weder sehen noch fühlen konnten. Das Sehen des Arms wurde mit Hilfe einer Sichtblende verhindert. Die Propriozeptoren (Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken) waren operativ ausgeschaltet. Die Korrektur der Bewegungen kann also weder auf die Wahrnehmung der veränderten Startposition zurückgeführt werden noch auf die Wirkung von Reflexen. Es bleibt die Interpretation im Sinne des Masse-Feder-Modells.

Zwei weitere Eigenschaften des Masse-Feder-Modells zeigen sich bei einer Vergrößerung der Masse und der dauerhaften Einwirkung einer äußeren Kraft. Die Vergrößerung der Masse hat keinen Einfluß auf die Gleichgewichtsposition, die allein durch die beiden Kräfte  $K_1$  und  $K_2$  bestimmt ist. Sie hat allerdings zur Folge, daß nach Änderung der Federkonstanten die neue Gleichgewichtsposition langsamer erreicht wird. Dauerhaft einwirkende Kräfte dagegen verändern die Gleichgewichtsposition. Wenn z.B. die äußere Kraft  $K_S$  in die gleiche Richtung wirkt wie die Kraft  $K_1$ , so wird die Gleichgewichtsposition durch die Strecken  $x_1$  und  $x_2$  definiert, bei denen  $K_2 = K_1 + K_S$  ist. Beide Eigenschaften finden sich auch bei Zielbewegungen von Menschen.

SCHMIDT und MCGOWN (1980) ließen ihre Vpn sehr schnelle Bewegungen des Unterarms ausführen, im ersten Experiment in der horizontalen Ebene. In einigen Versuchsdurchgängen wurde an dem Hebelarm, der mit dem Arm der Vp verbunden war, eine zusätzliche Masse angebracht, ohne daß die Vpn das bemerkten. In einer anderen Bedingung war die zusätzliche Masse im Regelfall vorhanden, fehlte aber gelegentlich überraschend. Entsprechend den Erwartungen nach dem Masse-Feder-Modell hatte die zusätzliche Masse keinen Einfluß auf die Genauigkeit, mit der das Ziel erreicht wurde, und die Bewegungszeit war bei überraschend erhöhter Masse verlängert und bei überraschend verminderter Masse verkürzt. In diesem Versuch waren die Propriozeptoren übrigens nicht ausgeschaltet, aber die Bewegungs-

zeiten waren mit etwa 200 msec so kurz, daß größere willkürliche Korrekturen der Bewegungen nicht möglich waren (s. Abschnitt 3.1.1).

Ein zweites Experiment von SCHMIDT und MCGOWN war fast identisch mit dem ersten, aber die Bewegungen wurden statt in der horizontalen Ebene von unten nach oben ausgeführt. Wegen der Schwerkraft hat eine zusätzliche Masse dann eine dauerhaft gegen die Bewegung wirkende Kraft zur Folge. Entsprechend den Erwartungen nach dem Masse-Feder-Modell fallen die Bewegungen jetzt bei unerwartet großem Widerstand kürzer und bei unerwartet kleinem Widerstand weiter aus als die Kontrollbewegungen.

Die letzte Eigenschaft des Masse-Feder-Modells, die besprochen werden soll, ist das Verhalten bei Zeitmangel. Der Übergang der Masse von einer Gleichgewichtsposition zur nächsten erfordert stets eine gewisse Zeit. Wenn, wie bei einer gezielten Bewegung, nur eine einzelne Änderung der Federkonstanten erfolgt, steht natürlich genug Zeit zur Verfügung. Wenn aber mehrere Änderungen aufeinanderfolgen, kann es passieren, daß eine Gleichgewichtsposition nur für so kurze Zeit eingestellt ist und so schnell zur nächsten wechselt, daß sie gar nicht vollständig erreicht wird. Bei immer schneller aufeinanderfolgenden Gleichgewichtspositionen sollte daher ein zunehmend stärkeres «Unterschießen» auftreten. Das läßt sich z. B. beim Sprechen beobachten.

Beim Sprechen müssen die Artikulatoren (Zunge, Gaumensegel, Lippen, usw.) für jedes Phonem Positionen einnehmen, die eine bestimmte Konfiguration des Vokaltraktes entstehen lassen. Während die Positionen einiger Artikulatoren für ein gegebenes Phonem kritisch sind, können die Positionen anderer Artikulatoren relativ frei variiert werden. Z.B. können sie schon für ein künftiges Phonem voreingestellt werden. Auch die von den kritischen Artikulatoren einzunehmenden Positionen können etwas variieren, ohne daß das Phonem dadurch unverständlich wird. Z.B. kann man ein «a» mit unterschiedlich weit geöffneten Lippen aussprechen.

Wenn auch die Artikulatoren den Prinzipien von Masse-Feder-Systemen gehorchen, sollte sich im Fall des Zeitmangels ein zunehmendes

Unterschießen von Gleichgewichtspositionen finden. Abbildung 5 zeigt entsprechende Daten von LINDBLOOM (1983): Die Öffnung der Lippen beim «a» der Silbe «dad» wird umso kleiner, je kleiner die Silbendauer ist. Die Dauer der Silbe wurde dadurch variiert, daß unterschiedlich viele Silben folgten. (Eine Silbe wird in der Regel umso kürzer, je mehr Silben folgen.)

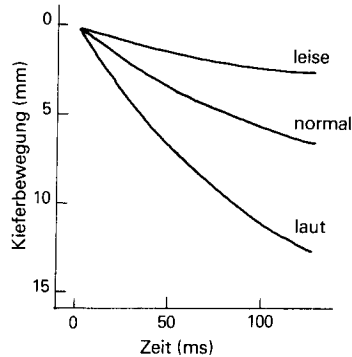


Abbildung 5: Weite der Kieferbewegung beim «a» in der Silbe «dad» in Abhängigkeit von der Lautstärke und der Silbendauer (nach LINDBLOM, 1983, S.231).

Das Unterschießen der Gleichgewichtspositionen beim schnellen Sprechen hat akustische Konsequenzen, die aus dem Alltag vertraut sind. Obwohl die Verständlichkeit beim schnellen Sprechen sehr leicht leidet, kann man diese Beeinträchtigung doch vermeiden. Wenn wir uns anstrengen, können wir durchaus schnell und deutlich sprechen. LINDBLOOM (1983) weist darauf hin, daß das Unterschießen der Gleichgewichtspositionen bei Zeitmangel tatsächlich nicht zwangsläufig ist. Mit Hilfe insgesamt erhöhter Kräfte, die im Rahmen des Masse-Feder-Modells z.B. durch gleichzeitige Erhöhung beider Elastizitätskonstanten zustande kommen, können die Gleichgewichtspositionen in jeweils kürzeren Zeiten erreicht werden.

Nach der bisherigen Darstellung des Masse-Feder-Modells kann man den Eindruck gewinnen, daß den höheren Prozessen der Bewegungssteuerung eigentlich nur die Aufgabe zu-

fällt, eine diskrete Folge von Gleichgewichtspositionen zu definieren. Die Einzelheiten des kontinuierlichen Bewegungsverlaufs wären dann vollständig durch das periphere Masse-Feder-System bestimmt. Formalisierungen des Masse-Feder-Modells gehen tatsächlich von einer solchen Annahme aus (COOKE, 1980). Es läßt sich aber relativ einfach zeigen, daß sie unzutreffend ist.

Beuger und Strecker des menschlichen Ellbogengelenks haben ganz offensichtlich unterschiedliche Eigenschaften. Diese Unterschiede sollten unterschiedliche Bewegungsverläufe zur Folge haben, wenn der *rechte* Ellbogen in einer horizontalen Ebene gebeugt oder gestreckt wird. Wenn der Verlauf einer gezielten Bewegung tatsächlich durch das periphere Masse-Feder-System bestimmt wäre, dann sollten sich zwischen Beugungen und Streckungen des *linken* Arms gleichartige Unterschiede beobachten lassen. Die Tatsache, daß eine Beugung des rechten Arms eine Bewegung nach links ist und eine Streckung eine Bewegung nach rechts, während es beim linken Arm genau umgekehrt ist, sollte keine Rolle spielen. Sie spielt aber eine Rolle.

Beschleunigungs-Zeit-Kurven wie die in Abbildung 1b lassen sich in einzelne Abschnitte unterteilen, z.B. vom Anfang der Bewegung bis zum Maximum der Beschleunigung, von da bis zum Nulldurchgang, von da bis zum Minimum, usw. Tabelle 1 zeigt die mittlere Dauer solcher Abschnitte, und zwar jeweils für Beugungen und Streckungen des linken und rechten Arms mit vorgegebener Weite (HEUER, 1981). Von Interesse sind hier weniger die Unterschiede zwischen beiden Armen als vielmehr die Frage, ob Beugungen und Streckungen sich beim einen Arm in gleicher Weise unterscheiden wie beim anderen. Das ist nur bei den letzten drei Abschnitten der Fall. In den ersten drei Abschnitten dagegen unterscheiden sich die Beugungen und Streckungen beider Arme in genau entgegengesetzter Weise. Aber Bewegungen nach links und rechts weisen gleichartige Unterschiede auf. Demnach sind Unterschiede zwischen den Bewegungen im ersten Teil - bis etwa zum Minimum der Beschleunigungs-Zeit-Kurve - durch die räumliche Richtung bestimmt und erst in späteren Abschnitten der Bewegung durch die Körpersymmetrie.

*Tabelle 1:* Mittlere Dauer (msec) aufeinanderfolgender Abschnitte T1 . . . T6 von Beschleunigungs-Zeit-Kurven von Beugungen und Streckungen des linken und rechten Ellbogengelenks. Für jeden Arm und jeden Abschnitt ist die kürzere Zeit kursiv geschrieben (nach HEUER, 1981, S.88).

Ab-schnitt	linker Arm		rechter Arm	
	Beugung (nach rechts)	Streckung (nach links)	Beugung (nach links)	Streckung (nach rechts)
T1	<i>110</i>	125	120	<i>107</i>
T2	129	<i>108</i>	<i>109</i>	136
T3	<i>126</i>	134	149	<i>132</i>
T4	<i>234</i>	283	<i>248</i>	269
T5	<i>54</i>	96	67	84
T6	<i>111</i>	112	87	101

T1: Beginn der Bewegung bis 1. Maximum  
T2: 1. Maximum bis 1. Nulldurchgang  
T3: 1. Nulldurchgang bis 1. Minimum  
T4: 1. Minimum bis 2. Nulldurchgang  
T5: 2. Nulldurchgang bis 2. Maximum  
T6: 2. Maximum bis 3. Nulldurchgang

Die Ergebnisse von Tabelle 1 sind unvereinbar mit der Auffassung, daß die höheren Zentren des Zentralnervensystems bei einer gezielten Bewegung nur eine neue Gleichgewichtsposition für die beteiligten Muskeln festlegen und alles andere dem peripheren Masse-Feder-System überlassen. Wenn die Änderung der Gleichgewichtsposition während einer gezielten Bewegung direkt erfaßt wird, zeigt sich, daß sie tatsächlich nicht von einem Wert zum anderen springt, sondern vielmehr langsam wandert. Demnach definieren die höheren Zentren der Bewegungssteuerung in der dynamischen Phase der Bewegung in kontinuierlicher Weise den zeitlichen Verlauf der Änderung der Gleichgewichtsposition (BIZZI et al., 1982) und bestimmen so in ausschlaggebender Weise die Verlaufsmerkmale der Bewegung. Erst in der statischen Phase, beim Einpendeln des bewegten Körpergliedes auf das Ziel und bei der Aufrechterhaltung der neuen Zielposition gegenüber verschiedenen Störeinflüssen, werden die Verlaufsmerkmale wesentlich durch die Eigenschaften des peripheren Masse-Feder-Systems bestimmt.

Obwohl das periphere Masse-Feder-System nicht immer einen ausschlaggebenden Einfluß auf die Verlaufsmerkmale einer Bewegung hat, ist es doch immer vorhanden und überlagert die Wirkungen der zentralen Kommandos von höheren Zentren; gleichzeitig entlastet es die höheren Prozesse der Bewegungssteuerung von der Notwendigkeit, bestimmte Störungen der Bewegung zu kompensieren, z.B. Störungen durch die variierende Wirkung der Schwerkraft. Die Behandlung solcher Störungen ist gewissermaßen an die niederen Zentren und an die Körperperipherie delegiert. Die Vorgaben aber stammen von höheren Prozessen. Diesen wollen wir uns jetzt zuwenden.

### 3. Regelung und Programmsteuerung

Wenn wir nach einem Objekt greifen, können wir die Abweichung zwischen der Position des Objektes und der Position unserer Hand zum Beispiel sehen. Wirkt sich das auf den Verlauf der Bewegung aus? Wenn wir im dunklen Hausflur auf den erleuchteten Lichtschalter drücken, können wir die gesehene Position des Schalters mit der gefühlten Position unserer Hand vergleichen. Ist das eine Voraussetzung für unsere Fähigkeit, den Schalter tatsächlich zu treffen?

Wenn wir beide Fragen mit ja beantworten können, haben wir es mit Regelprozessen zu tun, analog der im Abschnitt 2.2 beschriebenen Regelung der Muskellänge, nur auf einer höheren Ebene. Die Führungsgröße ist durch die wahrgenommene Position des Ziels gegeben, die Regelgröße durch die physikalische Position des bewegten Körpergliedes. Diese wird sensorisch erfaßt und rückgekoppelt. Die Abweichung zwischen den erfaßten Positionen von Ziel und Körperglied ist die Regelabweichung, die in entsprechende motorische Kommandos an die niederen Zentren der Bewegungssteuerung umgesetzt wird.

Wenn wir beide Fragen mit nein beantworten können, haben wir es mit einer Steuerung zu tun. Der wahrgenommenen Position des Ziels werden dann direkt motorische Kommandos zugeordnet, die das Körperglied zu diesem Ziel hin bewegen. Die Rückmeldungen über die Position des Körpergliedes - auch wenn sie real

vorhanden sein mögen - sind dann funktionell bedeutungslos; in diesem Sinne existieren sie nicht.

An dieser Stelle ist eine begriffliche Erläuterung notwendig, um unnötige Verwirrung zu vermeiden. Der Begriff «Steuerung» wird in diesem Kapitel in einer engen und einer weiten Bedeutung verwendet. In der engen Bedeutung stellt er einen Gegensatz zur Regelung dar - ein Regelkreis besitzt eine Rückkopplung und ist für seine Funktion auf Rückmeldungen angewiesen, eine Steuerkette dagegen nicht. In der weiten Bedeutung schließt der Begriff sowohl die Steuerung im engeren Sinne wie auch die Regelung ein, entsprechend dem englischen Begriff «control».

Regelung und Steuerung wurden lange Zeit als alternative Modi der Bewegungssteuerung diskutiert («closed-loop» versus «open-loop»). Extreme Positionen wurden z.B. von ADAMS (1976) auf der einen Seite und von JONES (1978) auf der anderen Seite vertreten. Ein solches Entweder-oder ist aber keineswegs gerechtfertigt. Regelung und Steuerung ergänzen sich vielmehr in idealer Weise. Ein Beispiel dafür haben wir bereits auf einer niederen Ebene der Bewegungssteuerung kennengelernt, nämlich bei der Änderung der Muskellänge. In diesem Abschnitt sollen zunächst die Regelung, dann die Steuerung und schließlich die Kombinationen beider Modi besprochen werden.

#### 3.1 Regelung

Im folgenden sollen zunächst Regelprozesse bei gezielten Bewegungen betrachtet werden. Anschließend soll auf solche Bewegungen eingegangen werden, bei denen wir ein Werkzeug benutzen.

##### 3.1.1 Regelung bei gezielten Bewegungen

Die Bedeutung der visuellen Regelung bei gezielten Bewegungen kann man auf relativ einfache Weise zeigen, indem man nämlich die Rückmeldungen ausblendet. KEELE und POSNER (1968) ließen Bewegungen von etwa 15 cm Weite zu Zielen mit einem Durchmesser von etwa 6 mm ausführen. Variiert wurde die vorgegebene Bewegungszeit. Außerdem wurden die Bewegungen mit oder ohne Sehen ausgeführt. Bei Bewegungen ohne Sehen erlosch die Be-

*Tabelle 2:* Genauigkeit gezielter Bewegungen unterschiedlicher Dauer mit und ohne Sehen. Die Genauigkeit ist als prozentualer Anteil der Treffer angegeben (nach KEELE & POSNER, 1968, S. 156).

Soll-Bewegungszeit (msec)	mittlere Bewegungszeit (msec)		Genauigkeit (%)	
	mit Sehen	ohne Sehen	mit Sehen	ohne Sehen
150	190	185	32	31
250	261	254	53	42
350	351	338	72	48
450	441	424	85	53

leuchtung bei Bewegungsbeginn, so daß weder die Hand noch das Ziel sichtbar waren.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse. Die tatsächlichen Bewegungszeiten entsprachen den vorgegebenen nicht ganzexakt, sondern es zeigte sich ein sog. range-Effekt: die kurzen Bewegungszeiten sind zu lang und die langen eher zu kurz. Außerdem sind die Bewegungszeiten mit Sehen stets etwas länger als die ohne Sehen. In den Trefferquoten zeigen sich zwei wichtige Tendenzen:

1. Bewegungen mit Sehen werden erst bei Bewegungszeiten über etwa 200 msec genauer als solche ohne Sehen.

2. Auch ohne Sehen steigt die Genauigkeit, wenn die Bewegungszeit länger wird.

Das zweite Ergebnis soll zunächst zurückgestellt werden. Was bedeutet das erste Ergebnis?

Das Sehen von Ziel- und Handposition ist erst dann von Nutzen, wenn eine hinreichend lange Zeit von mehr als etwa 200 msec für die Bewegung zur Verfügung steht. Die Zeit von 200-250 msec wird daher oft als die minimale Zeit angesehen, die für die Verarbeitung visueller Rückmeldungen erforderlich ist (CHRISTINA, 1970). Eine genauere Überlegung zeigt jedoch zum einen, daß eine solche allgemeine Zeitangabe allenfalls ein sehr grober Richtwert sein kann, und zum anderen, daß der von CHRISTINA angegebene Wert zu groß ist.

Eine allgemeine Angabe über die Verarbeitungszeit für visuelle Rückmeldungen kann nur ein grober Richtwert sein, da die benötigte Zeit natürlich auch davon abhängt, auf welche

Weise die visuelle Rückmeldung verarbeitet werden muß. Z.B. sollte die Änderung der Richtung einer Bewegung komplizierter sein als die Änderung der Weite. Zumindes erfordert die Wahl zwischen zwei verschiedenen Bewegungsrichtungen mehr Zeit als die zwischen zwei verschiedenen Bewegungsweiten (MEGAW, 1972).

Aus der Beobachtung, daß Bewegungen mit einer Dauer über 200 msec von dem Vorhandensein visueller Rückmeldungen profitieren, folgt nicht, daß die Verarbeitung visueller Rückmeldungen etwa 200 msec erfordert, sondern vielmehr, daß sie schneller erfolgt. Diegesehene Abweichung zwischen Ziel und Hand sollte nämlich erst dann zu einer erhöhten Genauigkeit beitragen können, wenn sie bereits relativ klein ist. Das Sehen der Hand, wenn sie kaum die Startposition verlassen hat, sollte wenig oder gar nicht nützen. Außerdem ist ein gleichzeitiges etwa foveales Sehen von Ziel und Hand - mit dem Vorteil der hohen räumlichen Auflösung - nur möglich, wenn die Hand dem Ziel schon recht nahe ist.

Diese Überlegung wird durch Experimente von CARLTON (1981) bestätigt. Die Vpn hatten möglichst schnelle und genaue Bewegungen von 32 oder 64 cm Weite zu einem Ziel von 13mm Durchmesser auszuführen. Durch eine Kopfstütze war die Bewegungsfreiheit des Kopfes eingeschränkt, und eine Sichtblende verdeckte die ersten 0, 25, 50, 75 oder 93% der Wegstrecke. Das Vorhandensein einer solchen Sichtblende kann entweder gar keinen Effekt haben oder aber einen von zwei möglichen Effekten: Die Genauigkeit kann sinken oder die Bewegungszeit steigen. Indem die Vp die Bewegung verlangsamt, erhöht sie die Zeit, die ihr nach Sichtbarwerden der Hand für Korrekturen zur Verfügung steht.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des Experiments. Wenn bis zu 50-75% der Wegstrecke der Hand nicht einsehbar sind, hat das weder auf die Bewegungszeit noch auf die Genauigkeit einen Einfluß. Erst bei Abdeckung von 75% der Wegstrecke steigen Bewegungszeit und Fehlerquote an. In Abbildung 6 sind die Fehlerquoten nur zusammengefaßt für beide Bewegungsweiten angegeben. CARLTON berichtet jedoch, daß bei dem 75%-Punkt die Fehlerquote für die weite Bewegung wesentlich

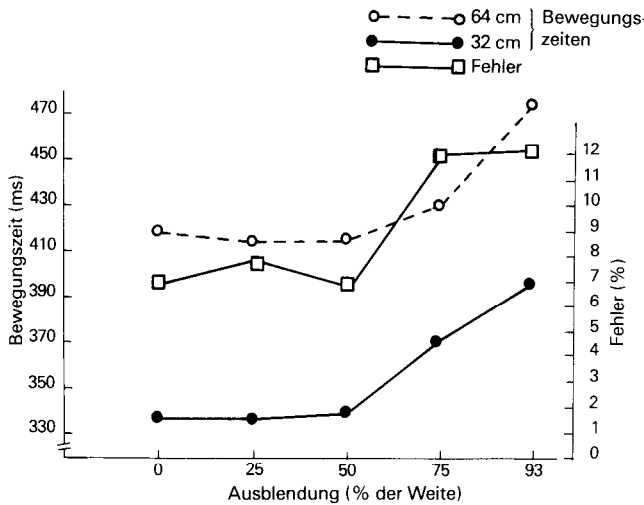


Abbildung 6: Bewegungszeit und Fehlerquote gezielter Bewegungen in Abhängigkeit vom nicht sichtbaren Anteil (Ausblendung) der Gesamtwegstrecke (nach CARLTON, 1981, S. 1022).

größer ist als für die kurze. Dem entspricht der geringere Anstieg der Bewegungszeit bei der weiten Bewegung.

In einem zweiten Experiment verwendete CARLTON (1981) nur die Blenden für 75 und 93% der Wegstrecke. Die Bewegungen wurden gefilmt. Aus den Geschwindigkeits-Zeit-Kurven und den Beschleunigungs-Zeit-Kurven wurden die Zeitpunkte bestimmt, zu denen nach Sichtbarwerden der Hand eine Änderung im Verlauf der Bewegung erkennbar wurde (z. B. ein erneuter Anstieg der Geschwindigkeit gegen Ende der Bewegung oder eine abrupte Änderung im Verlauf der Bremsung). Wegen der Kontinuität der Bewegungen sind die Zeitpunkte solcher Ereignisse immer nur relativ ungenau zu bestimmen; außerdem ist nicht immer sicher, ob die Änderungen tatsächlich eine Konsequenz der Auswertung visueller Rückmeldungen sind. Die von CARLTON geschätzte Zeit von etwa 135 msec liegt jedoch wesentlich unter der sonst oft angegebenen Zeit von 200-250 msec. Die gemessenen Zeiten werden noch kürzer, wenn statt der Änderungen in den Verlaufsmerkmalen Änderungen im Elektromyogramm, also der elektrischen Aktivität der Muskeln, erfaßt werden. SOECHTING und LACQUANITI (1983) fanden auf diese Weise Zeiten von etwa 100 msec bei der Anpassung der Bewegung an eine abrupte Änderung der Zielposition.

Die Experimente von CARLTON zeigen, daß visuelle Rückmeldungen in kürzerer Zeit als 200-250 msec ausgewertet werden, und daß die Verfügbarkeit visueller Rückmeldungen in der ersten Hälfte der Wegstrecke die Genauigkeit nicht vergrößert, sofern in der zweiten Hälfte der Wegstrecke ebenfalls visuelle Rückmeldungen verfügbar sind. Aus diesem Ergebnis folgt nun aber nicht, daß die Rückmeldungen während der ersten Hälfte der Bewegung gar nicht ausgewertet werden. PAILLARD (1982) berichtet Ergebnisse, nach denen die Verfügbarkeit visueller Rückmeldungen im ersten Teil einer gezielten Bewegung durchaus die Genauigkeit erhöht, aber nur dann, wenn das bewegte Körperteil im zweiten Teil nicht sichtbar ist, und nicht - wie es auch CARLTON fand - wenn gegen Ende der Bewegung visuelle Rückmeldungen vorhanden sind. Eine naheliegende Folgerung ist, daß visuelle Rückmeldungen die Genauigkeit umso mehr erhöhen, je später sie zur Verfügung stehen - vorausgesetzt, es bleibt noch genügend Zeit für die Verarbeitung. Der Nutzen früher Rückmeldungen wird also durch den später Rückmeldungen übertroffen. Daher wird er in der Genauigkeit der Bewegungen nicht mehr erkennbar, sofern späte Rückmeldungen vorhanden sind.

### 3.1.2 Varianten der Regelung bei gezielten Bewegungen

Die Variante der Regelung, die bisher besprochen wurde, kann man als visuell-visuelle Regelung bezeichnen, da sowohl die Position des Ziels wie auch die der Hand visuell erfaßt werden. Ziel- und Handposition werden dabei nicht nur durch die gleiche Sinnesmodalität erfaßt, sondern die Abweichung ist zudem unmittelbar durch den Abstand der entsprechenden Bilder auf der Netzhaut bzw. die relative Querdisparation gegeben. Anders formuliert: die Hand kann unmittelbar allozentrisch-relativ zum Zielpunkt - lokalisiert werden. Dieser Vorteil fehlt, sobald andere Sinnesmodalitäten bei der Erfassung von Ziel- und/oder Handposition genutzt werden.

Regelprozesse setzen nicht voraus, daß Ziel- und Handposition durch die gleiche Sinnesmodalität erfaßt werden, sondern sie sind auch intermodal möglich. Die Möglichkeit intermodaler Regelvorgänge macht das bisher zurückgestellte zweite Ergebnis von KEELE und POSNER (1968) verständlich: Die Genauigkeit gezielter Bewegungen steigt auch dann mit der Bewegungszeit, wenn kein Sehen möglich ist (s. Tab. 2). In dieser Situation wird vermutlich die propriozeptiv erfaßte Handposition an die erinnerte Zielposition angepaßt. Wie jeder Regelvorgang erfordert auch dieser Zeit. Die Anpassung wird daher umso genauer, je mehr Zeit zur Verfügung steht. Auf der anderen Seite kann man jedoch vermuten, daß die erinnerte Zielposition im Verlauf der Zeit ungenau wird. Dadurch sollte, trotz der für die Regelung ausreichenden Zeit, auch die Bewegung wieder ungenauer werden. Tatsächlich fanden BEGGS, ANDREW, BAKER, DOVE, FAIRCLOUGH und HOWARTH (1972), daß die Genauigkeit bei Bewegungszeiten über etwa 0.5 sec wieder sinkt.

Bei hinreichend langen Bewegungszeiten und einem Ziel, das kontinuierlich erfaßt werden kann, sollte die Genauigkeit verschiedener Regelvorgänge von zwei Faktoren abhängen. Der erste ist die Genauigkeit der Registrierung von Ziel- und Handposition. Der zweite ist die Relation zwischen den beteiligten Modalitäten. Wenn die Modalitäten verschieden sind, scheint eine Übersetzung erforderlich zu sein, die die Genauigkeit zusätzlich vermindert. Das zeigt ein Ergebnis von LEGGE (1965).

LEGGES Vpn konnten das Ziel entweder visuell oder propriozeptiv lokalisieren. Bei der propriozeptiven Lokalisation konnten sie es mit der einen Hand ertasten. Zu diesem Ziel mußten sie einen Zeiger führen. Entweder führten sie den Zeiger direkt, wobei sie ihn propriozeptiv lokalisieren konnten, aber nicht sehen, oder sie führten ihn über ein Hebelsystem; dabei konnten sie ihn zwar sehen, aber die propriozeptiven Rückmeldungen gaben keine Information über seine Position. Die Genauigkeit der Bewegungen war dann am größten, wenn Ziel und Zeiger gesehen werden konnten. Sie war wesentlich kleiner, wenn Ziel- und Zeigerposition beide propriozeptiv erfaßt wurden. Dieser Unterschied geht auf die unterschiedliche Genauigkeit beider Modalitäten zurück sowie auf die Möglichkeit der unmittelbaren allozentrischen Lokalisation bei der visuellen Aufgabe. Wenn Ziel- und Zeigerposition durch unterschiedliche Modalitäten erfaßt wurden, sank die Genauigkeit noch weiter ab. Hier zeigt sich also der durch die notwendige Übersetzung zusätzlich eingeführte Fehler.

### 3.1.3 Regelung bei der Benutzung von Werkzeugen

Bei der bisher besprochenen gezielten Bewegung ist die Regelgröße, die an die Führungsgröße angepaßt werden muß, die Handposition. Häufig aber sind die Positionen unserer Hand von geringem Interesse. Wenn wir z.B. eine Scheibe Brot abschneiden, kommt es auf die Bewegung der Messerschneide an, wenn wir mit dem Auto fahren, auf die Bewegung des Fahrzeugs. In allen diesen Fällen ist unser Körper durch ein Werkzeug erweitert, und die Regelgröße, deren Übereinstimmung mit der in der Umwelt definierten Führungsgröße kritisch ist, ist nicht mehr die Position eines Körperteils, sondern die (eines Teils) des Werkzeugs.

Der Begriff «Werkzeug» ist hier in einem sehr allgemeinen Sinne zu verstehen. Was ein Werkzeug ausmacht, ist eine Transformation der Körperbewegung. Bei einer Kneifzange z. B. ist die Transformation einfach: Sie besteht im wesentlichen aus einer Verstärkung der Kraft der Hand. Komplizierte Transformationen finden sich z.B. bei Kränen: Hier ist nicht nur die Beziehung zwischen Handbewegung und Bewe-

gung des Auslegers von Bedeutung, sondern außerdem müssen die Pendelbewegungen der anhängenden Last berücksichtigt werden. Welche Rolle spielen Regelprozesse bei derartigen Aufgaben?

Für die experimentelle Untersuchung dieser Frage werden in der Regel Tracking-Aufgaben verwendet, die heutzutage meist mit Hilfeelektronischer Mittel realisiert werden. Auf einem Bildschirm wird ein Zielpunkt dargeboten, der sich entsprechend einer bestimmten Weg-Zeit-Kurve (Vorlage) bewegt. Die Vp muß einen Folgepunkt mit dem Zielpunkt in Deckung halten, so gut es geht. Dazu hat sie ein Bedienelement, z.B. einen Hebel, in der Hand. Die Positionen dieses Hebels werden erfaßt und in ein elektrisches Signal umgewandelt, das den Folgepunkt auf dem Bildschirm steuert. Vor der Darstellung auf dem Bildschirm können beliebige Transformationen eingeführt werden, z.B. Verzögerungen oder Integrationen. Die Integration z.B. ist eine Modellsituation für das Lenken eines Autos: Die *Position* des Lenkrades ist der *Geschwindigkeit* proportional, mit der sich die Fahrtrichtung verändert.

Die Bedeutung der visuellen Regelung für die Beherrschung einer Tracking-Aufgabe kann mit Hilfe des gleichen methodischen Prinzips untersucht werden, das wir schon im Fall der gezielten Bewegung kennengelernt haben: die Rückmeldungen werden ausgeblendet. Je länger die Zeitintervalle mit ausgeblendetem Folgepunkt sind, desto schlechter wird die Leistung (POULTON, 1957a). Wie aber hängt diese Leistungseinbuße von der Art der Transformation ab?

Die Antwort auf diese Frage kann man sich relativ einfach überlegen. Wenn bei der gezielten Bewegung die visuellen Rückmeldungen ausgeblendet werden, kann die visuell-visuelle Regelung durch eine, allerdings weniger genaue, visuell-propriozeptive Regelung ersetzt werden. Das ist natürlich auch dann möglich, wenn ein Werkzeug benutzt wird. Nur liefern die propriozeptiven Rückmeldungen in erster Linie Information über die eigenen Gliedmaßen, aber nicht über die Regelgröße, das Werkzeug oder einen Teil davon.

Information über die eigenen Gliedmaßen ist aber in dem Maße auch Information über die Regelgröße, in dem die Transformation durch

das Werkzeug bekannt ist. Je einfacher und besser gelernt also die Transformation ist, desto weniger sollte sich die Ausblendung der visuellen Rückmeldungen auswirken; je schwerer und weniger geübt die Transformation ist, desto stärker sollte die Leistung von der Verfügbarkeit visueller Rückmeldungen abhängen. Tatsächlich ist die Leistungseinbuße bei ausgeblendetem Folgepunkt im Fall einer einfachen Transformation geringer als im Fall einer schwierigen, und zu Beginn der Übung größer als am Ende (s. HEUER, 1983, S.54). Je besser wir also mit einer bestimmten Transformation vertraut sind, etwa beim Lenken eines Autos, desto weniger sind wir auf visuelle Rückmeldungen angewiesen. Während ein Fahrschüler relativ ununterbrochen auf die Straße guckt, scheint ein geübter Autofahrer durchaus für einige Zeit woanders hingucken zu können; er ist in geringerem Maße darauf angewiesen, die Konsequenzen seiner Lenkbewegungen für die Fahrtrichtung visuell zu erfassen.

### 3.2 Programmsteuerung

Die Bedeutung von Regelvorgängen für die Bewegungssteuerung wird kaum ernsthaft bestritten. Ist es überhaupt notwendig, weitere Prozesse anzunehmen? Hier soll die Annahme eines weiteren Prozesses - der Programmsteuerung - zunächst begründet werden und anschließend die heute wohl relativ breit akzeptierte Variante des Konzepts erläutert.

Nach einer klassischen Definition von KEELE (1968) zeichnet sich die Programmsteuerung durch zwei Merkmale aus:

1. Sie erlaubt die Ausführung einer Bewegung auch dann, wenn keine sensorischen Rückmeldungen aus der Körperperipherie existieren. Das Fehlen einer Rückkopplung ist ein Definitionsmerkmal jeder Steuerung (im engeren Sinne).

2. Die motorischen Kommandos werden bereits vor Beginn der Bewegung bereitgestellt. Dieses zweite Merkmal ist eine Besonderheit der Programmsteuerung. Sie ist nicht auf eine stetig vorhandene Eingangsgröße angewiesen, die mehr oder weniger fortlaufend in motorische Kommandos umgesetzt wird, sondern sie besitzt eine gewisse Autonomie. Für eine be-

stimmte Bewegung kann ein Programm bereitgestellt werden, das dann ohne weitere Information von außen die motorischen Kommandos auch für kompliziertere Bewegungsmuster liefert.

Diese beiden Merkmale der Programmsteuerung kann man als Kriterien für die Beantwortung der Frage nutzen, ob es tatsächlich sinnvoll ist, neben den beschriebenen Regelprozessen noch einen weiteren Prozeß der Bewegungssteuerung anzunehmen. Das soll im folgenden geschehen.

### 3.2.1 Begründung des Konzepts

#### *Bewegungen ohneperiphere Rückmeldungen*

Wenn alle visuellen und propriozeptiven Rückmeldungen ausgeschaltet werden, sollte ein Regelkreis nicht mehr funktionsfähig sein. Wäre Regelung der einzige Prozeß bei der Bewegungssteuerung, so sollten Bewegungen unter diesen Bedingungen schwere Störungen aufweisen oder gar nicht mehr stattfinden. Die Tatsache einer nur geringfügigen Störung ist ein klarer Beleg dafür, daß Bewegungen nicht allein das Resultat von Regelvorgängen sind. Ein Beispiel für dieses Ergebnis haben wir bereits mit den Befunden von POLIT und BIZZI (1979) kennengelernt (Abschnitt 2.3). Hier wollen wir etwas genauer auf ein Experiment von TAUB, GOLDBERG und TAUB (1975) eingehen. In diesem Experiment wurden ebenfalls gezielte Bewegungen bei Affen untersucht, bei denen die Propriozeptoren operativ ausgeschaltet waren. Die Operation bestand in einer Durchtrennung afferenter Nervenfasern. Beim Menschen kann ein vergleichbarer Zustand, eine Deafferentierung, z.B. infolge von Verletzungen auftreten.

In der Versuchssituation saßen die Tiere vor einer Sichtblende; eine Öffnung in dieser Sichtblende von 15 x 5 mm stellte das Ziel dar, das entweder direkt vor dem Tier lag oder 6 cm links bzw. 5 cm rechts davon. In einer Shaping-Prozedur lernten die Tiere gezielte Bewegungen bis zum Erreichen einer Leistungsasymptote unter folgenden Bedingungen:

- der Arm konnte gesehen werden,
- der Arm konnte nicht gesehen werden, aber am Ende der Bewegung war der Zeigefinger sichtbar,
- nur das Ziel konnte gesehen werden.

Das Training dauerte bei den deafferentierten Tieren zwei- bis dreimal so lange wie bei den Kontroll-Tieren mit vorhandener Propriozeption.

Nach Abschluß des Trainings folgten, verteilt über mehrere Tage, Testsitzungen, in denen Belohnungen unabhängig von der Güte der Bewegung gegeben wurden. Der variable Fehler, die Streuung der Bewegungs-Endpositionen um ihren Mittelwert, ist in Tabelle 3 gezeigt. Zwei wesentliche Tendenzen sind zu erkennen: Zum einen sind die Bewegungen der Kontroll-Tiere genauer als die der deafferentierten Tiere, und zum anderen werden die Bewegungen bei Ausschaltung des Sehens ungenauer. Wenn man die variablen Fehler in den einzelnen Testsitzungen betrachtet, zeigt sich, daß deafferentierte Tiere an guten Tagen genauer sind als die Kontroll-Tiere an schlechten Tagen.

*Tabelle 3:* Variabler Fehler (in cm) beim Zeigen auf ein Ziel unter verschiedenen Bedingungen mit (Kontroll-Tiere) und ohne Propriozeption (deafferentierte Tiere; nach TAUB et al., 1975, S.183).

	Sehen des Arms	Sehen des Fingers in der End- position	nur Sehen des Ziels
Kontroll- Tiere	0.30	0.33	0.40
deafferentierte Tiere	1.20	1.37	1.82

Die Möglichkeit relativ genauer gezielter Bewegungen ohne visuelle und propriozeptive Rückmeldungen ist ein recht starker Beleg dafür, daß es neben der Regelung wohl noch einen anderen Prozeß bei der Steuerung gezielter Bewegungen geben muß, der von Rückmeldungen aus der Körperperipherie unabhängig ist. Die geringere Genauigkeit der deafferentierten Tiere bei Bewegungen ohne Sehen ist wenig erstaunlich; den Kontroll-Tieren bleibt ja unter diesen Bedingungen noch die Möglichkeit der propriozeptiven Regelung, während den deafferentierten Tieren nur die Programm-Steuerung bleibt.

Warum aber sind die deafferentierten Tiere auch dann ungenauer, wenn eine visuelle Regelung möglich ist? Dieses Ergebnis scheint auf

eine relativ unspezifische Störung der Motorik durch die Deafferentierung zu verweisen, die über die Ausschaltung propriozeptiver Rückmeldungen hinausgeht. Ihre Ursachen könnten z.B. - wegen des Ausfalls des Gamma-Kreises - in einer Änderung der mechanischen Eigenschaften der Muskeln zu suchen sein, wie wir sie in einem früheren Abschnitt besprochen haben.

Wie bereits erwähnt, kann ein der Deafferentierung der Affen vergleichbarer Zustand bei Menschen infolge von Verletzungen eintreten. LASHLEY (1917) untersuchte einen Patienten mit einer Schußverletzung des Rückenmarks, die eine völlige sensorische Unempfindlichkeit des linken Kniegelenks zur Folge hatte. Der Patient bemerkte weder passive Bewegungen, bei denen der VI den Unterschenkel des Patienten bewegte, noch konnte er solche Bewegungen reproduzieren. Auch fehlte der Patellarsehenreflex. Auf der anderen Seite konnte er aber aktive Bewegungen mit dem Unterschenkel ausführen, die sich in der Genauigkeit kaum von denen gesunder Vpn unterschieden.

Das erste Kriterium für die Annahme einer Programm-Steuerung - Bewegungen sind auch ohne sensorische Rückmeldungen aus der Körperperipherie möglich - kann nach den vorliegenden Befunden als erfüllt gelten. Ein solches Ergebnis wirft natürlich die Frage auf, ob Rückmeldungen möglicherweise auch dann, wenn sie vorhanden sind, gar nicht genutzt werden. Für visuelle Rückmeldungen hatten wir gesehen, daß das auf alle Fälle bei Bewegungszeiten unter 200-250 msec der Fall ist. Ähnlich dürfte es sich mit der Auswertung propriozeptiver Rückmeldungen verhalten. Nur ist die kritische Zeit in diesem Fall nicht genau bekannt, da sich propriozeptive Rückmeldungen nicht so leicht experimentell ein- und ausblenden lassen wie visuelle.

Die für die Auswertung von Rückmeldungen prinzipiell benötigte Zeit wird gelegentlich als Argument dafür angeführt, daß Bewegungen nicht ausschließlich das Ergebnis kontinuierlicher Regelvorgänge sein können. CRAIK (1947) und POULTON (1966) weisen darauf hin, daß ein Regelvorgang mit so großen Verzögerungszeiten, wie sie sich in den hier betrachteten Fällen finden, instabil sein müßte. Zumindest sollte ein Ziel nur nach lange dauernden Oszillatio-

nen erreicht werden. Nach LASHLEY (1951) erfordern bestimmte Fertigkeiten wie etwa das Klavierspiel so schnelle Bewegungen, daß ihr Zustandekommen kaum anders zu erklären ist als durch zentrale Programmierung.

### ***Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn: Programmierung***

Bewegungsprogramme sollen vor Beginn einer Bewegung bereitgestellt werden. Das Konzept der Programm-Steuerung impliziert folglich die Existenz vorbereitender Prozesse, die zumindest teilweise spezifisch für die auszuführende Bewegung sind. Vorbereitende Prozesse lassen sich sowohl mit Hilfe physiologischer wie auch psychologischer Methoden nachweisen. Hier möchte ich mich auf Experimente der letzteren Gruppe beschränken; einen Überblick über Experimente mit physiologischen Techniken geben z. B. REQUIN (1980) und BRUNIA, HAAGH und SCHEIRS (1985).

Die Bereitstellung motorischer Kommandos vor Bewegungsbeginn, die Programmierung, sollte eine gewisse Zeit erfordern. Diese Annahme liegt praktisch allen psychologischen Methoden zur Untersuchung von Programmierungsprozessen zugrunde. Eine zweite Annahme ist, daß die Programmierung komplexerer Bewegungen längere Zeit erfordern sollte als die Programmierung einfacher Bewegungen. Dieser Gedanke geht auf die «memory drum»-Theorie von HENRY und ROGERS (1960) zurück und wird dort mit Hilfe der Computer-Analogie begründet. Bevor das Programm eines Rechners gestartet werden kann, muß es aus einem peripheren Speicher, z.B. einem Trommelspeicher, in den Arbeitsspeicher übertragen werden. Dieser Vorgang dauert umso länger, je länger das Programm ist. In ähnlicher Weise soll auch die Übertragung eines «neuro-motorischen Programms» aus einem langfristigen Speicher in die an der Bewegungsausführung beteiligten Zentren länger dauern, wenn es eine komplexere Bewegung zu steuern hat.

HENRY und ROGERS (1960) verglichen die Reaktionszeit bei drei verschiedenen Bewegungen: (1) Heben des Fingers um wenige Millimeter, (2) Griff zu einem Tennisball in 15 cm Höhe und 30 cm horizontaler Entfernung, (3) Schlag gegen einen Tennisball, Rückkehr zum Start-

punkt, Schlag gegen einen zweiten Ball. Die mittleren Reaktionszeiten in verschiedenen Experimenten und mit verschiedenen Vpn betragen 179, 216 und 230 msec.

Dieser ersten Versuchsreihe von HENRY und ROGERS folgten mit einer Latenzzeit von etwa 10 Jahren eine Vielzahl von Experimenten, in denen verschiedene Bewegungsmerkmale systematisch variiert wurden. Hinsichtlich zweier Merkmale scheinen die Ergebnisse einen hohen Grad an Konsistenz aufzuweisen (MARTENIUK & MCKENZIE, 1980a):

a) Die Reaktionszeit steigt mit der Zahl der Elemente in einer Bewegungsfolge, z.B. der Zahl der sukzessiven Anschläge auf einer Schreibmaschine (OSTRY, 1980) oder der Zahl der Wörter (bzw. der betonten Silben) in einer Wortfolge (STERNBERG et al., 1978).

b) Die Reaktionszeit steigt mit der Zahl der simultanen Elemente einer Bewegung. Z.B. ist die Reaktionszeit bei einer beidarmigen Bewegung länger als bei einer einarmigen (GLEN-CROSS, 1973), und sie ist größer, wenn bei einer Hebelbewegung zusätzlich eine Taste am Hebel niederzudrücken ist (KLAPP & ERWIN, 1976).

Bei einer Vielzahl anderer Bewegungsmerkmale sind die Ergebnisse uneinheitlich, so z.B. für die verschiedenen Charakteristikagezielter Bewegungen wie Weite, Zielgröße und Geschwindigkeit. Ein relativ gesicherter Befund ist allenfalls noch der Anstieg der Reaktionszeit bei zunehmender Dauer und/oder sinkender Geschwindigkeit einer Bewegung.

Die Annahme, daß die Programmierung einer komplexeren Bewegung mehr Zeit erfordern sollte als die einer einfacheren Bewegung, ist zwar auf den ersten Blick plausibel, auf den zweiten aber nicht mehr. Welche von zwei Bewegungen komplexer ist, können wir zunächst nur intuitiv entscheiden, und zwar auf der Grundlage der sichtbaren, «oberflächlichen» Bewegungsmerkmale. Eine Bewegung aber, die an der Oberfläche komplexer erscheint, muß nicht notwendig auch durch ein komplexeres oder längeres Programm gesteuert werden. Immer dann, wenn die Reaktionszeiten für zwei scheinbar unterschiedlich komplexe Bewegungen nicht verschieden sind, kann das also auf das Fehlen eines Unterschiedes in der Komplexität der zugehörigen Bewegungsprogramme zurückgeführt werden. Die Theorie

von HENRY und ROGERS ist somit nicht widerlegbar. Ihr Wert dürfte vorwiegend darin bestehen, die Untersuchung der Programmierung mit Hilfe von Reaktionszeitexperimenten angeregt zu haben.

Der Gedanke, daß ein Bewegungsprogramm vor dem Beginn einer Bewegung aus einer Art Langzeitgedächtnis in die an der Bewegungssteuerung beteiligten Zentren übertragen werden muß, legt die Auffassung nahe, daß das Programm etwas Ganzheitliches ist, und daß es für jede Bewegung ein eigenes Programm geben müsse. Tatsächlich aber scheint ein Bewegungsprogramm eine Reihe von unterscheidbaren Spezifikationen zu umfassen, die die einzelnen Merkmale einer Bewegung festlegen. Für diese Auffassung sprechen Ergebnisse aus Wahlreaktionszeitexperimenten, in denen z.B. auf das eine oder andere Signal hin eine Bewegung A oder eine Bewegung B möglichst schnell auszuführen ist.

Wenn es für die Bewegung A ein ganzheitliches Programm gäbe, das jeweils vor der Ausführung «geladen» werden müßte, dann sollte die Reaktionszeit bei der Bewegung A stets gleich sein, egal, was für eine Bewegung B ist. Als Beispiel möge A das Heben und Senken des rechten Zeigefingers in 200 msec sein. Die Reaktionszeit sollte nicht davon abhängen, ob die Bewegung B ein Heben und Senken des linken Zeigefingers in ebenfalls 200 msec ist oder aber die Bewegung 400 msec dauern soll.

Ganz andere Ergebnisse sind zu erwarten, wenn die Programme für die Bewegungen A und B unterscheidbare Spezifikationen umfaßten. Im Beispiel sind das je eine Spezifikation für «Hand» und «Dauer» der Bewegung. Wenn die Bewegungen A und B gleiche Dauer haben, braucht die Vp mit der Festlegung der entsprechenden Spezifikation gar nicht zu warten, bis das Reaktionssignal dargeboten wird. Diese Spezifikation kann vielmehr vorher festgelegt werden - sie kann vorprogrammiert werden. Eine Vorprogrammierung der Dauer sollte dagegen nicht möglich sein, wenn die Bewegungen A und B sich in der Dauer unterscheiden. Bei gleicher Dauer muß nach der Darbietung des Reaktionssignals also nur noch die Hand spezifiziert werden, bei unterschiedlicher Dauer aber auch die Dauer der geforderten Bewegung. In der zweiten Bedingung sollte

die Reaktionszeit daher länger ausfallen als in der ersten. Das ist tatsächlich der Fall (HEUER, 1984a). Die Reaktionszeit hängt also nicht nur davon ab, welche Bewegung tatsächlich ausgeführt wird, sondern auch davon, wie stark sich andere Bewegungen, die ebenfalls hätten gefordert sein können, von der ausgeführten Bewegung unterscheiden. Je nach der Relation zwischen den alternativen Bewegungen können unterschiedlich viele Spezifikationen vorprogrammiert werden.

Der Gedanke, daß Bewegungsprogramme keine einheitlichen Gebilde sind, sondern unterschiedliche Spezifikationen umfassen, die je nach der Relation zwischen den alternativen Bewegungen in einer Wahlsituation in unterschiedlichem Maße vorprogrammiert werden können, hat zu einem in den letzten Jahren häufig verwendeten methodischen Vorgehen geführt. Das Prinzip der Methode wurde wohl zuerst von KLAPP (1977) verwendet und von ROSENBAUM (1980) voll entwickelt. Eine einigermaßen der Methode und den mit ihr gefundenen Ergebnissen gerecht werdende Darstellung erfordert aber viel Platz, der hier mit einem Hinweis auf ein Sammelreferat von ROSENBAUM (1983) eingespart werden soll.

Obwohl die Reaktionszeitexperimente zur Programmierung ein manchmal verwirrendes Bild liefern, zeigt die Existenz einiger klarer und konsistenter Ergebnisse doch, daß vor dem Beginn einer Bewegung vorbereitende Prozesse ablaufen, die in systematischer Beziehung zu den Merkmalen dieser Bewegung stehen. Auch das zweite Kriterium für die Annahme einer Programm-Steuerung kann demnach als erfüllt gelten.

### 3.2.2 Generalisierte Bewegungsprogramme

Die Ergebnisse der Reaktionszeitexperimente zur Programmierung lassen den Schluß zu, daß ein Bewegungsprogramm kein einheitliches Gebilde ist, sondern «stückweise» aufgebaut wird. Wenn eine Bewegung auszuführen ist, wird offenbar nicht einfach ein dafür geeignetes fertiges Programm aus einem Langzeitspeicher abgerufen, sondern es sind eine Reihe einzelner Spezifikationen erforderlich, die die Einzelheiten der auszuführenden Bewegung festlegen. Diese Folgerung wird durch einige recht allgemeine Überlegungen unterstützt.

Ein Mensch kann sehr viele unterschiedliche Bewegungen ausführen; allein die möglichen Lautbildungen gehen wohl in die tausende. Ist es angesichts der großen Zahl eine vernünftige Annahme, daß Programme für alle unterschiedlichen Bewegungen gespeichert sind? Und wenn jede beherrschte Bewegung durch ein eigenes Programm gesteuert wird, wie können wir überhaupt neue Bewegungen ausführen? Diese beiden Fragen bezeichnet SCHMIDT (1975) als das Speicherproblem und das Neuigkeitsproblem. Beide Probleme verschwinden, wenn Bewegungsprogramme nicht als fertige Einheiten gedacht werden, sondern als «generalisiert».

Das Konzept des generalisierten Bewegungsprogramms ist eine Variante der Auffassung, daß Bewegungsprogramme Mengen von Spezifikationen umfassen. Das besondere an diesem Konzept ist, daß zwei prinzipiell verschiedene Arten von Spezifikationen unterschieden werden. Eine Art von Spezifikationen wird als «Programme» bezeichnet, die zweite als «Parameter». Ein Programm steuert jeweils eine Klasse von Bewegungen; welche spezielle Bewegung aus dieser Klasse realisiert wird, wird durch die Parameter bestimmt. Bei der Ausführung einer gezielten Bewegung z.B. wird zunächst das Programm für diese Klasse von Bewegungen bereitgestellt. Merkmale wie Weite und Geschwindigkeit werden dann durch die Parameter festgelegt. Diese Unterscheidung zwischen Programm und Parametern entspricht dem Alltagseindruck, daß sich Bewegungen zum einen qualitativ und zum anderen quantitativ voneinander unterscheiden.

Welche Merkmale von Bewegungen werden durch Programme festgelegt und welche durch Programm-Parameter? Für die Beantwortung dieser Frage ist es notwendig, nach invarianten Merkmalen von Bewegungen zu suchen, also Merkmalen, die unverändert bleiben, wenn ein anderes Merkmal variiert wird. Ein invariantes Merkmal definiert eine Klasse von Bewegungen, die sich im variierenden Merkmal unterscheiden. Während das invariante Merkmal durch das Programm festgelegt werden sollte, sollte das variierende Merkmal durch Programm-Parameter bestimmt werden.

### Invariante Merkmale von Bewegungen

Die wohl am häufigsten genannten invarianten Merkmale sind die relativen Zeitintervalle innerhalb einer Bewegung und die relativen Kräfte. Dauer, mittlere Kraft und ausführende Muskelgruppe werden dagegen als durch Programm-Parameter bestimmte Merkmale angesehen (SCHMIDT, 1980). Im folgenden soll diese Auffassung genauer untersucht werden.

Die Auffassung, daß die relativen Zeitintervalle innerhalb einer Bewegung durch das Programm festgelegt werden, ist vor allem durch die Beobachtung invarianter zeitlicher Strukturen («invariant relative timing») bei Variation der Dauer unterschiedlichster Bewegungsmuster begründet. Als Beispiel soll das Laufen dienen. SHAPIRO, ZERNICKE, GREGOR und DIESTEL (1981) filmten fünf erfahrene Langstreckenläufer auf einem Laufband bei Geschwindigkeiten von 3-12 km/h. Bei einer Geschwindigkeit von 7-8 km/h wechselten die Läufer ihre Gangart.

Für ihre Analyse benutzten SHAPIRO et al. eine gebräuchliche Einteilung des Schrittzklus. Die Schwingphase beginnt, wenn sich das Bein in der hinteren Position vom Boden löst, und endet, wenn es in der vorderen Position wieder aufsetzt. Sie wird unterteilt in die Flexionsphase F und die erste Extensionsphase E1. Nach dem Abheben des Beins wird das Kniegelenk zunächst gebeugt und anschließend wieder gestreckt; der minimale Kniewinkel definiert die Grenze zwischen den Phasen F und

E1. Mit dem Aufsetzen des Beins in der vorderen Position beginnt die Stemmphase. Zunächst gibt das Kniegelenk unter dem verlagerten Körpergewicht trotz aktiver Streckmuskeln nach (Phase E2), anschließend, während der Körper nach vorgeschoben wird, wird das Bein wieder gestreckt (Phase E3); die Grenze zwischen den Phasen E2 und E3 ist wieder durch den minimalen Kniewinkel definiert.

Abbildung 7 zeigt die relative Dauer jeder der vier Phasen in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit; die mittlere Dauer jeder Phase ist durch die Gesamtdauer des Zyklus dividiert. Während sich beim Übergang von einer Gangart zur anderen deutliche Änderungen finden, sind die Änderungen innerhalb jeder Gangart nur geringfügig und statistisch nicht zuverlässig.

Für Fertigkeiten wie das Laufen haben sich im Verlauf der Stammesgeschichte möglicherweise ganz spezielle Strukturen der Bewegungssteuerung entwickelt. Invarianz zeitlicher Strukturen findet sich aber nicht nur bei solchen Fertigkeiten, sondern auch bei «kulturellen Fertigkeiten» wie dem Schreibmaschinenschreiben: Die relativen Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Anschlägen bleiben konstant, wenn die Dauer für das Tippen eines Wortes variiert (TERZUOLO & VIVIANI, 1980). Sogar bei Folgen von Zielbewegungen, die nur für relativ kurze Zeit im Labor geübt wurden, wird die gelernte zeitliche Struktur beibehalten, wenn die Vpn instruiert werden, die Folge

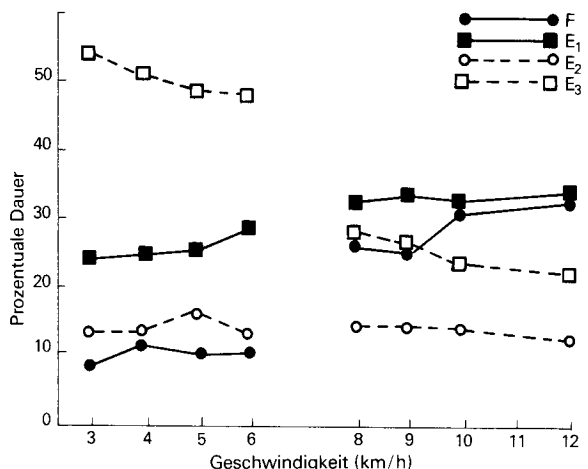


Abbildung 7: Relative Dauer von Phasen des Schrittzklus bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Schwingphase: F und E1; Stemmphase: E2 und E3 (nach SHAPIRO et al., 1981, S.42).

möglichst schnell und unter Vernachlässigung der gelernten Zeiten auszuführen (z. B. CARTER & SHAPIRO, 1984). Die Beobachtung invarianter relativer Zeitintervalle bei einer Anzahl recht unterschiedlicher Bewegungsmuster stützt die Auffassung, daß die zeitliche Struktur einer Bewegung durch ein generalisiertes Bewegungsprogramm festgelegt wird, während ihre Dauer durch einen Parameter bestimmt ist. Bei Variation des globalen Geschwindigkeits- oder Zeit-Parameters läuft das Programm also langsamer oder schneller ab. Angesichts der recht klaren Befunde zur Invarianz der zeitlichen Struktur scheint manchmal eine Tendenz zu bestehen, die oft vorhandenen kleinen Abweichungen von der perfekten Invarianz zu übersehen. In Abbildung 7 ist z.B. zu erkennen, daß die Stemmphase (E2 + E3) bei zunehmender Geschwindigkeit des Gehens zu einer relativen Verkürzung tendiert, die Schwingphase (F + E1) aber zu einer relativen Verlängerung. Wenn man von einer Invarianz der zeitlichen Struktur spricht, so ist damit in der Regel also nicht eine perfekte Invarianz gemeint, sondern eine deutlich erkennbare Tendenz, der gegenüber die Abweichungen vernachlässigt werden können.

In einigen Experimenten zeigen sich klare Abweichungen von der Invarianz der zeitlichen Struktur, z.B. beim Schreibmaschineschreiben (GENTNER, 1982) oder bei gezielten Bewegungen (HEUER, 1984b). Der Grund dafür ist etwas unklar. Zum einen kann es sein, daß bei hinreichend scharfen Methoden der Analyse im Prinzip immer Abweichungen gefunden werden können, da die Invarianz der zeitlichen Struktur wohl selten perfekt ist. Auf der anderen Seite aber ist auch nicht auszuschließen, daß die Invarianz der zeitlichen Struktur doch kein nahezu universelles Merkmal ist, sondern nur in bestimmten Fällen beobachtet werden kann.

Der Gedanke eines globalen Zeit- oder Geschwindigkeits-Parameters generalisierter Bewegungsprogramme legt die Vermutung nahe, daß es auch einen globalen Amplituden- oder Kraft-Parameter geben müsse. Eine Bewegung hat ja nicht nur einezeitliche Ausdehnung, sondern auch eine räumliche. Die Hypothese einer Dualität bei der Steuerung zeitlicher undräumlicher Aspekte einer Bewegung wurde wohl

zuerst von v. HOLST (1939) formuliert. Bei menschlichen Bewegungen bezieht er sich auf das sog. Gesetz der konstanten Figurzeit (DERWORT, 1938; HACKER, 1974). Wenn man gleiche Figuren unterschiedlicher Größe mit dem Finger nachfährt, ist die benötigte Zeit näherungsweise unabhängig von der Größe. Die Variation der Größe scheint also allein durch die Variation eines globalen Kraft- oder Amplituden-Parameters zustandezukommen, bei dessen Variation andere Bewegungsmerkmale wie relative Kräfte und Zeitintervalle invariant bleiben.

Für die Existenz eines Kraft-Parameters beim Schreiben sprechen Ergebnisse von DENIER VAN DER GON und THURING (1965). Wenn z. B. «momom» mit unterschiedlicher Größe geschrieben werden soll (2-11 mm Höhe), bleibt die Dauer praktisch unverändert. Die Größenvariation kommt allein durch Variation der Kraft zustande. Dabei werden nicht nur die Kräfte in der Ebene der Schreibfläche verändert, sondern mit der Größe der Schrift steigt auch der Schreibdruck und seine Variabilität. Die Veränderung der Größe durch einen globalen Kraft-Parameter findet sich aber nur dann, wenn ein ganzes Wort kleiner oder größer geschrieben werden soll. Wenn die Größe innerhalb eines Wortes variiert wird, z.B. bei «lelele», wird die zeitliche Struktur der Muskelkontraktionen verändert; Variation der Größe wird dann erzielt, indem die Kräfte für unterschiedliche Zeit in die eine oder andere Richtung wirken.

Neben Dauer und Kraft nennt SCHMIDT (1980) die beteiligte Muskelgruppe als drittes Merkmal von Bewegungen, das durch Programm-Parameter festgelegt wird. Für diese Hypothese spricht z.B. die Beobachtung, daß die Handschrift beim Schreiben mit unterschiedlichen Muskelgruppen relativ unverändert bleibt, also invariante Merkmale aufweist. Diese Beobachtung diente PEW (1974) unter anderem zur Begründung des Konzepts generalisierter Bewegungsprogramme.

Insgesamt stützen die beschriebenen Befunde vorläufig das Konzept eines generalisierten Bewegungsprogramms mit Dauer, Kraft und beteiligter Muskelgruppe als Parameter. Die Suche nach invarianten Merkmalen ist aber ein noch nicht abgeschlossenes Kapitel der For-

schung. Es ist nicht auszuschließen, daß das Konzept des generalisierten Bewegungsprogramms in den kommenden Jahren in seiner inhaltlichen Ausfüllung erheblich modifiziert werden muß.

### ***Bewegungsprogramme und koordinative Strukturen***

Analogien bergen stets die Gefahr, daß sie zu weit geführt werden. Das Konzept des Bewegungsprogramms ist eine Analogie zum Programm eines Computers. Man könnte daher zu der Auffassung kommen, daß der Inhalt des Programms im Prinzip beliebig sein kann. Das ist aber nicht der Fall, wie das Beispiel des Zeichnens belegt: Wenn ein generalisiertes Bewegungsprogramm eine bestimmte Figur wie etwa eine Ellipse festlegt, ist damit auch die zeitliche Struktur der Bewegung weitgehend festgelegt und kann nicht mehr beliebig gewählt werden.

DERWORT (1938) beschreibt eine einfache Demonstration des Zusammenhangs zwischen den figuralen und zeitlichen Merkmalen der Bewegung beim Zeichnen. Es ist praktisch unmöglich, bei geschlossenen Augen einen Kreis zu zeichnen und dabei die Geschwindigkeit systematisch zu variieren, so daß sie an zwei gegenüberliegenden Abschnitten des Kreisumfangs groß ist, an den anderen beiden aber klein. Die Variation von Geschwindigkeit und Krümmung der gezeichneten Linie ist vielmehr so miteinander verknüpft, daß im Beispiel in der Regel eine Ellipse entsteht. Wenn keine besondere Instruktion für die Geschwindigkeit gegeben wird, ist sie generell umso kleiner, je stärker die Krümmung ist. Eine genauere Darstellung des Zusammenhangs gibt VIVIANI (1986).

Zusammenhänge dieser Art werden vom Konzept des generalisierten Bewegungsprogramms nicht berücksichtigt. Es liefert keinen begrifflichen Rahmen für die Abgrenzung zwischen solchen Bewegungen, die zwar physikalisch möglich sind, aber nie oder fast nie ausgeführt werden, und solchen, die im Repertoire von Menschen tatsächlich vorkommen. Das Konzept der koordinativen Struktur und die mit diesem Konzept verbundene Denkweise ist dagegen von vornherein auf die Einschränkungen ausgerichtet, denen menschliche Bewegungen unterliegen.

Der Begriff der koordinativen Struktur wird gelegentlich als Bezeichnung für komplizierte Reflexe verwendet, bei denen die Reflexantwort nicht nur eine einzelne Muskelzuckung ist, sondern aus einem koordinierten Bewegungsmuster besteht (z.B. EASTON, 1978). In der Regel wird eine koordinative Struktur aber als flexibel gedacht, als etabliert für einen bestimmten Bewegungszweck. Sie ist eine Kopplung zwischen den an einer Bewegung beteiligten Muskeln bzw. zwischen den zugeordneten zentralnervösen Strukturen, wie wir sie auch bei komplexen Reflexen finden, aber ohne deren Inflexibilität. Im Zusammenhang der Koordination werden wir solche Kopplungen ausführlich besprechen.

Was ist die Beziehung zwischen dem Konzept des Bewegungsprogramms und dem der koordinativen Struktur? In einer Reihe von Arbeiten werden diese Konzepte als radikale Gegensätze gegenübergestellt (z.B. KELSO, 1981). Tatsächlich sind die allgemeinen Rahmenmodelle, in die sie eingebettet sind, sehr verschieden voneinander. Dennoch handelt es sich meines Erachtens nicht um alternative Konzepte, sondern vielmehr um komplementäre Sichtweisen, die für verschiedene Zwecke in unterschiedlichem Maße geeignet sind.

Das Konzept des Bewegungsprogramms zielt auf eine *direkte* Beschreibung von Bewegungsmerkmalen. Im Zentrum des Interesses stehen die Prozesse vor Beginn einer Bewegung, durch die diese Merkmale festgelegt werden, und die Invarianzen, die bei Variation z.B. der Dauer einer Bewegung zu beobachten sind. Gewissermaßen als die «Hardware», die ein Bewegungsprogramm realisiert, kann man sich eine neuronale Struktur denken, ein Netz von Nervenzellen. Das Konzept der koordinativen Struktur betrifft die Abhängigkeiten, die durch dieses neuronale Netz zwischen verschiedenen Muskeln hergestellt werden. Wenn man von koordinativen Strukturen spricht, zielt die Beschreibung also nicht mehr auf die Bewegungsmerkmale an sich, sondern auf die durch das neuronale Netz festgelegten Abhängigkeiten zwischen Muskeln; der raum-zeitliche Verlauf der Bewegung wird als Folge dieser Abhängigkeiten angesehen. Er wird also nicht direkt beschrieben, sondern nur *indirekt*.

Diese kurze Beschreibung des Konzepts der

koordinativen Struktur wird dem allgemeinen Rahmen, in den es eingebettet ist, nicht gerecht. Daher sei auf die einführende Darstellung von KELSO und KAY (1987) verwiesen.

### 3.3 Das Zusammenwirken von Regelung und Programmsteuerung

Nachdem nun Regelung und Programmsteuerung jeweils für sich besprochen sind, bleibt die Frage nach ihrem Zusammenwirken. Diese Frage ist wenig untersucht. Die Ursache dafür ist vermutlich, daß Regelung und Programmsteuerung lange Zeit als alternative Modi der Bewegungssteuerung gesehen wurden. Die Frage nach dem Zusammenwirken gewinnt ja erst dann eine zentrale Bedeutung, wenn man sie als komplementäre Modi ansieht. Im folgenden sollen vier Möglichkeiten des Zusammenwirkens skizziert werden.

#### 3.3.1 Regelung und Programmsteuerung in verschiedenen Dimensionen

Die einfachste Form des Zusammenwirkens von Regelung und Programmsteuerung findet sich dann, wenn eine Bewegung in der einen Dimension durch ein Programm gesteuert wird, in einer anderen Dimension aber geregelt. Ein Beispiel ist die Eiroll-Bewegung der Graugans. Die Gans rollt mit Hilfe des Schnabels das Ei auf ihren Körper zu. Die Bewegung des Schnabels auf den Körper zu geht einher mit seitlichen Ausgleichsbewegungen, die erforderlich sind, damit das Ei nicht neben dem Schnabel wegrutscht. Wenn nun das Ei nach Beginn der Bewegung entfernt wird, so wird die Bewegung des Schnabels auf den Körper zu weitergeführt, während die seitlichen Ausgleichsbewegungen fortfallen. Die Komponente in Längsrichtung des Körpers wird also einmal ausgelöst und läuft dann ohne weitere Berücksichtigung der Umwelt zu Ende; die Komponente senkrecht zur Längsachse des Körpers wird dagegen kontinuierlich an die verändernde Umwelt angepaßt.

Eine ähnliche Unterteilung in zwei Komponenten dürfte sich bei der Katze finden, die, wenn sie von oben auf eine Tischkante hin bewegt wird, ihre Pfote ausstreckt. Wenn die Tischkante mit Aussparungen versehen ist, muß das Bein nicht nur gestreckt werden, sondern das

Tier muß es auch seitlich bewegen, damit es nicht in eine der Aussparungen gerät. Die Streckung und die seitliche Anpassung sind in ihrer Entwicklung an unterschiedliche Voraussetzungen gebunden. Die Streck-Komponente entwickelt sich auch dann, wenn das Tier die eigene Pfote nie gesehen hat. Die seitliche Komponente dagegen erfordert vorhergehendes Sehen der aktiv bewegten Pfote. Einen genaueren Überblick über die unterschiedlichen Entwicklungsbedingungen gibt HEIN (1980).

#### 3.3.2 Überwachung der Programmsteuerung durch einen Regelkreis

Das zweite Prinzip des Zusammenwirkens von Regelung und Steuerung haben wir am Beispiel des Gamma-Kreises des Rückenmarks kennengelernt, nämlich die Überwachung eines Steuervorgangs durch einen Regelkreis und das etwaige korrigierende Eingreifen. Dieses Prinzip findet sich vermutlich bei gezielten Bewegungen. Während des ersten Teils wird die Bewegung durch ein Programm gesteuert, und zum Ende beseitigt der überwachende visuelle Regelvorgang die restliche Zielabweichung. Diese Auffassung wurde zuerst von WOODWORTH (1899) vertreten, der zwischen «initial impulse» und «current control» unterscheidet. Die gegen Ende der Zielbewegung zunehmende Bedeutung der Regelung zeigt sich z.B. darin, daß visuelle Rückmeldungen gegen Ende der Bewegung einen wesentlich stärkeren Einfluß auf die Genauigkeit haben als zu Beginn (s. Abschnitt 3.1.1).

In welchem Maße der überwachende Regelvorgang gegen Ende einer gezielten Bewegung den Verlauf bestimmt, hängt natürlich vom Grad der Übung und der erforderlichen Genauigkeit ab. Wenn die Genauigkeitsanforderungen gering sind oder wenn eine gezielte Bewegung sehr hoch geübt ist, sollte die Programmsteuerung allein hinreichend genau sein. In dem Maße aber, in dem die Genauigkeitsanforderungen steigen, sollte die Bedeutung des überwachenden Regelvorgangs zunehmen. Damit geht eine zunehmende Aufmerksamkeit für die Zielbewegung einher. Die zunehmenden Aufmerksamkeitsanforderungen zeigen sich in den sog. Testreaktionszeiten; das sind Reaktionszeiten auf ein zusätzliches Signal, das während der Bewegung dargeboten wird. Die

Verarbeitung dieses Signals wird in dem Maße verlangsamt, in dem die  $V_p$  durch die Zielbewegung beansprucht ist. Am Ende von Zielbewegungen zu kleinen Zielen ist die Verlangsamung besonders stark (s. HEUER & WING, 1984).

### 3.3.3 Abtast-Regelung

Das Prinzip der Abtast-Regelung bei menschlichen Bewegungen wurde zuerst von CRAIK (1947) beschrieben. CRAIK beobachtete diskrete Korrekturbewegungen beim Tracking (s. Abschnitt 3.1.3), die etwa alle halbe Sekunde auftraten. Er postulierte, daß in regelmäßigen Zeitintervallen die Abweichung zwischen Zielpunkt und Folgepunkt erfaßt und durch eine ballistische, programmgesteuerte Bewegung korrigiert wird. Während der Programmierung und Ausführung der Korrekturbewegung soll keine Information aus der Umwelt mehr aufgenommen werden. Erst nach der Bewegung, die den Fehler bis auf einen kleinen Rest beseitigt, beginnt der Zyklus von Fehlererfassung (Abtastung) und Korrektur erneut.

CROSSMAN und GOODEVE (1963/1983) wendeten das Prinzip der Abtast-Regelung auf die Genauigkeit gezielter Bewegungen an, speziell auf eine Interpretation des FITTSSchen Gesetzes. Das ist eine der bekanntesten und stabilsten Gesetzmäßigkeiten bei gezielten Bewegungen.

Wie die meisten Dinge, so kann man auch Zielbewegungen entweder langsam undgenau oder schnell und ungenau ausführen. Das FITTSSche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Bewegungszeit und Genauigkeit bei unterschiedlichen Bewegungsweiten (FITTS, 1954):

$$T = a + b \cdot \log_2 (2D/W_e)$$

mit  $T$  als Bewegungszeit,  $D$  als Weite,  $W_e$  als variablem Fehler (Standardabweichung der Bewegungsendpunkte um ihren Mittelwert) und  $a$  und  $b$  als Konstanten. Anstelle der experimentell bestimmten Größe  $W_e$  wird oft die Breite des Ziels ( $W$ ) in die Gleichung eingesetzt.

Das FITTSSche Gesetz ist unter sehr vielen Bedingungen zumindest näherungsweise gültig (KEELE, 1981). Die Bewegungszeit ( $T$ ) bleibt also konstant, wenn das Verhältnis von Weite ( $D$ ) undzielbreite( $W$ ) konstant bleibt: Ein Anstieg der Bewegungszeit infolge einer größeren

Weite z.B. kann vermieden werden, wenn die Breite des Ziels proportional vergrößert wird. Wenn das Verhältnis  $D/W$  wächst, steigt die Bewegungszeit zunächst schneller und dann langsamer an. Bei der Darstellung der Bewegungszeit gegen den Logarithmus des Verhältnisses  $D/W$  erhält man eine Gerade. (Die Verwendung des Logarithmus zur Basis 2 und des Verhältnisses  $2D/W$  statt  $D/W$  ist durch die theoretischen Überlegungen von FITTS (1954) begründet, die aber als unzutreffend gelten, und ist heute nur noch eine Konvention. Die Einhaltung dieser Konvention erlaubt es, die Konstanten  $a$  und  $b$  über verschiedene Untersuchungen hinweg zu vergleichen.) Einen umfassenderen Überblick über den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit gezielter Bewegungen, auch über Alternativen zum FITTSSchen Gesetz, geben HANCOCK und NEWELL (1985).

Wie kann das FITTSSche Gesetz mit Hilfe des Prinzips der Abtast-Regelung interpretiert werden? CROSSMAN und GOODEVE (1963/1983) postulieren, daß eine Zielbewegung zu einem Ziel in der Entfernung  $D$  aus einer Folge von Teilbewegungen mit konstanter Dauer  $t$  besteht. Jede Teilbewegung überbrückt den Anteil  $p$  an der Reststrecke. Nach der ersten Teilbewegung ist also die Strecke  $pD$  zurückgelegt, nach der zweiten die Strecke  $pD + pD(1 - p)$ , nach der dritten die Strecke  $pD + pD(1 - p) + pD(1 - p)^2$  usw. Wieviele Teilbewegungen der Dauer  $t$  sind nötig, bis das Ziel erreicht wird? Das Ziel hat die Breite  $W$ ; es wird also erreicht mit der Teilbewegung, nach der die Summe der Weiten aller Teilbewegungen größer oder gleich  $D - 0.5 W$  ist. CROSSMAN und GOODEVE zeigen, daß die Zahl der erforderlichen Teilbewegungen und damit die Bewegungszeit etwa linear mit dem Schwierigkeitsindex («index of difficulty»)  $\log_2(2D/W)$  ansteigt. Diese Begründung des FITTSSchen Gesetzes hat die Arbeit von CROSSMAN und GOODEVE zu dem im Bereich der Psychomotorik wohl am häufigsten zitierten unveröffentlichten Aufsatz gemacht; die Veröffentlichung erfolgte mit 20jähriger Verspätung erst im Jahre 1983.

Trotz seiner Popularität ist das Modell der Abtast-Regelung für die Begründung des FITTSSchen Gesetzes nicht zutreffend. Nach dem Modell ist z.B. die Weite der ersten Teilbewe-

gung (pD) nur von der Entfernung des Ziels abhängig, aber nicht von seiner Breite. Die Breite des Ziels soll sich nur auf die Anzahl der Teilbewegungen auswirken. Tatsächlich hängt aber auch schon die erste identifizierbare Teilbewegung von den Genauigkeitsanforderungen ab (JAGACINSKI et al., 1980; LANGOLF et al., 1976). Ein kleineres Ziel hat also einen von vornherein anderen Bewegungsverlauf zur Folge; es wirkt sich nicht nur in einer vergrößerten Anzahl von Teilbewegungen aus.

Die von CROSSMAN und GOODEVE postulierten Teilbewegungen sind im Verlauf gezielter Bewegungen nicht immer aufzufinden (s. Abb. 1). Als allgemeine Grundlage für eine Theorie gezielter Bewegungen ist das Prinzip der Abtastregelung daher nicht geeignet. Unter bestimmten Bedingungen finden sich aber klar voneinander abgegrenzte diskrete Korrekturen (z.B. WING & MILLER, 1984), die vermuten lassen, daß ein zweiter oder auch dritter programmgesteuerter Bewegungsabschnitt existiert. Generell aber ist unklar, wann Segmentierungen von Bewegungsverläufen in diskrete programmgesteuerte Abschnitte auftreten und wann nicht.

### 3.3.4 Parameter-Regelung

Ein letztes Prinzip des Zusammenwirkens von Regelung und Programmsteuerung schließlich ist das der Parameter-Regelung. Wenn eine Bewegung durch ein generalisiertes Bewegungsprogramm gesteuert wird, sollten Regelprozesse möglich sein, bei denen die Regelgröße nicht mehr unmittelbar die Position von Körpergliedern ist, sondern vielmehr ein Parameter eines Bewegungsprogramms. Z.B. werden die Artikulationsbewegungen beim Sprechen vermutlich durch generalisierte Bewegungsprogramme gesteuert, während die Lautstärke durch Programm-Parameter festgelegt wird. Die Regelung der Lautstärke, also ihre Abhängigkeit von der Rückkopplung der eigenen Stimme, zeigt sich z.B. dann, wenn zwei Personen miteinander sprechen, von denen die eine gleichzeitig über einen Kopfhörer Musik hört. Diese spricht in der Regel sehr laut, die andere Person aber in normaler Lautstärke, obwohl dem Zweck der Verständigung das Gegenteil dienlicher wäre.

Das wohl bekannteste experimentelle Beispiel

für Parameter-Regelung beschreibt PEW (1966). Die Aufgabe der Vp bestand darin, eine Marke in der Mitte eines Bildschirms zu halten, indem sie in schneller Folge alternierend auf zwei Tasten drückte. Nach jedem Tastendruck wurde die Marke mit einer konstanten Beschleunigung in die eine oder andere Richtung bewegt. Zu Beginn der Übung waren die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Tastenbetätigungen relativ groß, so daß die Marke mit großen Amplituden um die Bildschirmmitte oszillierte. Die Tätigkeit machte den Eindruck, als drückte die Vp eine Taste, wartete auf die folgende Bewegung der Marke, drückte dann die andere Taste, usw.

Nach längerer Übung erfolgten die Betätigungen der Tasten in sehr schneller Abfolge, so daß die Marke nur noch geringfügig um die Bildschirmmitte oszillierte. Da aber die Intervalle zwischen den Tastenbetätigungen nicht völlig gleichmäßig waren, driftete die Marke langsam von der Mitte des Bildschirms weg. Dieser durch die Drift entstehende Fehler wurde von den Vpn auf zwei verschiedene Arten korrigiert. Einige Vpn unterbrachen die schnelle Bewegungsfolge und korrigierten den Fehler mit wenigen langsameren Bewegungen; andere Vpn kehrten das Verhältnis der Zeitintervalle zwischen den Tastenbetätigungen um und damit die Richtung der Drift. Statt des Zeitpunktes einzelner Fingerbewegungen werden nach längerer Übung also Verhältnisse von Zeitintervallen an die Aufgabenerfordernisse angepaßt, und die relevante Information ist nicht mehr die einzelne Auslenkung der Marke, sondern die Drift, die von kleinen Oszillationen überlagert ist.

## 4. Koordination von Bewegungen

Auch wenn im Experiment Beugungen und Streckungen eines Gelenks des öfteren isoliert untersucht werden, im Alltag sind derart einfache Bewegungen äußerst selten. Schon am einfachen Greifen nach einem Objekt sind eine Reihe von Gelenken beteiligt, beginnend bei der Schulter und endend bei den Fingern. Wie werden die Einzelbewegungen in den verschiedenen Gelenken koordiniert? Die gleiche Frage stellt sich bei beidhändigen Bewegungen, und

sie stellt sich in noch allgemeinerer Weise im Hinblick auf die Beziehung zwischen Zielmotorik und Stützmotorik. Wennwurz. B. unseren Arm vom Körper weg bewegen, verändert sich die Lage des Körperschwerpunktes. Um dennoch das Gleichgewicht zu halten, muß die Armbewegung mit ausgleichender Aktivität in den Muskeln der Beine einhergehen. Bevor ich auf solche Einzelphänomene der Koordination eingehe - die intersegmentale Koordination, die intermanuelle Koordination, den Rhythmus und schließlich die Beziehung zwischen Zielmotorik und Stützmotorik - möchte ich einige allgemeinere Überlegungen anstellen.

#### **4.1 Über die Grundlagen der Koordination**

Die Abhängigkeit zwischen Bewegungen unserer verschiedenen Gliedmaßen ist doppelgesichtig. Auf der einen Seite fördert sie unsere Bewegungsleistung bei bestimmten biologisch wichtigen Aktivitäten. Beim Laufen z.B. schwingen die Arme mehr oder weniger von allein im Gegenrhythmus zu den Beinbewegungen. Wenn das Bein auf einer Seite nach vorn bewegt wird, wird der Arm nach hintenbewegt. Durch die Armbewegung erfolgt also eine Kompensation für die Verlagerung des Körperschwerpunktes als Folge der Beinbewegung. Auf der anderen Seite aber beeinträchtigen die Abhängigkeiten unsere Bewegungsleistungen. Es ist z.B. relativ einfach, mit beiden Händen gleichzeitig zwei Kreise zu zeichnen. Mit der einen Hand einen Kreis und mit der anderen ein Quadrat zu zeichnen, ist dagegen kaum oder gar nicht möglich.

Was ist die Grundlage solcher Abhängigkeiten? Für eine recht globale Antwort ist das Konzept der koordinativen Struktur nützlich. Eine koordinative Struktur ist eine Gruppe von Muskeln, deren Aktivität in bestimmter Weise aneinander gekoppelt ist. Die zugrundeliegenden neuronalen Netze können zwar prinzipiell flexibel für bestimmte Bewegungen aufgebaut werden, aber dabei sollten Reflex-Zentren eingeschlossen werden. Reflex-Zentren leisten bestimmte Verknüpfungen zwischen Muskeln, die durch überdauernde zentralnervöse Strukturen bestimmt sind. Diese dauerhaften Verknüpfungen sollten vor allem biologisch wich-

tige Aktivitäten unterstützen. Durch die Integration von Reflexen in koordinative Strukturen werden also der Beliebigkeit der Koordination Grenzen gesetzt.

Diese sehr allgemeine Auffassung über die Grundlagen zumindest eines Teils der Abhängigkeiten zwischen Bewegungen verschiedener Gliedmaßen macht sofort deren Doppelgesichtigkeit plausibel. Die in koordinativen Strukturen integrierten Reflexe fördern die Leistung bei biologisch wichtigen Aktivitäten und behindern sie bei davon abweichenden Aufgaben. Darüber hinaus gibt es experimentelle Bestätigungen für eine einfache Konsequenz dieser Auffassung. Wenn nämlich eine bestimmte neuronale Struktur Grundlage eines Reflexes ist und gleichzeitig in das neuronale Netz für eine willkürliche Bewegung integriert wurde, dann sollte die willkürliche Bewegung durch Ausnutzung der Reflex-Afferenzen unterstützt werden können.

Ein Beispiel dafür beschreiben HELLEBRANDT, HOUTZ, PARTRIDGE und WALTERS (1956). Der untersuchte Reflex ist der tonische Halsreflex, der sich bei Säuglingen direkt beobachten läßt. Wenn man bei einem liegenden Säugling den Kopf zur Seite dreht, so zeigt der Arm der kopfzugewandten Seite eine Streckung, der der kopfabgewandten Seite aber eine Beugung. Die Kopfdrehung hat also eine Bahnung der Streckmuskeln im zugewandten Arm und eine Bahnung der Beugemuskeln im abgewandten Arm zur Folge.

Die Vpn von HELLEBRANDT et al. mußten ihr Handgelenk wiederholt beugen und strecken. Dabei lag eine zusätzliche Masse, die zu heben war, entweder auf der Handfläche oder auf dem Handrücken. Diese Aufgabe wird nach einiger Zeit sehr anstrengend. Dann zeigen die Vpn spontan eine Kopfhaltung, wie sie dem Muster des tonischen Halsreflexes entspricht. Wenn das Gewicht auf dem Handrücken liegt, wenden sie den Kopf zu (Bahnung der Streckmuskeln), liegt das Gewicht aber auf der Handfläche, so wenden sie den Kopf ab (Bahnung der Beugemuskeln). Umgekehrt wurde auch die Leistung untersucht, die die Vpn bei instruierter Kopfhaltung erbringen. Abbildung 8 zeigt die Leistung in sukzessiven Blöcken von jeweils etwa 25 Hebungen. Der Takt der Bewegungen war durch ein Metronom vorgegeben.

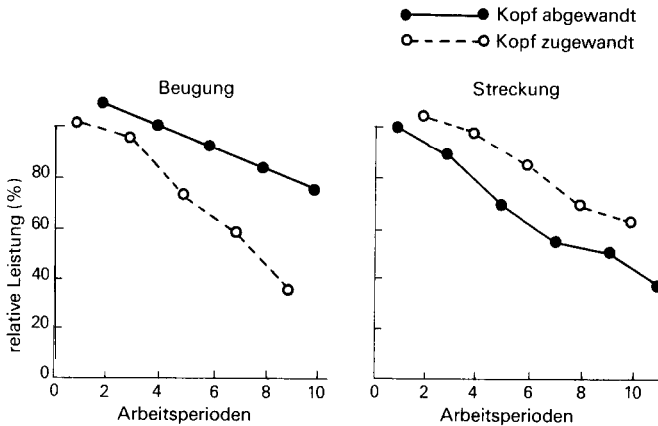


Abbildung 8: Relative Leistung in sukzessiven Serien von Hebungen eines Gewichts auf der Handfläche (links) bzw. auf dem Handrücken (rechts). Die Leistung in der ersten Serie ist gleich 100% gesetzt. In alternierenden Serien ist der Kopf zu- oder abgewandt (nach HELLEBRANDT et al., 1956, S.148).

Deutlich ist die Wechselwirkung: Streckung des Handgelenks wird durch Zuwendung des Kopfes gefördert, Beugung des Handgelenks aber durch Abwendung.

Die Integration von Reflex-Zentren in die neuronalen Netze für willkürliche Bewegungen zeigt sich auch darin, daß die Reflexantwort auf einen äußeren Reiz verändert werden kann. Dabei wird sie an den jeweiligen Zustand der übergeordneten Bewegung (die nicht notwendig willkürlich sein muß) angepaßt. Ein Beispiel ist die sog. Reflex-Umkehr im Verlauf des Schrittzzyklus (z.B. FORSSBERG et al., 1976). Wenn der Fußrücken einer Katze durch leichte Berührung oder auch elektrisch gereizt wird, so wird in der Stemmphase die Aktivität der Streckmuskeln erhöht, in der Schwingphase dagegen die Aktivität der Beugemuskeln, verbunden mit einer erhöhten Streckmuskel-Aktivität im kontralateralen Bein, das sich gerade in der Stemmphase befindet. Die Zweckmäßigkeit dieser unterschiedlichen Reaktionsformen ist offensichtlich, wenn man berücksichtigt, daß der Reiz unter natürlichen Bedingungen ein Hindernis indiziert. In der Schwingphase wird das Bein über das Hindernis gehoben, in der Stemmphase wird dem Hindernis zusätzlicher Widerstand entgegengesetzt.

Die relativ allgemeinen Überlegungen dieses Abschnitts über die Grundlagen der Koordination lassen sich auf folgende Weise zusammenfassen: Die neuronale Struktur, die ein Bewegungsprogramm realisiert, stellt Verknüpfungen zwischen verschiedenen Muskeln her

(koordinative Struktur). Da sie gewisse fest verschaltete Anteile umfaßt, die auch an komplexen Reflexen beteiligt sind, sind die Verknüpfungen nicht in vollem Maße flexibel. Vielmehr sind sie durch die fest verschalteten Anteile bestimmt. Diese wiederum sollten im Verlauf der Evolution speziell für die Bewältigung biologisch wichtiger Aktivitäten entwickelt worden sein. Ihr Einschluß in koordinative Strukturen fördert also Bewegungsmuster, die den biologisch wichtigen entsprechen, behindert aber davon abweichende.

## 4.2 Intersegmentale Koordination

In diesem und in den folgenden Abschnitten soll weniger nach den Grundlagen von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Muskelgruppen gefragt werden als vielmehr nach ihren Erscheinungsformen. Das erste Problem ist das der Koordination zwischen den verschiedenen Segmenten eines Körpergliedes oder den verschiedenen Artikulatoren beim Sprechen. Wenn wir z. B. mit dem Finger auf einen Gegenstand zeigen, so bewegen wir Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk mehr oder weniger gleichzeitig. Wie hängen die Bewegungen in den verschiedenen Gelenken miteinander zusammen?

Einzelne Gelenkbewegungen kann man als Elemente einer Gesamtbewegung betrachten. Daher ist es nicht erstaunlich, daß in der ganzheitspsychologischen Schule Versuche unternommen wurden, um auch für Bewegungen zu

zeigen, daß «das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile» (z. B. STIMPEL, 1933). Die Integration der «Teile» zu einem «Ganzen» kann über statische und dynamische Abhängigkeiten erfolgen. Statische Abhängigkeiten sind solche zwischen den Positionen verschiedener Gelenke oder Artikulatoren. Dynamische Abhängigkeiten dagegen betreffen Merkmale wie die Geschwindigkeit. Beide Arten der Abhängigkeit sollen im folgenden genauer beschrieben werden.

Als Beispiel für statische Abhängigkeiten soll ein Experiment von HUGHES und ABBS (1976) dienen, in dem es um die Koordination von Oberlippe, Unterlippe und Kiefer beim Aussprechen bestimmter Vokale geht (z.B. beim i in «hibib»). Alle drei Artikulatoren tragen zur Öffnung der Lippen bei, können aber zum Erreichen einer bestimmten Öffnung auf unterschiedliche Arten zusammenwirken. Unterschiedliche Bewegungsmuster können also denselben Zweck erfüllen. Dieses recht allgemeine Prinzip wird oft als motorische Äquivalenz bezeichnet.

In Abbildung 9 ist links das typische Koordinationsmuster gezeigt. Über eine Reihe von Äußerungen mit etwa konstanter Lippenöffnung variiert die Position der Oberlippe kaum. Die Positionen von Kiefer und Unterlippe variieren dagegen kompensatorisch. Wenn die Ober-

lippe wenig nach unten bewegt wird, wird der Kiefer weit nach unten bewegt, und umgekehrt. Rechts in Abbildung 9 ist ein weniger typisches Muster der Koordination gezeigt. über die ersten vier Äußerungen zeigt sich wieder eine kompensatorische Beziehung zwischen Unterlippe und Kiefer, allerdings mit zusätzlicher Variation der Oberlippen-Position. über die letzten vier Äußerungen dagegen bleibt die Kieferposition unverändert, während sich eine klare kompensatorische Beziehung zwischen den Positionen von Oberlippe und Unterlippe findet.

Die in Abbildung 9 gezeigte kompensatorische Kovariation zwischen den Positionen von Artikulatoren findet sich nicht nur dann, wenn die Positionen spontan variieren, sondern auch dann, wenn z.B. die Unterlippe durch eine äußere Kraft zurückgehalten wird (Sammelreferat: ABBS et al., 1984). Diese Kompensation setzt voraus, daß die Unterlippen-Position sehr schnell registriert wird, denn sie kann nicht durch die mechanischen Eigenschaften von Muskeln erklärt werden (s. Abschnitt: Das Masse-Feder-Modell). Sie erfolgt nämlich mit Hilfe eines anderen Artikulators als des in seiner Bewegung gestörten. Die in der koordinativen Struktur angelegte Kopplung zwischen verschiedenen Muskeln muß sich daher auf den sensorisch überwachten Zustand der Kör-

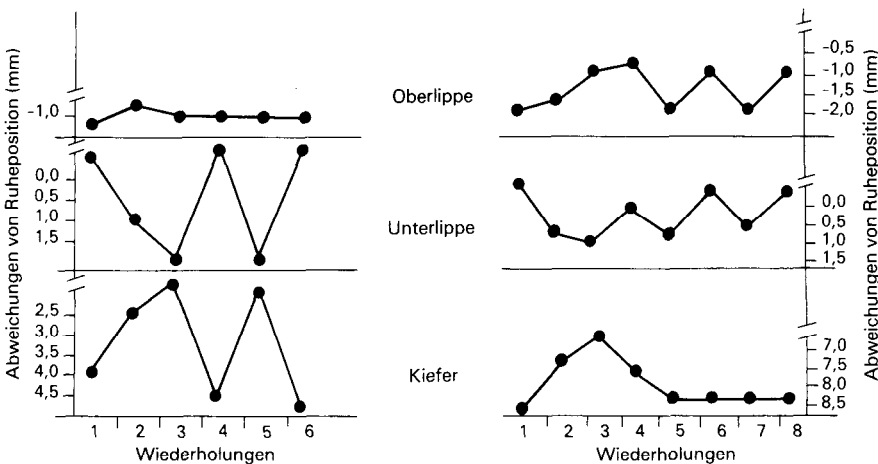


Abbildung 9: Positionen von Oberlippe, Unterlippe und Kiefer beim Aussprechen eines Vokals mit etwa konstanter Öffnung der Lippen. Messungen aus zwei Folgen wiederholter Äußerungen. Bei der Oberlippe entsprechen die höher liegenden Punkte einer größeren Lippenöffnung, bei Unterlippe und Kiefer die niedriger liegenden Punkte (nach HUGHES & ABBS, 1976, S. 205, 212).

Peripherie beziehen. Sie ist nicht nur eine zentrale Kopplung zwischen motorischen Kommandos an verschiedene Muskeln, die gegenüber äußeren Störkräften unempfindlich ist.

Dynamische Abhängigkeiten zwischen Bewegungen des Schulter- und Ellbogengelenks beim Zeigen untersuchten SOECHTING und LACQUANTI (1981). In der Startposition war der Oberarm etwa vertikal, der Unterarm etwa horizontal, und der Zeigefinger war gestreckt. Vor der Vp befand sich ein Bildschirm, auf dem der Zielpunkt in unterschiedlichen Positionen dargeboten wurde. Beim Zeigen mußte der Oberarm nach vorn bewegt werden und der Arm gestreckt.

Eine theoretisch interessante Lösung dieser Bewegungsaufgabe könnte darin bestehen, beide Gelenke mit zueinander proportionalen Geschwindigkeiten zu bewegen. Die Geschwindigkeit des einen Gelenks wäre dann eine lineare Funktion der Geschwindigkeit des anderen. Diese Lösung ist motorisch sehr einfach: Die Bewegungen beider Gelenke könnten durch ein einzelnes Signal gesteuert werden, das nur unterschiedlich verstärkt wird. Das Ergebnis aber wäre eine relativ komplizierte Bewegungsbahn der Hand.

Was sich tatsächlich findet, ist eine gerade Bahn der Hand vom Start zum Ziel, und die Beziehung zwischen den Geschwindigkeiten der beiden Gelenke ist nicht linear. Eine lineare Beziehung zwischen den beiden Geschwindigkeiten fanden SOECHTING und LACQUANTI nur in der Bremsphase; HOLLERBACH und ATKESON (1986) zeigten jedoch, daß diese lineare Beziehung gegen Ende der Bewegung keine Rückschlüsse auf die Steuerung der Bewegung zu-

läßt, sondern allein mechanische Ursachen hat. Sie ist immer dann zu erwarten, wenn die Hand sich der Grenze des Greifraumes nähert. Obwohl die Geschwindigkeiten der beiden Gelenke keine lineare Beziehung zueinander haben, sind sie doch nicht völlig unabhängig voneinander. Sie erreichen etwa zur gleichen Zeit ihr Maximum. Eine ähnliche zeitliche Kopplung findet sich auch bei einem ganz anderen Koordinationsproblem, nämlich dem Reichen zu einem Objekt und dem Öffnen der Finger, um das Objekt zu ergreifen.

Abbildung 10 zeigt die Weg-Zeit-Kurven von Transport- und Greif-Komponente einer solchen Bewegung, also die Position des Handgelenks und die Öffnung der Finger in Abhängigkeit von der Zeit (JEANNEROD, 1981). Beim Reichen nach einem kleinen Objekt (links) werden die Finger weniger weit geöffnet als beim Reichen nach einem großen Objekt (rechts), während die Weg-Zeit-Kurve der Transportkomponente unabhängig von der Größe des Objekts ist. Trotz dieser Unabhängigkeit aber sind die beiden Komponenten zeitlich gekoppelt. Die maximale Fingeröffnung liegt stets an einem bestimmten Punkt der Geschwindigkeits-Zeit-Kurve des Transports. Es scheint also so etwas wie einen gemeinsamen Zeitrahmen für beide Komponenten zu geben, während die Größen der aufgewendeten Kräfte unabhängig voneinander sind.

So attraktiv der Gedanke eines gemeinsamen Zeit-Parameters und unabhängiger Kraft-Parameters beider Komponenten ist, er ist wohl nicht ganz treffend. WING und FRASER (1983) berichten z.B. von unveröffentlichten Ergebnissen von DOUGLAS, nach denen bei sehr schnellen Reichbewegungen die antizipatori-

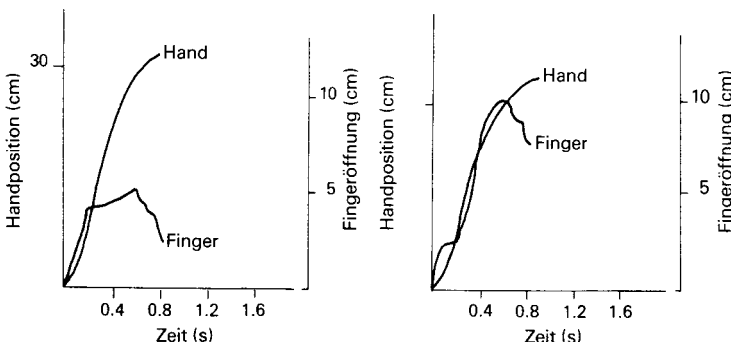


Abbildung 10: Weg-Zeit-Kurven für die Transport- und Greifkomponente einer Reichbewegung zu einem kleineren Objekt (links) und einem größeren (rechts; nach JEANNEROD, 1981, S.160).

sche Öffnung der Finger größer wird und auf diese Weise Ungenauigkeiten in der Transport-Komponente kompensiert. Ganz offensichtlich finden sich also subtilere Abhängigkeiten zwischen beiden Komponenten, für die WING und FRASER weitere Beispiele geben, als allein eine gemeinsame Zeitbasis.

Eine naheliegende Frage angesichts der beschriebenen statischen und dynamischen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Gelenken und Artikulatoren, die an einer Bewegung beteiligt sind, ist die nach dem Zweck oder Nutzen. Beim Artikulations-Beispiel (Abb.9) ist der Nutzen offensichtlich. Hier wird eine bestimmte Öffnung der Lippen angestrebt. Die verschiedenen Artikulatoren sind so gekoppelt, daß diese Öffnung auch bei erheblicher Variation einzelner Artikulator-Positionen oder bei äußeren Störeinflüssen in möglichst gleichförmiger Weise erreicht wird. Die Art der Kopplung ist durch das Bewegungsziel vorgegeben, und sie dient dem Erreichen dieses Ziels.

Was aber ist der Zweck oder Nutzen der beschriebenen dynamischen Kopplungen? Bei der Aufgabe von SOECHTING und LACQUANTI (1981) z.B. könnte das Ziel genauso gut erreicht werden, wenn die Geschwindigkeitsmaxima der beteiligten Gelenke zu unterschiedlichen Zeitpunkten lägen. Bei der Aufgabe von JEANNEROD (1981) könnte das Objekt genauso gut ergriffen werden, wenn das Maximum der antizipatorischen Öffnung der Finger in beliebigen Abschnitten der Bewegungsbahn des Handgelenks liegen würde. Der Nutzen dieser Kopplungen scheint also nicht dadurch gegeben zu sein, daß sie dem Erreichen des Bewegungsziels dienen. Sie vereinfachen jedoch die Bewegungssteuerung, indem sie die Zahl der zu steuernden Variablen - der Freiheitsgrade - vermindern. Wenn z.B. der zeitliche Verlauf der Greif-Komponente an den der Transport-Komponente gekoppelt ist, so braucht die jeweilige Entfernung vom Objekt nur noch einmal verarbeitet zu werden statt zweimal, z.B. nur für die Steuerung der Transport-Komponente. Der richtige zeitliche Verlauf der Greifkomponente ergibt sich gewissermaßen als Abfallprodukt der in der koordinativen Struktur angelegten zeitlichen Kopplung, ohne daß er direkt gesteuert werden muß.

In vielen Fällen ist eine Reduktion der Zahl der Freiheitsgrade erforderlich, damit eine Bewegung überhaupt an die Umwelt angepaßt werden kann. Die Position eines Bleistiftes beim Schreiben z.B. ist bestimmt durch die Positionen von Schulter-, Ellbogen-, Hand- und verschiedenen Fingergelenken. Wenn wir den Bleistift von einer Position zu einer anderen bewegen wollen, welches der zahlreichen Gelenke sollen wir dafür benutzen? Eine einfache Analogie für dieses Problem liefert die Gleichung  $z = x + y$ . Wenn wir  $z$  verändern wollen, sollen wir  $x$  oder  $y$  verändern? Eine Lösung des Problems besteht in der Einführung einer Kopplung, die manchmal durch die Aufgabe vorgegeben sein kann, oft aber auch nicht. Im letzteren Fall mag aus irgendwelchen Gründen die eine oder andere Form der Kopplung zur Gewohnheit werden. In unserer Analogie könnte z.B. die Kopplung  $y = ax$  eingeführt werden. Die Frage, auf welchem Wege wir  $z$  verändern sollen, ist dann eindeutig zu beantworten.

Eine zweite Möglichkeit zur Verminderung der Zahl der Freiheitsgrade besteht darin, einzelne Gelenke gar nicht zu benutzen. In der Analogie würde  $x$  oder  $y$  auf einen konstanten Wert gesetzt werden. Beim Schreiben z.B. werden mein Ellbogen- und Schultergelenk gar nicht benutzt (außer für die Bewegung der Hand entlang der Zeile), während meine Hand- und Fingergelenke auf eine für eine Beobachtung ohne technische Hilfsmittel nicht durchschaubare Weise gekoppelt sind. Eine ganz andere Lösung des Problems der Freiheitsgrade beim Schreiben kann man gelegentlich bei Kindern beobachten. Sie versteifen das Handgelenk und führen die Bewegungen vor allem mit Hilfe des Ellbogengelenks aus.

### 4.3 Intermanuelle Koordination

Es ist allgemein bekannt, daß Bewegungen unserer beiden Arme nicht unabhängig voneinander sind. Welches sind die Erscheinungsformen dieser Abhängigkeit? Zunächst zeigt sich, wie schon bei der intersegmentalen Koordination, eine zeitliche Kopplung.

KELSO, SOUTHARD und GOODMAN (1979) und KELSO, PUTNAM und GOODMAN (1983) ließen ihre Vpn gleiche oder unterschiedliche Zielbewegungen mit beiden Armen ausführen. Die

Bewegungen unterschieden sich hinsichtlich ihrer Weite und der Größe des Ziels, wobei die Bewegung mit kleinerer Weite zu einem größeren Ziel führte. Nach dem FITSSschen Gesetz (s. Abschnitt: Abtast-Regelung) ist bei dieser Bewegung eine kürzere Bewegungszeit zu erwarten als bei der Bewegung mit größerer Weite zum kleineren Ziel. Wenn die Bewegungen einzeln ausgeführt werden, zeigt sich der Unterschied in den Bewegungszeiten. Bei gleichzeitiger Ausführung der beiden Bewegungen dagegen werden die Bewegungszeiten nahezu identisch, wobei vor allem die kürzere Bewegungszeit verlängert wird. Die Vpn waren in diesem Versuch nur instruiert, beide Bewegungen gleichzeitig auszuführen, aber ihnen war nicht vorgegeben, auf welche Weise sie das tun sollten. Das Ergebnis besagt also nicht, daß Menschen Zielbewegungen unterschiedlicher Dauer nicht gleichzeitig ausführen können, sondern nur, daß sie es nicht tun, wenn sie es nicht müssen.

Wenn zwei gezielte Bewegungen unterschiedlicher Weite in etwa gleicher Zeit ausgeführt werden, müssen sich die Beschleunigungen und Geschwindigkeiten - also die aufgewendeten Kräfte - deutlich voneinander unterscheiden. Das Ergebnis von KELSO et al. läßt daher, analog den Ergebnissen von JEANNEROD (1981) zur Koordination von Transport- und Greif-Komponente beim Reichen, die Folgerung zu, daß Bewegungen beider Hände zwar eine gemeinsame Zeitbasis haben, aber hinsichtlich des Kraft-Parameters unabhängig voneinander sind.

Diese Folgerung wird gestützt durch Ergebnisse von SCHMIDT, ZELAZNIK, HAWKINS, FRANK und QUINN (1979). Die Vpn mußten mit beiden Händen Zielbewegungen mit gleicher vorgegebener Weite und Dauer ausführen. Natürlich streuen die tatsächlichen Weiten und Bewegungszeiten um die vorgegebenen Werte. Über eine Folge von Bewegungen wurde sowohl die Korrelation zwischen den Bewegungszeiten beider Hände berechnet wie auch die Korrelation zwischen den Bewegungsweiten. Entsprechend der Hypothese gemeinsamer Zeit-Parameter war die Korrelation zwischen den Bewegungszeiten sehr hoch (etwa 0,8), und entsprechend der Hypothese unabhängiger Kraft-Parameter war die Korrelation zwischen den Bewegungsweiten nur klein (etwa 0,1).

Die zeitliche Kopplung gleichzeitiger Bewegungen beider Hände ist nicht perfekt. Bei der Aufgabe von KELSO et al. (1979, 1983) weicht die Dauer jeder Bewegung von der mittleren Dauer beider Bewegungen in Richtung derjenigen Dauer ab, die sie bei Einzelausführung hätte. Wenn man diese verbleibenden Unterschiede betont, kann man durchaus zu der Folgerung gelangen, daß beidarmige Bewegungen keineswegs eine gemeinsamezeitbasis besitzen (MARTENIUK & MACKENZIE, 1980b). Allerdings ist die Annäherung der Bewegungszeiten aneinander wesentlich beeindruckender als der verbleibende Unterschied. Die Verallgemeinerung einer zeitlichen Kopplung und einer Unabhängigkeit der Kräfte beider Arme ist also gerechtfertigt, aber nicht im Sinne einer perfekten Kopplung bzw. Unabhängigkeit zu verstehen.

Neben der zeitlichen Kopplung gibt es auch eine homologe Kopplung, eine Tendenz zur gleichzeitigen Aktivierung gleicher Muskelgruppen beider Arme. Diese Form der Kopplung findet sich deutlich bei den Fingern und am Handgelenk, während am Schultergelenk zumindest für bestimmte Bewegungen eine genau entgegengesetzte Kopplung existiert. Eine offenbar vielen Kindern bekannte Konsequenz der homologen Kopplung ist, daß man Spiegelschrift am einfachsten mit der linken Hand schreiben kann, wenn man gleichzeitig mit der rechten Hand normal schreibt.

Die homologe Kopplung am Handgelenk zeigte COHEN (1971). Die Vpn hatten gleichzeitig rhythmische Beugungen und Streckungen beider Gelenke mit einer Frequenz von zwei bis vier Zyklen pro Sekunde auszuführen. Bei symmetrischen Bewegungen, bei denen jeweils homologe Muskelgruppen gleichzeitig aktiviert werden, stimmten die Bewegungsbahnen in höherem Maße überein als bei asymmetrischen Bewegungen. Außerdem, und das ist leicht zu demonstrieren, kommt bei asymmetrischen Bewegungen gelegentlich ein fehlerhafter Übergang zu symmetrischen Bewegungen vor, während ein umgekehrter Übergang nie zu beobachten ist. Der Übergang von asymmetrischen zu symmetrischen Bewegungen ist kaum zu vermeiden, wenn die Frequenz der periodischen Bewegungen erhöht wird. KELSO (1984) berichtet, daß er in recht konsistenter

Weise beim etwa 1.3fachen der bevorzugten Frequenz asymmetrischer Bewegungen erfolgt. Durch besondere Anstrengung kann diese Übergangsfrequenz erhöht werden.

MACKAY und SODERBERG (1971) zeigen die homologe Kopplung der Finger. Die Aufgabe bestand darin, die Finger beider Hände gleichzeitig in der Reihenfolge von links nach rechts (oder von rechts nach links) zu bewegen. Die häufigsten Fehler dabei waren gleichzeitige Bewegungen mit homologen Fingern, also gleichen Fingern der linken und rechten Hand. Auch diese Aufgabe ist relativ einfach, solange man die Bewegungen langsam ausführt. Homologe Fehler treten vor allem bei schneller Ausführung auf.

Am Schultergelenk findet sich, wie erwähnt, bei bestimmten Bewegungen eine asymmetrische Kopplung, und zwar dann, wenn die hängenden Arme vor und zurück geschwungen werden. Die Ergebnisse von GUNKEL (1962), die diese Kopplung zeigen, seien bis zum nächsten Abschnitt zurückgestellt. Eine solche asymmetrische Kopplung entspricht offensichtlich den Armbewegungen beim Laufen; während der eine Arm nach vorn bewegt wird, wird der andere nach hinten bewegt.

Aus der Existenz symmetrischer und asymmetrischer Kopplungen bei gleichzeitigen Bewegungen beider Arme und Hände könnte man den Schluß ziehen, daß Kopplungen zwischen den Bewegungen verschiedener Gliedmaßen generell als bevorzugte Koaktivierungen bestimmter Muskelgruppen definiert sind. Eine Versuchsreihe von BALDISSERA, CAVALLARI und CIVASCHI (1982) zeigt jedoch, daß das nicht immer so ist, sondern daß es auch räumliche Kopplungen gibt. Wenn man die Hand flach auf den Tisch legt und mit Hilfe einer Bewegung im Handgelenk abwechselnd hebt und senkt, währendmangleichzeitig mit Hilfe einer Bewegung im Fußgelenk den Fuß hebt und senkt, so geht das leichter, wenn Hand und Fuß jeweils gleichzeitig gehoben und gesenkt werden, als dann, wenn das Heben der Hand jeweils mit dem Senken des Fußes zusammenfällt bzw. das Heben des Fußes mit dem Senken der Hand. Dieser Unterschied bleibt erhalten, wenn man die Hand umdreht, so daß der Handrücken nach unten zeigt. Je nach Haltung der Hand geht die bevorzugte gleiche räumliche

Richtung der Bewegungen mit einer bevorzugten gleichzeitigen Aktivierung unterschiedlicher Muskelgruppen einher.

Die bisher in diesem Abschnitt besprochenen Experimente betrafen stets gleichzeitige Bewegungen verschiedener Gliedmaßen, insbesondere der beiden Hände und/oder Arme. Solche Aufgaben stellen sicherlich die naheliegendste Methode dar, intermanuelle Abhängigkeiten zu untersuchen. Aber sie können zu der falschen Folgerung führen, daß die Abhängigkeiten erst im Augenblick der Ausführung entstehen. Z.B. könnte ein Teil derjenigen motorischen Kommandos, die die Bewegungen der einen Hand steuern, auch die andere Hand erreichen (PREILOWSKI, 1975). Nach unseren Überlegungen über die Bereitstellung von Bewegungsprogrammen (oder den Aufbau koordinativer Strukturen) vor Beginn einer Bewegung aber sollten intermanuelle Abhängigkeiten schon vorher nachweisbar sein, nämlich bei der Programmierung. Wie kann man solche eher versteckten Abhängigkeiten zeigen?

In Abschnitt 3.2.1.2 haben wir gesehen, daß die Wahlreaktionszeit von der Relation zwischen den beiden alternativen Bewegungen abhängt. Diejenigen Merkmale, die beiden Bewegungen gemeinsam sind, sollten auf alle Fälle vorprogrammiert werden können. Wenn nun die eine der beiden alternativen Bewegungen mit der einen Hand auszuführen ist und die andere mit der anderen, dann sollte die Vorprogrammierung derjenigen Merkmale, in denen sich die beiden Bewegungen unterscheiden, davon abhängen, ob sie von einer intermanuellen Kopplung betroffen sind oder nicht (HEUER, 1984c). Wenn z. B. zwischen gezielten Bewegungen unterschiedlicher Dauer zu wählen ist, sollte die Reaktionszeit im Vergleich zur Wahl zwischen Bewegungen gleicher Dauer verlängert sein - die zeitliche Kopplung sollte die gleichzeitige Vorprogrammierung unterschiedlicher Bewegungszeiten für die linke und rechte Hand verhindern oder zumindest erschweren. Wenn der linken und rechten Hand dagegen Zielbewegungen unterschiedlicher Weite zugeordnet sind, sollte sich keine Reaktionszeitverlängerung im Vergleich zur Wahl zwischen Bewegungen gleicher Weite finden. Nach den Ergebnissen bei der Untersuchung gleichzeitiger Bewegungen sind die Kräfte beider Arme ja unab-

hängig voneinander. Beide Hypothesen lassen sich bestätigen (HEUER, 1986a).

Etwas komplizierter sind die Befunde zur homologen Kopplung. Die beschriebenen Aufgaben von COHEN (1971) und MACKAY und SODERBERG (1971) sind einfach, solange man die Bewegungen langsam ausführt. Diese und andere informelle Beobachtungen lassen vermuten, daß die homologe Kopplung etwas mit der Auswahl der zu aktivierenden Muskelgruppen zu tun hat, aber sich nicht mehr zeigt, wenn die Auswahl beendet ist und die gewählten Muskelgruppen nur noch aktiviert werden müssen. Entsprechend dieser Überlegung ist die Reaktionszeit bei der Wahl zwischen Bewegungen mit verschiedenen (nicht-homologen) Fingern der beiden Hände - verglichen mit der Wahl zwischen gleichen (homologen) Fingern - nicht verlängert, sofern die Auswahl der Finger bereits einige Zeit vor dem Reaktionssignal erfolgen kann (HEUER, 1984c). Das ist der Fall, wenn die Vp bereits längere Zeit vor dem Reaktionssignal weiß, welcher Finger der linken bzw. rechten Hand für die Reaktion benutzt werden soll. Wenn die Auswahl des zu aktivierenden Fingers aber im Augenblick des Reaktionssignals noch nicht vollständig abgeschlossen ist, zeigt sich die Wirkung der homologen Kopplung in einer Reaktionszeitverlängerung (HEUER, 1986b). Das ist z.B. der Fall, wenn die der linken und rechten Hand zugeordneten Finger der Vp erst sehr kurz vor dem Reaktionssignal mitgeteilt werden.

Die Experimente zur Wahl zwischen Bewegungen mit der rechten und linken Hand führen zu gleichartigen Folgerungen über die Art der Abhängigkeiten zwischen beiden Händen wie die Analyse gleichzeitig ausgeführter Bewegungen. In den Reaktionszeitexperimenten aber wird die Bewegung mit der einen Hand, die die Bewegung mit der anderen Hand beeinflusst, gar nicht ausgeführt, sondern nur zur gleichen Zeit (vor-)programmiert wie die ausgeführte Bewegung. Ihr Einfluß kann daher nicht erst während der Ausführung entstehen. Die Konvergenz der Folgerungen aus den verschiedenen Versuchsanordnungen stützt die Auffassung, daß die in diesem Abschnitt besprochenen intermanuellen Abhängigkeiten bei gleichzeitiger Ausführung ebenfalls einen zentralen Ursprung haben. Sie sind in den Bewegungs-

programmen oder koordinativen Strukturen angelegt und entstehen nicht erst dann, wenn die Muskeln aktiviert werden.

#### 4.4 Rhythmen

Zeitliche Kopplung, wie wir sie bei der intersegmentalen und intermanuellen Koordination kennengelernt haben, tritt nicht nur zwischen verschiedenen Segmenten eines Körpergliedes oder zwischen beiden Händen auf, sondern scheint ein nahezu universelles Phänomen zu sein, das sich auf fast alle gleichzeitig ausgeführten Tätigkeiten erstreckt. Tätigkeiten, deren zeitliche Struktur sich in bestimmter Weise unterscheidet, können nur schwer oder gar nicht gleichzeitig ausgeführt werden. PETERS (1977) ließ z. B. seine Vpn einen bekannten englischen Kindervers aufsagen und gleichzeitig mit der Hand einen 1-3-123 Rhythmus schlagen. Keine der 100 Vpn, die sich an dieser Aufgabenkombination versuchten, war dazu in der Lage. Die Alltagserfahrung zeigt zudem, daß es nicht nur schwierig oder unmöglich ist, zwei verschiedene Rhythmen gleichzeitig zu produzieren; es ist auch schon schwierig, einen bestimmten Rhythmus zu schlagen, während man einen anderen Rhythmus hört.

Die wohl ersten umfangreichen Untersuchungen zur Abhängigkeit zwischen verschiedenen Rhythmen werden von VON HOLST (1939) berichtet. Allerdings handelte es sich dabei um die rhythmischen Bewegungen der Flossen von Fischen. Vergleichbare Untersuchungen zur «relativen Koordination» bei Menschen wurden von GUNKEL (1962) durchgeführt. Die Vpn waren instruiert, die hängenden Arme in unterschiedlichen Rhythmen hin und her zu schwingen. Die Abbildung 11 zeigt einige illustrative Ergebnisse.

In Abbildung 11a ist der schnelle Rhythmus durch den langsamen überlagert, in Abbildung 11b zeigt der schnelle Rhythmus eine Amplituden-Modulation, eine systematische Änderung der Amplitude, in der Frequenz des langsamen. In Abbildung 11c sind beide Formen der Abhängigkeit kombiniert. Außerdem zeigt sich eine einzelne Einstreuung des schnellen Rhythmus in den langsamen. In Abbildung 11d alternieren beide Rhythmen: während der eine Arm seine rhythmische Bewegung ausführt, bleibt der andere unbewegt.

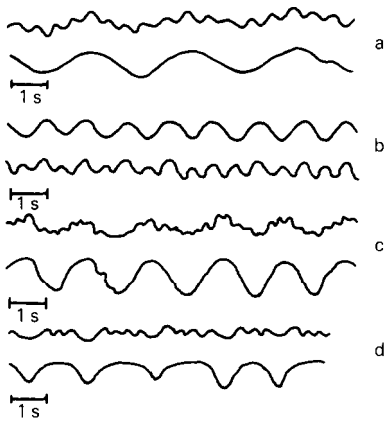


Abbildung 11: Vier Beispiele für wechselseitige Beeinflussungen zwischen rhythmischen Armbewegungen. Gezeigt sind jeweils die Weg-Zeit-Kurven für beide Arme (nach GUNKEL, 1962, S.473).

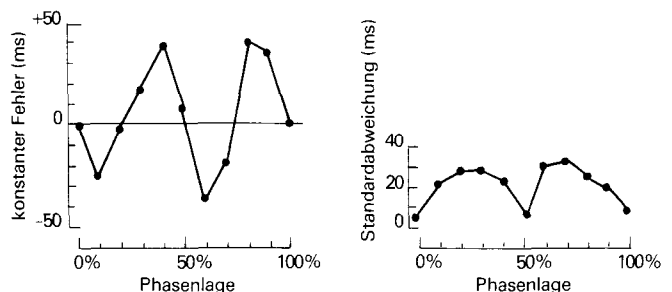
Die Weg-Zeit-Kurven beider Arme in Abbildung 11 sind relativ zueinander invertiert. In der jeweils oberen Kurve bedeutet aufwärts eine Bewegung des Arms nach vorn, in der unteren Kurve aber nach hinten. Die bevorzugte relative Phasenlage der Armbewegungen, VON HOLST bezeichnet sie als Koaktionslage, beträgt also 180°. Die Kopplung ist nicht homolog, sondern asymmetrisch.

Die Befunde von GUNKEL (1962) belegen die Vielfalt der Wechselbeziehungen zwischen gleichzeitig ausgeführten rhythmischen Bewegungen. Welche Regeln lassen sich finden, mit deren Hilfe man zumindest näherungsweise die Schwierigkeiten bei der Kombination verschiedener Rhythmen vorhersagen kann? Ergebnisse von KLAPP (1979, 1981) mit beidhändigen Rhythmen sowie Kombinationen von Fingerbewegungen und gesprochenen Silben legen die Verallgemeinerung nahe, daß Bewegungen

mit unterschiedlichen Rhythmen dann einfach sind, wenn sie auf einen einzelnen Grundrhythmus abgebildet werden können. Jeder Schlag in diesem Rhythmus ist mit einem Ereignis verknüpft, z.B. rechten Finger heben/senken, linken Finger heben/senken, beide Finger heben/senken, nichts tun. Diese Strategie scheinen z.B. ungeübtere Klavierspieler zu verwenden, wenn sie eine Duole mit einer Triole zu kombinieren haben. (Ein Wort wie «Erdäpfelstock» definiert die Zeitpunkte für den zweiten Schlag der Triole durch die Silbe «äp», den zweiten Schlag der Duole durch die Silbe «fel», und den dritten Schlag der Triole durch die Silbe «stock».) Das Ziel der Übung ist es jedoch, eine weitestgehende Unabhängigkeit der beiden Hände zu erreichen.

Auch zwei Rhythmen mit gleicher Frequenz können nicht beliebig miteinander kombiniert werden. Wie wir bei Bewegungen des Hand- und des Schultergelenks gesehen haben, gibt es bevorzugte Phasenlagen. Diese Phasen-Bevorzugungen zeigen sich sehr deutlich in Ergebnissen von YAMANISHI, KAWATO und SUZUKI (1980). Die Vpn hatten mit beiden Händen einen Rhythmus mit einer Periodendauer von 1 sec zu schlagen. Die Schläge der einen Hand sollten jeweils erfolgen, wenn 0, 10, 20, . . . 90% der Periode der anderen Hand vergangen waren, also 0, 100, 200, . . . 900 msec nach dem jeweils vorhergehenden Schlag mit der anderen Hand; bei 0% fallen die Schläge beider Hände zusammen, bei 50% findet sich ein strenges Alternieren beider Hände. Zu Beginn jeder Meßreihe wurden Schrittmacher-Signale dargeboten, die erst nach 10 Perioden wegfielen. Die Reihe war anschließend über 20 Perioden fortzusetzen, und während dieser Zeit erfolgten die Messungen. Abbildung 12 zeigt die Fehler in

Abbildung 12: Konstanter Fehler und Standardabweichung der Zeitpunkte rhythmischer Fingerbewegungen in Abhängigkeit von der vorgegebenen Phasenlage (nach YAMANISHI et al., 1980, S. 221).



Abhängigkeit von der vorgegebenen Phasenlage.

Links in Abbildung 12 sind die konstanten Fehler gezeigt, die mittleren Abweichungen von den Soll-Zeitpunkten, rechts die variablen Fehler (Standardabweichungen). Letzteres sind am kleinsten bei den Phasenlagen 0 und 50%. Bei diesen stabilen Phasenlagen ist auch der konstante Fehler fast Null. Alle anderen Phasenlagen sind instabil: die variablen Fehler sind erhöht, und die konstanten Fehler tendieren zu einer der stabilen Phasenlagen. Bei etwa 30 und etwa 70% sind die variablen Fehler am größten. Die konstanten Fehler sind hier zwar sehr klein, aber bei sehr hoher interindividueller Variabilität. Die Vpn tendieren mal zur einen und mal zur anderen der beiden stabilen Phasenlagen, so daß sich die Fehler im Durchschnitt ausgleichen.

Einen wichtigen Aspekt der Abhängigkeit zwischen gleichzeitig ausgeführten Rhythmen haben wir bisher vernachlässigt: Ihre Wechselbeziehung ist nicht notwendig symmetrisch. In Abbildung 11 z.B. wirkt sich der langsamere Rhythmus deutlich stärker auf den schnelleren aus als umgekehrt. GUNKEL (1962) berichtet auch die relativ informelle Beobachtung, daß die Abhängigkeit der Rhythmen bei Rechtshändern schwächer ist, wenn der rechte Arm den schnellen und der linke Arm den langsamen Rhythmus auszuführen hat, während sich bei Linkshändern zumeist das umgekehrte Ergebnis findet.

Diese Asymmetrie wurde von PETERS (1981) - offenbar unabhängig von dem vorläufigen Befund GUNKELS - näher untersucht. Die Aufgabe bestand darin, je einen Hebel mit der einen Hand im Takt eines Metronoms und mit der anderen möglichst schnell zu betätigen. Einzelne Versuchsdurchgänge dauerten jeweils 10 Sekunden. Von Durchgang zu Durchgang wurde die Frequenz des Metronoms erhöht. Wenn man diese Aufgabe ausführt, kann man feststellen, daß dies ab einer gewissen Frequenz nicht mehr möglich ist. Diese Frequenz ist bei Rechtshändern wesentlich höher, wenn die linke Hand den Takt schlägt und die rechte Hand möglichst schnelle Bewegungen ausführt als im umgekehrten Fall. Bei den Linkshändern war keine klare Asymmetrie vorhanden.

Wenn man nach der Ursache der Asymmetrie fragt, fällt auf, daß sie wohl etwas mit der normalen alltäglichen Benutzung unserer Hände zu tun hat. Bei beidhändiger Tätigkeit hat die linke Hand nämlich zumeist Haltefunktionen, während die Manipulationen von der rechten Hand ausgeführt werden. Beispiele finden sich beim Stricken oder beim Einfädeln eines Fadens in ein Nadelöhr. Das rigide Schlagen eines Taktes dürfte nun funktionell der Haltetätigkeit ähnlich sein, die flexiblen schnellen Bewegungen aber den Manipulationen. Eine solche Interpretation der Asymmetrie betont einen interessanten Aspekt unserer Händigkeit. Bei den unterschiedlichen motorischen Leistungen, zu denen wir mit der rechten und linken Hand in der Lage sind, handelt es sich möglicherweise weniger um einen allgemeinen Unterschied in der Leistungsfähigkeit als vielmehr um eine funktionelle Spezialisierung beider Hände. (Dies ist eine spekulative Hypothese, denn abgesehen davon, daß die Reaktionszeit der nicht-bevorzugten Hand in einer Reihe von Experimenten kürzer ist als die der bevorzugten Hand, scheint es keine Leistung zu geben, bei der die nicht-bevorzugte Hand überlegen ist.)

#### 4.5 Zielmotorik und Stützmotorik

Das letzte Problem der Koordination von Bewegungen, das hier besprochen werden soll, ist das der Beziehung zwischen Zielmotorik und Stützmotorik. Wenn wir z.B. einen Ball werfen, ist nicht nur die Armbewegung wichtig. Als Folge der Armbewegung wirken vielmehr Kräfte auf unseren Körper ein, die aufgefangen werden müssen, und zwar durch Muskelkontraktionen auch an entfernten Körperteilen wie den Beinen.

Auf welche Weise erfolgt die Anpassung der Stützmotorik an die Zielmotorik? Die erste Möglichkeit ist, daß sie auf reflexivem Wege erfolgt. Es ist ja ganz offensichtlich, daß an der Aufrechterhaltung unseres Gleichgewichts Reflexe beteiligt sind, wie sie z.B. von NASHNER und WOOLLACOTT (1979) beschrieben werden. Auslösende Reize waren in diesen Untersuchungen Bewegungen einer Plattform, auf der die Vpn standen. Etwa 100-200 msec nach einem solchen Reiz finden sich charakteristische

Aktivitätsmuster in verschiedenen Beinmuskeln, die die Störung des Gleichgewichts beseitigen.

Störungen des Gleichgewichts durch äußere Reize und durch aktive Bewegungen unterscheiden sich darin, daß sie im letzteren Fall antizipiert werden können, im ersteren aber nicht. Obwohl auch im Fall aktiver Bewegungen die Störungen des Gleichgewichts reflexiv behoben werden könnten, wäre eine antizipatorische Berücksichtigung der bevorstehenden Gleichgewichtsstörung effektiver: die Störung des Gleichgewichts bräuchte dann nämlich gar nicht erst aufzutreten. Zumindest zwei Arten von Ergebnissen sprechen dafür, daß die Stützkomponente eines Bewegungsmusters tatsächlich ein Bestandteil des Bewegungsprogramms oder der koordinativen Struktur ist und nicht nur eine reflexive Konsequenz der Gleichgewichtsstörung.

Das erste Ergebnis zeigt, daß die Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts unterschiedlich ausfallen können je nachdem, ob eine bestimmte Bewegung passiv bzw. reflexiv oder aktiv ausgeführt wird. DUFOSSÉ, MACPHERSON, MASSION und POLIT (1983) beschreiben zwei Varianten der Stützmotorik der Katze beim Heben eines Beins. Beim «diagonalen Muster» (Abb. 13, links) wird das Gewicht auf das kontralaterale Vorderglied und ipsilaterale Hinterglied verlagert, beim «nicht-diagonalen Muster» aber nur auf das kontralaterale Vorderglied, einhergehend mit einer Krümmung der Wirbelsäule und einer entsprechenden Verlagerung des Schwerpunktes (Abb. 13, rechts). Diese beiden Muster treten unter verschiedenen Bedingungen auf. Das diagonale Muster findet sich bei unerwartetem Wegfall der Stützung durch ein Vorderglied (z. B. der Boden un-

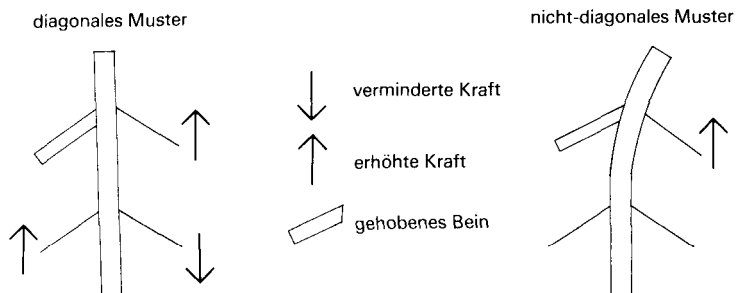
ter dem Bein wird plötzlich entfernt; die Bewegung des Beins ist eine Reflexantwort auf einen taktilen Reiz oder sie wird durch kortikale Reizung ausgelöst), das nicht-diagonale Muster findet sich dagegen bei klassisch oder operant konditionierten Beimbewegungen.

Das zweite Ergebnis zeigt, daß die Stützkomponente des Bewegungsmusters der Zielkomponente zeitlich vorausgehen kann. CORDO und NASHNER (1982) ließen ihre Vpn auf ein auditives Signal hin möglichst schnell an einem Hebel ziehen. Erfasst wurde das Elektromyogramm von Muskeln des Oberarms und der Wade. Aktivität in den Wadenmuskeln, die zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts dient, fand sich etwa 110 msec nach Darbietung des Tons, Aktivität in den Oberarmmuskeln aber erst nach etwa 155 msec. Diese Zeitverhältnisse sind natürlich nicht vereinbar mit einer Hypothese; nach der die Stützmotorik eine Reflexantwort auf eine Störung des Gleichgewichts ist, denn stützende Aktivität findet sich bereits antizipatorisch, bevor die Störung des Gleichgewichts eingetreten ist. Die antizipatorische Stützaktivität fehlt im übrigen, wenn der Körper der Vp abgestützt ist, so daß er durch das Ziehen am Hebel nicht verlagert wird. Unter diesen Bedingungen ist auch die Latenzzeit der Aktivität in den Oberarmmuskeln kürzer.

## 5. Wahrnehmung und Bewegung

In diesem Abschnitt soll die bisher als selbstverständlich hingegenommene Tatsache, daß wir unsere Bewegungen an die Umwelt anpassen können, genauer besprochen werden. Dabei ist es zweckmäßig, zwei Funktionen der Wahrnehmung für die Bewegungssteuerung zu un-

Abbildung 13: Zwei Formen der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts, wenn bei der Katze die Stützung durch ein Bein entfällt (nach DUFOSSÉ et al., 1983, S.23).



terscheiden. Die erste Funktion kann man als «aufrufend» kennzeichnen, die zweite als «führend».

Ein typisches Beispiel für die aufrufende Funktion einer visuellen Wahrnehmung liefert die schwarze Katze, die von links vor das Auto läuft. Der Tritt auf das Bremspedal wird durch diesen Reiz aufgerufen oder ausgelöst, aber er wird in keinerlei Weise durch die Wahrnehmung der Katze geführt. Allgemein kann man sagen, daß für den Aufruf eines Bewegungsmusters neben den speziellen Wahrnehmungsbedingungen eine mehr oder weniger spezifische Intention erforderlich ist. Bei gegebener Intention können verschiedene Wahrnehmungsbedingungen für den Aufruf eines bestimmten Bewegungsmusters unterschiedlich effektiv sein, und bei relativ generellen Intentionen bestimmen die Wahrnehmungsbedingungen auch, welches motorische Programm aufgerufen wird. Für den Aufruf der Bremsbewegung z.B. ist die Entfernung der Katze vom Auto kritisch; bei größerer Entfernung wird eher die Hupe betätigt werden.

Die führende Funktion der visuellen Wahrnehmung kommt immer dann ins Spiel, wenn eine Bewegung an die Position oder Bewegung eines gesehenen Objektes angepaßt werden muß. Diese Anpassung kann während der Ausführung der Bewegung erfolgen, beispielsweise beim Fangen, oder auch vor der Ausführung während der Programmierung, wie z.B. beim Werfen. In beiden Fällen der «Führung» einer Bewegung durch die visuelle Wahrnehmung kann man von visu-motorischer Koordination sprechen, der In-Beziehung-Setzung visueller und motorischer Variablen.

Aus der Unterscheidung von aufrufender und führender Funktion der Wahrnehmung folgt nicht, daß ein bestimmtes wahrgenommenes Objekt nur die eine oder andere Funktion haben kann. Die Tasse auf meinem Schreibtisch z. B. hat zum einen eine aufrufende Funktion - wäre sie nicht da, würde ich sicherlich nicht zu dem Ort reichen, an dem sie zu stehen pflegt -; zum anderen hat ihre Position eine führende Funktion für die Transport-Komponente meiner Reichbewegung und ihre Form für deren Greif-Komponente.

## 5.1 Aufruf motorischer Programme

Die Bedingungen, unter denen ein bestimmtes motorisches Programm aufgerufen werden soll, können in nahezu beliebiger Weise vereinbart werden. In vielen psychologischen Experimenten z.B. müssen die Vpn möglichst schnell auf die eine Taste drücken, wenn eine gesehene Buchstabenfolge ein Wort ist, und auf eine andere Taste, wenn sie kein Wort ist. Diese Zuweisung von Aufrufbedingungen zu unterschiedlichen Bewegungen geschieht einfach durch eine Absprache zwischen VI und Vp. Trotz des hohen Grades von Beliebigkeit bei der Festlegung von Aufrufbedingungen gibt es aber Unterschiede in der Schwierigkeit. Was sind die Ursachen dafür?

In sehr vereinfachter Weise kann man sich die Aufrufbedingungen als eine Art von «Etiketten an einem motorischen Programm» vorstellen. Für das Bremsen beim Autofahren könnte ein solches Etikett z.B. «Hindernis in Fahrtrichtung» sein. Sobald ein Reiz vorhanden ist wie die schwarze Katze, die als «Hindernis in Fahrtrichtung» repräsentiert wird, stimmen die innere Repräsentation des Reizes und die Aufrufbedingung überein - das motorische Programm für das Bremsen wird aufgerufen. Wie sicher und schnell dieser Aufruf erfolgt, sollte von drei Faktoren abhängen: (1) der Enge der Zuordnung der Aufrufbedingungen zum motorischen Programm, (2) dem Grad der Übereinstimmung von Aufrufbedingungen und Reizrepräsentation, (3) der Stärke der Verbindung zwischen Reiz und seiner inneren Repräsentation. (Die Schwarze Katze muß keineswegs zwangsläufig als «Hindernis in Fahrtrichtung» repräsentiert werden; es gibt vermutlich Unfälle, bei denen Fahrer gewissermaßen sehenden Auges gegen Hindernisse fahren, die aus irgendwelchen Gründen im kritischen Augenblick nicht als Hindernis intern repräsentiert sind.) Ausführlichere Überlegungen zum Aufruf motorischer Programme finden sich im Kapitel 2 (Wahrnehmung). In unserem Zusammenhang sind vor allem die Faktoren (1) und (2) von Bedeutung. Im folgenden soll ihr Einfluß auf die Schnelligkeit und Sicherheit des Aufrufs motorischer Programme gezeigt werden.

Es scheint einige Aufrufbedingungen zu geben,

die motorischen Programmen sehr eng und wohl mehr oder weniger zwangsläufig zugeordnet sind. Dazu gehören die sensorischen Begleiterscheinungen bei der Ausführung der entsprechenden Bewegung. (Im Abschnitt «Repräsentation einfacher Zielbewegungen» werde ich ausführlicher darstellen, daß die innere Repräsentation einer Bewegung nicht nur aus dem Programm besteht, sondern auch die sensorischen Begleiterscheinungen umfaßt.) Wenn ein Reiz diesen sensorischen Begleiterscheinungen entspricht, z.B. beim Nachsprechen eines gehörten Wortes oder Nachahmen einer gesehenen Bewegung, ist der Aufruf des entsprechenden Programms extrem einfach. In solchen Fällen von «ideomotorischer Kompatibilität» (GREENWALD, 1972) erfolgt die Ausführung der Bewegung gelegentlich sogar unwillkürlich (ideomotorisches Phänomen oder Carpenter-Effekt).

LEONARD (1959) verwendete in einem Wahlreaktionszeitexperiment eine ideomotorisch kompatible Zuordnung zwischen Signalen und Reaktionen. Die Finger der Vpn lagen auf Tasten. Der Finger, der durch eine mechanische Vorrichtung in der Taste taktil gereizt wurde, war jeweils möglichst schnell niederzudrücken. Bei einer derart hochkompatiblen Signal-Reaktions-Zuordnung fehlt der übliche Anstieg der Wahlreaktionszeit mit der Zahl der alternativen Signale bzw. Reaktionen.

Räumliche Merkmale einer Bewegung scheinen, wie die sensorischen Begleiterscheinungen, ebenfalls Aufrufbedingungen zu sein, die dem Programm sehr eng zugeordnet sind. Wenn z.B. in einem Wahlreaktionszeitexperiment das Signal das Aufleuchten eines Lämpchens ist und mit dem Finger reagiert werden muß, dessen Position dem des Lämpchens entspricht, ist die Reaktionszeit kurz und steigt nur relativ wenig mit der Zahl der Alternativen an. Auch die Fehlerzahl ist klein. In dem Maße aber, in dem die räumliche Anordnung der Signale von den räumlichen Merkmalen der zugeordneten Bewegungen abweicht, steigen die Reaktionszeit - vor allem, wenn die Anzahl der Reaktionsalternativen groß ist - und die Fehlerquote (FITTS & SEEGER, 1953). Bei geringerer räumlicher Korrespondenz von Signalen und Reaktionen sinkt der Grad der Übereinstimmung von Aufrufbedingungen und Reizprä-

sentation; spätestens dann, wenn die räumliche Korrespondenz vollständig fehlt, können wohl die gewissermaßen natürlichen Aufrufbedingungen - die räumlichen Merkmale der Bewegungen - nicht mehr genutzt werden.

Für die Enge der Zuordnung von anderen Aufrufbedingungen als den sensorischen Begleiterscheinungen und räumlichen Merkmalen zu motorischen Programmen spielen Lernen und Erfahrung eine ausschlaggebende Rolle. Da die Lernerfahrungen innerhalb einer Kultur zum Teil relativ gleichförmig sind, entstehen Populations-Stereotype. Das sind relativ schnelle und sichere Aufrufbedingungen für bestimmte Bewegungsmuster, die sich bei fast allen Mitgliedern einer bestimmten Population finden. Ein Beispiel dafür zeigt sich im sog. STROOP-Effekt (STROOP, 1935): Das Lesen eines Farbwortes erfolgt mit geringerer Latenz als das Benennen eines Farbflecks, und wenn ein Farbwort (z. B. blau) in einer anderen Farbe (z. B. rot) geschrieben ist, wird das Lesen durch die andere Farbe weniger gestört als das Benennen der Farbe durch das Wort.

Die Nutzung von Populations-Stereotypen dürfte zu den Kniffen guter Trainer gehören. Ob kompliziertere sportliche Bewegungsmuster gelingen oder nicht, scheint manchmal davon abzuhängen, ob der Trainer die für den Aufruf geeigneten Wahrnehmungsbedingungen findet oder nicht; diese Wahrnehmungsbedingungen schließen verbale Instruktion ein. ANNETT (1985) beschreibt als Beispiel die Instruktion eines Badminton-Trainers, «so zu tun wie ein Indianer auf dem Kriegspfad, der sein Tomahawk schwingt». Offenbar gibt es in unserer Kultur eine stereotype Vorstellung davon, was ein Indianer auf dem Kriegspfad mit seinem Tomahawk macht. Zumindest soll die Haltung des Badminton-Schlägers in Erwartung der gegnerischen Angabe mit Hilfe dieser Instruktion leicht zu erlernen sein.

Es gibt weitere Beispiele für Populations-Stereotype, die sich kaum auf individuelle Lernerfahrungen zurückführen lassen. Die Tendenz, die Hände wegzustrecken, wenn ein Hindernis vor einem auftaucht, mag noch als eine Anpassung im Verlauf der Stammesgeschichte zu verstehen sein. Eine praktische Konsequenz dieser Tendenz ist es z.B., daß die Hupe im Auto durch Drücken zu betätigen sein sollte, aber

nicht durch Ziehen. Weitere Stereotype, deren Ursprung noch unklarer erscheint, finden sich in der Musik. Das wohl bekannteste ist die Quarte (oder auch Quinte) aufwärts, die mit aufwärtsgerichteten Bewegungen assoziiert ist; ausgenutzt wird dieses Stereotyp z. B. beim Tusch, mit dem Büttnerreden im Karneval begleitet werden. Eine eher umgekehrte Wirkung hat das Seufzer-Motiv, die kleine Terz abwärts.

Bei den verschiedenen Beispielen für unterschiedlich schwierige Aufrufbedingungen, die in diesem Abschnitt beschrieben wurden, mag aufgefallen sein, daß das intuitive Urteil über die Schwierigkeit eigentlich in den meisten Fällen zutrifft. Tatsächlich ist die Intuition hier eine gute Richtschnur: Sie erlaubt in der Regel zutreffende Vorhersagen darüber, welche von zwei möglichen Zuordnungen zwischen Signalen und Bewegungen tatsächlich schwieriger ist, also z.B. in einem Wahlreaktionszeitexperiment mit längeren Reaktionszeiten und einer größeren Fehlerquote einhergeht.

## 5.2 Visu-motorische Koordination

Im folgenden wollen wir uns der führenden Funktion der Wahrnehmung zuwenden. Die Fähigkeit, eine Bewegung an die Position eines Objektes in der Umwelt anzupassen, ist eine der weniger selbstverständlichen Selbstverständlichkeiten unseres Alltags. Daß diese Fähigkeit tatsächlich nicht selbstverständlich ist, zeigt ein Gedankenexperiment. Wir können ohne weiteres nach einem gesehenen Objekt greifen, auch wenn wir unsere Hand nicht sehen. Was aber würde passieren, wenn vor Beginn der Bewegung die Längen von Ober- und Unterarm verändert würden? Die normalen motorischen Kommandos würden dann einen ganz anderen mechanischen Effekt auf den Arm haben, und wir würden neben das Objekt greifen. Die Fähigkeit, eine gesehene Position in die Parameter eines Bewegungsprogramms umzusetzen, setzt also eine bekannte Körpertransformation voraus, eine bekannte Beziehung zwischen motorischen Kommandos und resultierender Bewegung (HEUER, 1983). Diese Transformation ändert sich im Verlauf des Wachstums, und zwar in einer Art und Weise, die nicht nur genetisch festgelegt ist, sondern

auch von äußeren Faktoren wie der Ernährung abhängt. Die visu-motorische Koordination muß daher mehr oder weniger zwangsläufig flexibel und modifizierbar sein. Die Plastizität der visu-motorischen Koordination ist das erste Problem, das hier besprochen werden soll. Das zweite Problem ist die dynamische Koordination. Im Fall einer gezielten Bewegung zu einem Objekt ist es relativ offensichtlich, daß die Parameter eines Programms für Zielbewegungen an die Position des Objektes angepaßt werden. Aber was wird an was angepaßt, wenn wir z.B. einen Ball fangen oder mit dem Auto in eine Kurve fahren?

Als letztes schließlich soll gefragt werden, wie spezifisch die visu-motorische Koordination ist. Wenn wir ein Objekt wahrnehmen können und eine Bewegung ausführen, folgt daraus, daß wir die Bewegung auch an das gesehene Objekt anpassen können? Oder ist die visu-motorische Koordination nicht etwas jeweils sehr spezifisches, was für jeden speziellen Fall gelernt werden muß? Eine solche Spezifität würde z.B. bedeuten, daß visu-motorische Koordinationen auch neben und unabhängig von unserer bewußten Wahrnehmung der Welt existieren könnten, ein Gedanke, der auf den ersten Blick recht fremdartig erscheint.

### 5.2.1 Plastizität der visu-motorischen Koordination

Plastizität der visu-motorischen Koordination zeigt sich in Experimenten, in denen die natürliche oder gewohnte Beziehung zwischen Wahrnehmung und Bewegung experimentell verändert wird, z.B. mit Hilfe von Prismenbrillen. Unter dem Gesichtspunkt der visu-motorischen Koordination stellen Prismenexperimente eine Möglichkeit dar, die Plastizität zu untersuchen, die im Alltag z. B. die Anpassung an veränderte Körperproportionen erlaubt. Ein Prisma oder eine andere optische Transformation wird nur deshalb verwendet, weil der Körperbau experimentell nicht verändert werden kann.

Die prinzipielle Gleichartigkeit von optischer Verschiebung eines Reizes durch ein Prisma um z.B. 5 cm und einer Verbreiterung der Schulter um ebenfalls 5 cm kann man sich relativeinfach verdeutlichen. Wenn eine Vp nach einer Verbreiterung der Schulter mit gestrecktem rech-

tem Arm auf ein direkt vor ihr liegendes Ziel zeigen muß, so muß im Vergleich zur normalen Schulterbreite der Winkel zwischen Oberarm und Schultergürtel um einen bestimmten Betrag verringert werden. Um genau den gleichen Betrag muß er verringert werden, wenn das Prisma verwendet wird: Die Vp sieht das Ziel zwar direkt vor sich, tatsächlich befindet es sich aber 5 cm links davon, und dorthin muß sie zeigen.

Die Ergebnisse von Prismenexperimenten sind im Kapitel 2 (Wahrnehmung) ausführlich beschrieben. Das Grundphänomen ist der negative Nacheffekt beim Zeigen ohne visuelle Rückmeldungen: Wenn das Ziel nach der Darbietungsperiode wieder ohne Prisma gesehen wird, zeigt die Vp systematisch neben das Ziel, und zwar entgegen der optischen Verschiebung durch das Prisma. Wenn das Ziel durch das Prisma zwar geradeaus erschien, tatsächlich aber 5 cm links davon lag (optische Verschiebung nach rechts), zeigt die Vp im Nachtest ohne Prisma links neben das Ziel.

Die Plastizität der visu-motorischen Koordination im Prismenexperiment ist ein Beleg dafür, daß die Beziehung zwischen der wahrgenommenen Position eines Zielreizes und den Parametern eines Bewegungsprogramms nicht fest ist, sondern flexibel. Die Annahme einer flexiblen Beziehung dieser Art ist der Kern der Schema-Theorie von SCHMIDT (1975), deren Grundbegriffe kurz erläutert werden sollen. Diese Theorie ist der Reafferenz-Theorie von HEIN und HELD (1962) rechtähnlich, die im Kapitel 2 (Wahrnehmung) beschrieben ist. Sie entstammt aber einem ganz anderen Forschungszusammenhang, nämlich dem des motorischen Lernens.

Ausgangspunkt der Schema-Theorie ist das Konzept des generalisierten Bewegungsprogramms. Die Parameter des Programms müssen zum gewünschten Ergebnis der Bewegung in Beziehung gesetzt werden, z.B. ihrer Dauer oder ihrer Endposition. Dafür wird eine Regel postuliert, das motorische Schema («recall schema»), das durch Lernen modifiziert werden kann. Wenn also ein bestimmtes Ergebnis der Bewegung vorgegeben ist, erlaubt das motorische Schema den Zugriff auf die geeigneten Parameter eines Bewegungsprogramms. Neben dem motorischen Schema wird ein per-

zeptives Schema («recognition schema») postuliert, das die Beziehung zwischen Ergebnis der Bewegung und sensorischen Begleiterscheinungen angibt. Dieses Schema erlaubt zumindest bei kurz dauernden Bewegungen wie Würfeln eine Angabe über das Gelingen, auch wenn das geworfene Objekt gar nicht gesehen wird; das Ergebnis kann allein auf der Grundlage der sensorischen Begleiterscheinungen der ausgeführten Bewegung abgeschätzt werden. (Einen neueren Überblick über die Schema-Theorie geben SHAPIRO & SCHMIDT, 1982.) Der Begriff des Schemas hat in der Schema-Theorie eine sehr spezielle Bedeutung. Er bezeichnet nämlich eine Zuordnungsregel, und diese Bedeutung weicht von der geläufigen Bedeutung des Begriffes ab. Nach der geläufigen Bedeutung wäre z.B. auch das generalisierte Bewegungsprogramm als Schema zu bezeichnen.

Die wohl wichtigste Folgerung aus der Schema-Theorie betrifft die Bedingungen des motorischen Lernens. Für das Erlernen eines Schemas sollten variable Aufgaben besser geeignet sein als stets gleichbleibende. Wenn z.B. eine neue Beziehung zwischen wahrgenommener Position eines Ziels und Parametern eines Bewegungsprogramms erlernt werden soll, sollte es günstiger sein, unterschiedliche Zielpositionen zu verwenden statt nur eine. Eigenartigerweise aber wird die Schema-Theorie bislang nicht auf Prismenexperimente angewendet, und ihre Vorhersagen für solche Experimente sind nicht überprüft. Typischerweise wird in Prismenexperimenten nur eine Position des Ziels verwendet - zumindest in Experimenten mit gut kontrollierten Reizbedingungen. Mit dieser «punktuellen Übung», die gewissermaßen nur einen Punkt im Schema betrifft, nämlich eine Zielposition und die zugeordneten Programmparameter, mag es zusammenhängen, daß die Nacheffekte im Prismenexperiment meist relativ schnell abklingen, und zwar auch dann, wenn die Vp im Dunklen sitzt (DEWAR, 1971). Bei längeren und variablen Darbietungsperioden könnten die Änderungen im Prismenexperiment möglicherweise dauerhaft werden. Das würde die Annahme stützen, daß es sich tatsächlich um die Änderungen handelt, die im Alltag eine dauerhafte Anpassung an einen veränderten Körperbau erlauben.

### 5.2.2 Dynamische visu-motorische Koordination

Die Anpassung der Parameter eines Bewegungsprogramms für gezielte Bewegungen an die gesehene Position eines Ziels ist eine sehr einfache Form der visu-motorischen Koordination. Bei vielen Alltagsaufgaben haben wir es mit komplizierteren Problemen zu tun, insbesondere mit der Anpassung an relativ zu uns selbst bewegte Objekte. Wenn wir z.B. einen Ball fangen, muß die antizipatorische Bewegung der Arme an die Annäherung des Balls angepaßt werden. Wenn wir vor einer Ampel bremsen, muß der Druck auf das Bremspedal so eingestellt werden, daß das Auto direkt an der Ampel zum Stillstand kommt. Bei derartigen Leistungen gibt es offenbar komplexere Zusammenhänge zwischen Merkmalen visueller Reize und Parametern motorischer Programme, über die noch relativ wenig bekannt ist. Hier wollen wir uns auf ein Beispiel beschränken.

Ein bewegtes Objekt stellt einen relativ komplizierten Reiz dar, der sich auf unterschiedliche Arten beschreiben läßt. Wenn man fragt, wie eine Bewegung an einen solchen Reiz angepaßt wird (oder durch ihngeführt wird), ist zunächst eine genaue Analyse des Reizes selbst erforderlich. Es gilt, diejenigen Variablen zu identifizieren, deren Erfassung der Anpassung der Bewegung zugrundeliegen könnte. Eine Variable, die vermutlich bei der dynamischen visu-motorischen Koordination eine gewichtige Rolle spielt, wird mit dem griechischen Buchstaben  $\tau$  bezeichnet.

Wenn sich ein Objekt der Größe  $s$  dem Beobachter nähert, so gilt für den Sehwinkel  $\alpha(t) = s/D(t)$ . Für die erste Ableitung des Sehwinkels nach der Zeit gilt  $\alpha'(t) = -sD'(t)/D^2(t)$ , wobei  $D'(t)$  die erste Ableitung der Distanz des Objektes nach der Zeit ist. Die Variable  $\tau$  ist definiert als  $\tau(t) = \alpha(t)/\alpha'(t) = -D(t)/D'(t)$ . Da die Einheit von  $D$  m ist und die von  $D'$  m/s, ist die Einheit von  $\tau$  s: Die Variable  $\tau$  gibt die Zeit an, die noch vergeht, bevor das Objekt auf das Auge trifft, vorausgesetzt, die Geschwindigkeit  $D'(t)$  bleibt unverändert. Diese Zeit muß also nicht auf komplizierte Art und Weise geschätzt werden, sondern ist direkt durch das Verhältnis von Sehwinkel ( $\alpha$ ) und seiner ersten Ableitung nach der Zeit ( $\alpha'$ ) gegeben.

Die Variable  $\tau$  ist ganz offensichtlich für alle Aufgaben potentiell bedeutsam, bei denen wir eine Bewegung an ein Objekt anpassen müssen, das sich uns nähert oder dem wir uns nähern. Eine solche Aufgabe ist das Fangen. Die Arme und Hände müssen vor dem Eintreffen des Balls in eine bestimmte Position gebracht werden. Für die Anpassung dieser Bewegung an den sich nähernden Ball könnte Information über die noch verbleibende Zeit genutzt werden. Natürlich könnte die antizipatorische Bewegung auch an die jeweilige Entfernung des Balls gekoppelt sein oder an seine Geschwindigkeit. Ergebnisse von LEE, YOUNG, REDDISH, LOUCH und CLAYTON (1983) zeigen jedoch, daß der zeitliche Verlauf der antizipatorischen Bewegung an die Variable  $\tau$  gekoppelt ist.

Die Aufgabe der Vp bestand darin, einem herabfallenden Ball entgegenzuspringen und ihn im Scheitelpunkt des Sprungs wieder hochzupressen. Eine der antizipatorischen Bewegungen bei dieser Aufgabe ist es, in die Knie zu gehen und anschließend hochzuspringen. An welches Merkmal des visuellen Reizes ist diese Bewegung zeitlich gekoppelt? Diese Frage läßt sich beantworten, weil unterschiedliche Merkmale zu unterschiedlichen Vorhersagen für die drei Versuchsbedingungen führen, in denen der Ball aus Höhen von 3,5 und 7.2 m geworfen wurde. Diese Vorhersagen sind in Abbildung 14 illustriert.

Gezeigt sind die Höhe und die Geschwindigkeit des Balls sowie  $\tau$  in Abhängigkeit von der Zeit bis zum Ballkontakt, jeweils für die drei Abwurfhöhen. Die horizontalen Linien markieren die Unterschiede zwischen den drei Versuchsbedingungen, die zu erwarten sind, wenn bestimmte Punkte im Verlauf der antizipatorischen Bewegung (z.B. Beginn, Minimum des Kniewinkels) an bestimmte Höhen, Geschwindigkeiten oder Werte von  $\tau$  gekoppelt wären. Wenn also die antizipatorische Bewegung an die Höhe des Balls gekoppelt wäre, sollte sie umso früher vor dem Ballkontakt einsetzen, je geringer die Abwurfhöhe ist. Das Gegenteil wäre bei einer Kopplung der antizipatorischen Bewegung an die Geschwindigkeit des Balls zu erwarten, ebenso bei einer Kopplung an die Variable  $\tau$ . Im letzteren Fall allerdings sollten die Unterschiede zwischen den drei Bedingungen in den späteren Abschnitten der antizipatorischen Bewegung verschwinden.

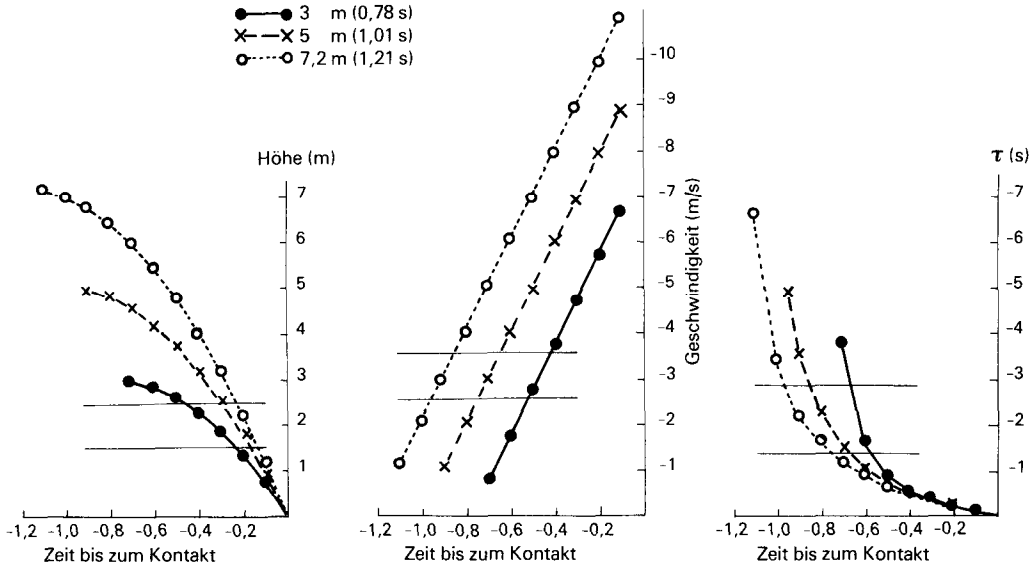


Abbildung 14: Höhe, Geschwindigkeit und  $\tau$  in Abhängigkeit von der Zeit bis zum Kontakt mit einem aus drei verschiedenen Höhen fallenden Ball. Die horizontalen Linien markieren die Zeitpunkte motorischer Ereignisse in Abhängigkeit von der Fallhöhe unter den Annahmen, daß sie an Höhe, Geschwindigkeit oder  $\tau$  gekoppelt sind.

Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen nach der «r-Hypothese»: Die Kniebeugung setzt umso früher vor dem Ballkontakt ein, je größer die Abwurfhöhe ist. Der Zeitpunkt des minimalen Kniewinkels ist schon weniger von der Abwurfhöhe beeinflusst, und während der Kniestreckung schließlich werden die Weg-Zeit-Kurven des Kniewinkels unter den drei Bedingungen praktisch identisch. Stellt man den Kniewinkel nicht in Abhängigkeit von der Zeit bis zum Ballkontakt dar, sondern in Abhängigkeit von  $\tau$ , so verschwinden die Unterschiede zwischen den drei Bedingungen.

Nach diesen Ergebnissen hängt der zeitliche Verlauf der antizipatorischen Kniebeugung in ganz bestimmter Weise von der optischen Variablen  $\tau$  ab: Diese Variable wird gewissermaßen als Zeitachse in das Bewegungsprogramm eingegeben. Statt einer «inneren Uhr», mit deren Schlägen jeweils bestimmte motorische Kommandos verknüpft sind (ROSENBAUM, 1985), und deren schnellerer oder langsamerer Lauf Bewegungen unterschiedlicher Dauer, aber gleicher zeitlicher Struktur zur Folge hat, haben wir es hier mit einer «äußeren Uhr» zu tun. Das Programm definiert nicht eine Weg-

Zeit-Kurve  $p(t)$ , deren unabhängige Variable  $t$  intern bereitgestellt wird, sondern eine Weg-Zeit-Kurve  $p(z)$ , deren unabhängige Variable  $\tau$  sensorisch erfaßt wird, nämlich durch das Verhältnis des Seh winkels und seiner ersten Ableitung nach der Zeit,  $\alpha(t)/\alpha'(t)$ .

LEE et al. zeigen, daß die Variablen für die visuomotorische Koordination bei einer Reihe weiterer Fertigkeiten wie dem Bremsen eines Autos oder dem Weitsprung von Bedeutung sein dürfte, generell bei Aufgaben, bei denen eine Bewegung zeitlich an ein Objekt angepaßt werden muß, das sich uns nähert oder dem wir uns nähern. Einen kurzen Überblick geben LEE und YOUNG (1986).

### 5.2.3 Spezifität der visu-motorischen Koordination

Was kann ein naiver Beobachter darüber sagen, auf welche Weise er die antizipatorischen Bewegungen seiner Arme und Hände an die Annäherung eines Balls anpaßt? Möglicherweise entspricht seine Beschreibung der  $\tau$ -Hypothese, etwa «Ich richte mich danach, wieviel Zeit mir noch bleibt, bis der Ball da ist». Während des Fangens selbst aber dürfte ein Erleben

der verbleibenden Zeit kaum zu beobachten sein. Hier - und in vielen anderen Fällen - scheint ein Bewegungsmuster an ein Merkmal eines visuellen Reizes gekoppelt zu sein, ohne daß wir dieses Merkmal unmittelbar erleben. Wie eng hängt eigentlich das Erleben unserer Umwelt mit der motorischen Anpassung an sie zusammen? Im folgenden soll der Gedanke diskutiert werden, daß visu-motorische Koordination in spezifischer Weise *visu-motorisch* ist und nicht notwendig mit dem Erleben, das dem visuellen Reiz zugeordnet ist, übereinstimmen muß. Die Fortführung dieses Gedankens ist es, eine noch weitergehende Spezifität zu postulieren, nämlich die Existenz visu-motorischer Systeme, die jeweils spezifische Kopplungen zwischen einzelnen Merkmalen visueller Reize und speziellen Bewegungsmustern herstellen.

### ***Bewegungssteuerung und Erleben***

Wir erleben einen einheitlichen Raum, in dem sich Objekte befinden und in dem wir uns bewegen. Nichts scheint darauf hinzudeuten, daß ein Objekt nicht nur eine Position im Raum haben könnte, sondern zwei, die eine in unserem Erleben und die andere für unsere Bewegungen. Ein solcher Gedanke mag manchem fast schon bizarr erscheinen. Dennoch gibt es verschiedene Beobachtungen, nach denen er gerechtfertigt ist. Eine Klasse solcher Beobachtungen ist bereits im Kapitel 2 (Wahrnehmung) beschrieben: Die Anpassung der visu-motorischen Koordination an optische Transformationen erfolgt in der Regel schneller und vollständiger als die Anpassung des Erlebens. Zwei weitere Klassen sollen hier beschrieben werden.

Die erste Klasse von Experimenten zeigt, daß auch dann relativ genau auf Reize gezeigt werden kann, wenn deren räumliche Position gar nicht erlebt wird. Dieses Ergebnis findet sich bei Patienten, die Skotome (Blindheit in Teilen des Gesichtsfeldes) als Folge kortikaler Läsionen haben. PERENIN und JEANNEROD (1978) untersuchten Vpn mit einer Hemianopsie (Halbfeld-Blindheit) als Folge der Entfernung einer der beiden kortikalen Hemisphären. Die Kontroll-Vpn hatten eine Hemianopsie als Folge einer Verletzung der Sehbahn vor dem Corpus geniculatum laterale. (Bei einer solchen Verletzung werden außer den kortikalen

visuellen Feldern auch die visuellen Zentren des Hirnstamms ausgeschaltet.)

Im Versuch saßen die Vpn im Zentrum eines halbzyklindrischen Schirms und fixierten einen Punkt in der Mitte. Mit dem gestreckten Arm mußten sie auf visuelle Zielreize zeigen, die in zufälliger Folge in unterschiedlich weit seitlich gelegenen Positionen dargeboten wurden. Die Reize waren relativ große Streifenmuster von 8° Breite und 6° Höhe. Im intakten Halbfeld konnten die Vpn genau zeigen. Im blinden Halbfeld weisen die Bewegungen der Kontroll-Vpn keine Beziehung zu den Positionen der Reize auf, wohl aber die Bewegungen der Vpn mit Hemianopsie als Folge einer kortikalen Läsion.

PERENIN und JEANNEROD berichten, daß die Kontroll-Vpn bei Darbietung des Reizes im blinden Halbfeld einen schwachen Glanz wahrnehmen, der sich von der Mitte des Schirms in die normale Hälfte hin erstreckt. Die Patienten mit kortikalem Skotom beschrieben den Eindruck, daß im blinden Teil des Gesichtsfeldes ein sehr heller Reiz eingeschaltet wird, der sich von dort in das normale Feld ausdehnt. Form oder Größe des Reizes war aber nicht zu erkennen, und es gab keine bewußte Vorstellung über seine Position. (Einen Überblick über die visuellen Leistungen bei Skotomen infolge kortikaler Läsionen geben CAMPION, LATTO und SMITH, 1983.)

Nach diesen Befunden zum sog. «blindsight» ist das bewußte Erleben der räumlichen Position eines Objektes keine Voraussetzung dafür, nach ihm greifen zu können. Die zweite Klasse experimenteller Befunde - an gesunden Vpn - zeigt außerdem, daß die erlebte und gezeigte Position eines Zielreizes auseinanderfallen können.

BRIDGEMAN, KIRCH und SPERLING (1981) nutzen in ihrer Untersuchung das Phänomen der induzierten Bewegung aus. Wenn ein kleiner Reiz von einem Rahmen umgeben ist und dieser Rahmen bewegt wird, so scheint sich der Zielreiz relativ zum Beobachter zu bewegen. Ein Beispiel für induzierte Bewegungen läßt sich in stürmischen Nächten am Himmel beobachten: Der Mond scheint hinter den Wolken entlangzujagen. BRIDGEMAN et al. bewegten nun den Rahmen um den Zielreiz zyklisch hin und her. Nach jeweils kurzer Zeit wurde der visuelle

Reiz ausgeblendet, wenn sich die tatsächliche Bewegung des Rahmens und diescheinbare Bewegung des Zielreizes an einem der Umkehrpunkte befanden. Sofort nach Ausblendung mußten die Vpn auf die letzte Position des Zielreizes zeigen. Entspräche die gezeigte Position der erlebten, so sollten die Vpn in unterschiedliche Richtungen zeigen je nachdem, ob sich der Zielreiz bei der Ausblendung am linken oder am rechten Umkehrpunkt seiner scheinbaren Bewegung befand. Tatsächlich aber zeigten die Vpn stets auf die gleiche Position. Die erlebten Änderungen der Position des Zielreizes werden also von der Hand nicht mitvollzogen.

In einer zweiten Bedingung des Experiments bewegte sich der Zielreiz mit dem Rahmen mit, und zwar so, daß diereale Bewegung die scheinbare Bewegung gerade ausglich. Als Ergebnis erscheint der Zielreiz stationär, obwohl er sich tatsächlich bewegt. Unter diesen Bedingungen hing nun die Richtung des Zeigens durchaus davon ab, ob die Ausblendung am linken oder rechten Endpunkt der Bewegungsbahn erfolgte. Die Hand folgt hier also den realen Änderungen der Position des Zielpunktes, die aber gar nicht erlebt werden.

Bei beiden beschriebenen Experimenten kann man fragen, auf welche Weise die Dissoziation von Bewegungssteuerung und Erleben zustandekommt. Hier interessiert uns aber weniger die Ursache dieser Dissoziation als vielmehr die Folgerung, die sich aus ihrer Existenz ergibt: Zumindest teilweise erfolgt die Verarbeitung visueller Reize spezifisch für das Erleben und spezifisch für die Bewegungssteuerung. Es scheint keine einheitliche innere Repräsentation unserer Umwelt zugeben, die sowohl unserem Erleben wie auch unserer Bewegungssteuerung zugrundeliegt. Wenn man diesen Gedanken der Spezifität weiterführt, gelangt man zum Konzept visu-motorischer Systeme.

### *Visu-motorische Systeme*

Visu-motorische Systeme lassen sich funktionell definieren durch bestimmte Merkmale visueller Reize als Eingangsgröße und bestimmte motorische Muster als Ausgangsgröße (s. ARBIB, 1981). Die Leistung eines visu-motorischen Systems besteht in der Herstellung einer sehr spezifischen visu-motorischen Koordination. Die Implikationen, die sich aus diesem

Konzept ergeben, lassen sich am einfachsten bei Tieren mit einem begrenzten Verhaltensinventar untersuchen.

Eine erste Implikation des Konzepts ist die Spezifität der Entwicklung bzw. des Lernens. Wenn z. B. gelernt wurde, einen bestimmten visuellen Reiz für die Steuerung der einen Bewegung zu nutzen, folgt daraus nicht, daß er auch für die Steuerung einer anderen Bewegung benutzt werden kann. Gezeigt werden muß natürlich, daß diese andere Bewegung unter anderen Reizbedingungen durchaus beherrscht wird. Nur dann nämlich kann das Versagen auf das Fehlen einer spezifischen visu-motorischen Koordination zurückgeführt werden. Befunde dieser Art finden sich in Versuchen zur Entwicklung gezielter Pfotenbewegungen der Katze.

Wie im Abschnitt «Regelung und Programmsteuerung in verschiedenen Dimensionen» beschrieben ist, erfordert die Beherrschung der sog. «visuell geführten Bewegung» der Katze vorhergehendes Sehen der aktiv bewegten Pfote. Die Katze wird schräg von oben auf eine Tischkante hin bewegt, die mit Aussparungen versehen ist. Geprüft wird die seitliche Anpassung der Bewegung, die verhindert, daß die Pfote in eine der Aussparungen gerät. Kätzchen, die während ihrer bisherigen Entwicklung mit dem einen Auge nur die eine Pfote gesehen haben, mit dem anderen Auge aber beide, beherrschen im Test beim Sehen mit dem einen Auge nur die seitlichen Anpassungen der einen Pfote. Wenn sie dagegen mit dem anderen Auge sehen können, beherrschen sie die Bewegung mit beiden Pfoten (HEIN & DIAMOND, 1971).

Die Tiere können also mit beiden Augen die Position des Ziels wahrnehmen - egal, mit welchem Auge sie gucken, sie können wenigstens eine Pfote richtig bewegen. Die Tiere können auch mit beiden Pfoten die Bewegung ausführen. Es liegt also weder ein Defizit der Wahrnehmung vor noch ein Defizit der Bewegungssteuerung. Dennoch sind visuell geführte Bewegungen mit einer Augen-Pfoten-Kombination nicht möglich; für diese spezifische Kombination fehlt die visu-motorische Koordination.

Eine zweite Implikation des Konzepts visu-motorischer Systeme ist die Spezifität von Störun-

gen. INGLE (1982) beschreibt eine Serie von Experimenten zur Identifikation visu-motorischer Systeme beim Frosch, in denen unter anderem versucht wird, funktionell durch Eingangs- und Ausgangsgröße definierte Systeme auch anatomisch zu lokalisieren. Diese Lokalisation erfolgt im wesentlichen mit Hilfe des Nachweises, daß Läsionen zu spezifischen Störungen führen. Das soll an Hand von zwei visu-motorischen Systemen illustriert werden, dem für den Beutefang und dem für die Hindernisvermeidung.

Beim Beutefang zeigt ein Frosch eine Reaktion, die aus zwei Komponenten besteht. Die erste Komponente ist die Orientierung des Körpers zum Beuteobjekt, die zweite der Sprung auf die Beute zu. Beide Reaktionskomponenten erfordern ein intaktes optisches Tectum (ein Teil des Hirnstamms). Bei der Hindernisvermeidung zeigen sich ebenfalls eine Orientierung des Körpers und ein Sprung, aber nicht auf einen visuellen Reiz zu, sondern an ihm vorbei. Diese Leistung ist nicht an ein intaktes optisches Tectum gebunden, sondern wird von einem anderen Teil des Hirnstamms vermittelt, dessen Läsion wiederum den Beutesprung des Frosches unbeeinträchtigt läßt.

Die Untersuchungen an Katzen und Fröschen verdeutlichen das Konzept visu-motorischer Systeme und seine Implikationen, die Spezifität der Entwicklung und die Spezifität von Störungen. Ist es sinnvoll, auch beim Menschen eine Vielzahl solcher Systeme zu postulieren? Betrachtet man nur die auslösende Funktion der Wahrnehmung, so ist die Antwort trivial: Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Wahrnehmungen, auf die wir in spezifischer Weise mit bestimmten Bewegungen antworten; die Zuordnung von Aufrufbedingungen zu motorischen Programmen kann in nahezu beliebiger Weise erfolgen. Aber die Bezeichnung beliebiger Signal-Reaktions-Zuordnungen als «visu-motorische Systeme» trägt zum Verständnis nichts bei. Einen Nutzen hat das Konzept wohl nur dann, wenn es auf die führende Funktion der Wahrnehmung bezogen wird.

In diesem Fall impliziert das Konzept, daß visu-motorische Koordination nicht eine Beziehung zwischen einem «motorischen System» auf der einen Seite und einem «visuellen System» auf der anderen Seite darstellt, sondern vielmehr

eine Anzahl spezifischer Beziehungen zwischen bestimmten Merkmalen visueller Reize und bestimmten Parametern motorischer Programme umfaßt. Man kann z.B. postulieren, daß es ein visu-motorisches System für antizipatorische Bewegungen beim Fangen eines Balls gibt (VON HOFSTEN, 1987, spricht von einem «action system»). Systematische Untersuchungen zur Abgrenzung unterschiedlicher visu-motorischer Systeme beim Menschen aber sind selten.

JEANNEROD und BIGUER (1982) unterscheiden zwei visu-motorische Systeme, die sie als «Visuomotor channels» bezeichnen. Ausgangspunkt ist die Unterscheidung zweier visueller Systeme, die TREVARTHEN (1968) mit den schwer übersetzbaren Ausdrücken «ambient» und «focal» bezeichnet hat. Das erstere System erfaßt das ganze Gesichtsfeld und dient im wesentlichen einer Analyseräumlicher Reizmerkmale. Das zweite System ist dagegen auf das zentrale Gesichtsfeld beschränkt und dient der Analyse von Formmerkmalen. JEANNEROD und BIGUER setzen diese zunächst auf der Wahrnehmungsseite unterschiedenen Systeme zu den beiden Komponenten der Reichbewegung (s. Abschnitt: Intersegmentale Koordination) in Beziehung: Der Raum-Kanal («ambient») ist der Transport-Komponente zugeordnet, der Objekt-Kanal («focal») der Greif-Komponente. Die unterschiedlichen visuellen Reizmerkmale sollen somit für die Steuerung verschiedener motorischer Muster kritisch sein.

Unabhängig davon, ob der Gedanke spezifischer visu-motorischer Systeme beim Menschen sich als tragfähig erweist oder nicht, zunächst hat er einiges an Plausibilität für sich und ist außerdem von heuristischem Wert. Er verlangt nämlich detaillierte Analysen der visu-motorischen Koordination bei verschiedenen Fertigkeiten, speziell eine Antwort auf die Frage, welche Merkmale von Bewegungsmustern an welche Merkmale visueller Reize gekoppelt sind.

## 6. Repräsentation von Bewegungen

Bewegungen müssen in unterschiedlich starkem Maße an die Umwelt angepaßt werden.

Beim Lenken eines Autos etwas sind die relevanten Merkmale der Umwelt variabel, und es ist eine mehr oder weniger kontinuierliche Anpassung an sie erforderlich. Beim Schalten dagegen sind die relevanten Merkmale der Umwelt, an die die Bewegung angepaßt werden muß, unveränderlich. POULTON (1957b) bezeichnet Bewegungsmuster, die an variable Umweltmerkmale angepaßt werden müssen, als offene Fertigkeiten («open skills»), und solche, bei denen das nicht der Fall ist, als geschlossene Fertigkeiten («closed skills»).

Für offene Fertigkeiten ist das Problem der Beziehung zwischen Wahrnehmung und Bewegung, wie es im letzten Abschnitt behandelt wurde, grundlegend. Für geschlossene Fertigkeiten stellt sich dagegen eher das Problem der Repräsentation von Bewegungen, also ihrer Abbildung im Zentralnervensystem. In diesem Abschnitt soll zunächst gefragt werden, welche Merkmale einfacher gelernter Bewegungen repräsentiert sind, und anschließend, wie die Repräsentation einer Bewegungsfolge organisiert ist.

## 6.1 Repräsentation einfacher Zielbewegungen

Nach einer zeitweilig recht populären Theorie von ADAMS (1971) umfaßt die innere Repräsentation einer gezielten Bewegung alle sensorischen Konsequenzen. Diese globale Repräsentation wird als perzeptive Spur bezeichnet. Bei der Reproduktion dient sie als Führungsgröße eines Regelkreises, an die die aktuellen Rückmeldungen angepaßt werden. Die perzeptive Spur soll umso stärker sein, je mehr sensorische Rückmeldungen vorhanden sind, und je stärker die perzeptive Spur ist, desto genauer kann natürlich die Bewegung reproduziert werden. Zur Prüfung dieser Vorhersage ließen ADAMS, MARSHALL und GOETZ (1972) ihre Vpn unter fünf verschiedenen Bedingungen eine Zielbewegung ausführen, die nach einem Behaltensintervall von 5 oder 90 sec reproduziert werden mußte. Die Vorgabe der Bewegung erfolgte, indem die Vpn einen Schieber auf einer Bahn bis an einen mechanischen Anschlag bewegten. Die Weite (bzw. Endposition) der Bewegung sollte behalten werden. In einer Bedingung konnte die Vp die Bewegung des Schiebers hö-

*Tabelle 4: Absoluter Fehler (in mm) bei der Reproduktion gezielter Bewegungen unter verschiedenen Rückmeldungsbedingungen (nach ADAMS et al., 1972, S.94).*

Zusätzliche Rückmeldungen	Genauigkeit
akustisch	26
propriozeptiv (Widerstand)	33
visuell	20
akustisch + propriozeptiv + visuell	20
keine	32

ren, in der zweiten Bedingung wurde die Bewegung gegen einen elastischen Widerstand ausgeführt, in der dritten Bedingung konnte die Vp ihre Hand sehen. In der vierten Bedingung schließlich waren alle drei Formen der Rückmeldung vorhanden, und in der fünften fehlten alle drei. Die Genauigkeit der Reproduktionen war beim längeren Behaltensintervall von 90 sec kleiner als beim kurzen Behaltensintervall von 5 sec, aber die Wirkung der verschiedenen Rückmeldungen war in beiden Fällen nicht verschieden. Die über beide Behaltensintervalle gemittelten absoluten Fehler sind in Tabelle 4 angegeben.

Das Vorhandensein eines elastischen Widerstandes verbessert die Genauigkeit nicht, zumindest nicht bei nur einmaliger Vorgabe der Bewegung. Bei längeren Übungsperioden allerdings werden Bewegungen gegen einen elastischen Widerstand genauer als solche ohne Widerstand, vorausgesetzt, das bewegte Körperglied kann nicht gesehen werden (ADAMS, GOPHER & LINTERN, 1977). Eine leichte Verbesserung der Leistung tritt ein, wenn die Bewegung gehört werden kann, und die größte Genauigkeit wird erreicht, wenn die Hand gesehen wird. Der Anstieg der Genauigkeit bei verbesserten sensorischen Rückmeldungen soll auf die Entwicklung einer stärkeren perzeptiven Spur zurückgehen. Insofern bestätigen die Ergebnisse die zentrale Vorhersage der Theorie von ADAMS (1971). Allerdings fällt auf, daß dann, wenn die Hand gesehen wird, die Genauigkeit durch weitere Rückmeldungen nicht mehr erhöht wird.

Ist die innere Repräsentation einer gezielten Bewegung tatsächlich ein einheitliches Gebilde, das zudem nur die sensorischen Begleiterscheinungen der Bewegung umfaßt? Oder

gibt es nicht eher eine «Vielheit» von Repräsentationen, die jeweils spezielle Aspekte der Bewegung betreffen? Tatsächlich spricht einiges dafür, daß die verschiedenen sensorischen Begleiterscheinungen einer Bewegung nicht zu einer einheitlichen Repräsentation verschmelzen, sondern jeweils ihre Eigenständigkeit behalten. Außerdem sind nicht alle Repräsentationen einer gezielten Bewegung sensorisch. Nach den bisher beschriebenen Überlegungen zur gezielten Bewegung sollte es auch eine motorische Repräsentation geben, die etwa aus dem generalisierten Bewegungsprogramm zusammen mit den einer speziellen Bewegung zugeordneten Parametern besteht.

In dem beschriebenen Experiment von ADAMS et al. (1972) war die verfügbare sensorische Information bei Vorgabe und Reproduktion der gezielten Bewegung identisch. Unterstellt man die Existenz einer einheitlichen (sensorischen) Repräsentation, so kann die Genauigkeit der Reproduktion zum einen von der bei der Vorgabe verfügbaren Information abhängen - sie bestimmt die Güte der Repräsentation - und zum anderen natürlich von den sensorischen Begleiterscheinungen der Reproduktion. Sie sollte aber nicht davon beeinflußt werden, ob die verfügbare Information bei Vorgabe und Reproduktion gleich oder verschieden ist. Derartige Ergebnisse zeigen vielmehr, daß unterschiedliche Arten der sensorischen Information bei der Vorgabe nicht quantitative Effekte auf die Güte einer einheitlichen Repräsentation haben, sondern daß qualitativ verschiedene, insbesondere modalitätsspezifische, Repräsentationen entstehen. Bei visueller Vorgabe z.B. entsteht eine visuelle Repräsentation; visuelle Rückmeldungen bei der Reproduktion können daran genauer angepaßt werden als propriozeptive. Bei einer Vorgabe ohne Sehen dagegen entsteht nur eine propriozeptive Repräsentation; propriozeptive Rückmeldungen bei der Reproduktion können daran genauer angepaßt werden als visuelle.

Belege für die Abhängigkeit der Reproduktions-Genauigkeit von der Gleichheit versus Verschiedenheit der bei Vorgabe und Reproduktion verfügbaren Information liefern Ergebnisse zur intra- und intermodalen Anpassung: Wenn eine bestimmte Distanz visuell oder propriozeptiv dargeboten wird und an-

schließend reproduziert werden muß, wobei sie visuell oder propriozeptiv erfaßt werden kann, ist die intramodale Anpassung generell genauer als die intermodale (z.B. NEWELL, SHAPIRO & CARLTON, 1979). Dieses Ergebnis entspricht im übrigen den Ergebnissen zur Anpassung visuell oder propriozeptiv erfaßter Bewegungen an Zielpositionen, die in der gleichen oder anderen Modalität unmittelbar erfaßt werden.

Welche Ergebnisse belegen die Existenz motorischer Repräsentationen? KELSO (1977) schaltete bei seinen Vpn die sensorische Erfassung von Fingerbewegungen mit Hilfe einer Abbindung am Unterarm aus. Zunächst war eine Bewegung frei gewählter Weite (der Bereich der wählbaren Weiten war instruiert) auszuführen und anschließend zu reproduzieren. Die Reproduktionen waren nur geringfügig ungenauer als ohne die Ausschaltung der Propriozeption. Da bei der Vorgabe keine sensorische Information vorhanden war, konnte natürlich auch keine sensorische Repräsentation aufgebaut werden, sondern nur eine motorische. (Die Ausschaltung der Propriozeption beim Menschen geht nicht mit einer Ausschaltung des Erlebens einher. Das Erleben einer aktiven Bewegung ist nicht an intakte Sinnesorgane gebunden. Entsprechend sollt man sich eine motorische Repräsentation nicht als dem Bewußtsein entzogen vorstellen.)

Wenn bei der Vorgabe die Weite der Bewegung frei ausgewählt werden kann, entspricht sieben Parametern, die in das generalisierte Bewegungsprogramm eingesetzt wurden. Diese Parameter brauchen bei der Reproduktion nur wiederholt zu werden; eine motorische Repräsentation erlaubt also eine genaue Reproduktion. Wenn dagegen bei der Vorgabe einmechanischer Anschlag verwendet wird, wie in dem beschriebenen Experiment von ADAMS et al. (1972), entsprechen die Programm-Parameter nicht genau der Weite. Die motorische Repräsentation erlaubt in diesem Fall also keine genaue Reproduktion. Bewegungen, die auf letztere Art vorgegeben werden, können nach Ausschaltung der Propriozeption praktisch gar nicht reproduziert werden, und unter normalen Bedingungen werden sie generell ungenauer reproduziert als Bewegungen mit frei gewählter Weite (überblick bei KELSO & WAL-

LACE, 1978). Immer dann also, wenn die motorische Repräsentation eine genaue Reproduktion erlaubt, haben wir tatsächlich genauere Reproduktionen als dann, wenn die motorische Repräsentation nicht der vorgegebenen Bewegung entspricht.

Nach den bisher beschriebenen Befunden sollten gezielte Bewegungen auf multiple modalitätsspezifische Weise repräsentiert werden, nämlich motorisch, propriozeptiv und/oder visuell. Wenn während des Lernens weitere Information zur Verfügung steht, z.B. akustische, dürften auch weitere Repräsentationen entwickelt werden. Motorisches Lernen sollte daher stets ein gewisses Maß von Spezifität im Hinblick auf die in der Lernphase vorhandene Information aufweisen. Ist es möglich, beim Lernen willkürlich einzelne Repräsentationen aufzubauen oder bei der Reproduktion einzelne Repräsentationen völlig zu vernachlässigen?

Die Befunde, die zu dieser Frage vorhegen, beziehen sich nur selten auf modalitätsspezifische Repräsentationen. Bei der Ausführung einer gezielten Bewegung werden nicht nur verschiedene Modalitäten angesprochen, sondern eine gezielte Bewegung besitzt auch verschiedene Merkmale, die in spezifischer Weise repräsentiert werden können. Zwei solche Merkmale sind die Weite und die Endposition der vorgegebenen Bewegung. Solange die Startpositionen bei Vorgabe und Reproduktion gleich sind, kann man nicht entscheiden, ob sich die Vpn das eine oder andere eingepägt haben. Das ist aber möglich, wenn bei der Reproduktion eine andere Startposition verwendet wird als bei der Vorgabe.

Die Repräsentationen von Weite und Endposition können bei der Vorgabe in flexibler Weise aufgebaut und bei der Reproduktion in flexibler Weise genutzt werden. Das zeigen Ergebnisse von HAGMAN und FRANCIS (1975), die die Instruktionen für das Einprägen und die Reproduktion unabhängig voneinander variierten. Tabelle 5 zeigt für übereinstimmende Instruktionen ein oft bestätigtes Ergebnis, das hier allerdings nicht sehr deutlich ausfällt: Die Reproduktion der Endposition ist genauer (16 mm) als die Reproduktion der Weite (18 mm). Das gleiche Ergebnis zeigt sich, wenn sich die Vpn Weite und Endposition einprägen soll-

*Tabelle 5: Absoluter Fehler (in mm) bei der Reproduktion von Weite und Endposition gezielter Bewegungen bei unterschiedlichen Behaltens-Instruktionen (nach HAGMAN & FRANCIS, 1975, S. 143).*

Behaltens-Instruktion	Reproduktions-Instruktion	
	Weite	Endposition
Weite	18	27
Endposition	24	16
Weite und Endposition	18	15

ten. Das wesentliche Ergebnis aber ist die Wechselwirkung: Nach dem Einprägen primär der Weite gelingt die Weiten-Reproduktion genauer, nach dem Einprägen primär der Endposition die Endpositions-Reproduktion.

Welche Repräsentation, die der Weite oder die der Endposition, in erster Linie genutzt wird, hängt nicht nur von der Instruktion ab, sondern auch von der Weite der Bewegung. GUNDRY (1975) gab Bewegungen unterschiedlicher Weite jeweils mehrfach vor und ließ sie mehrfach reproduzieren. Bei den verschiedenen Reproduktionen wurden die Startpositionen in so kleinen Schritten verändert, daß das von den Vpn gar nicht bemerkt wurde. Daher konnte die Instruktion bezüglich der Reproduktion von Weite versus Endposition uneindeutig sein. Im Fall der Endpositions-Reproduktion Sollten die Endpositionen von den Veränderungen der Startposition unbeeinflußt bleiben, während sie im Fall der Weiten-Reproduktion mit der Startposition verschoben werden sollten. Das Ausmaß der Verschiebung der Endpositionen der Reproduktionen war nun umso größer, je geringer die Weite der Bewegung war. Demnach wird bei kurzen Bewegungen die Repräsentation der Weite eher genutzt als bei weiten Bewegungen.

Obwohl die Repräsentationen von Weite und Endposition je nach Instruktion und Weite der Bewegung in flexibler Weise genutzt werden können, geht die Flexibilität doch nicht so weit, daß eine der beiden Repräsentationen vollständig vernachlässigt werden kann. Auch dann, wenn die Vpn instruiert sind, sich nur die Weite bzw. die Endposition einzuprägen und zu reproduzieren - wobei die Startposition bei Vorgabe und Reproduktion natürlich verschieden

ist -, zeigen die Reproduktionen einen systematischen Fehler in Richtung der durch die jeweils zu vernachlässigende Repräsentation definierten Bewegung (LAABS, 1974). Wenn also die Weite zu reproduzieren ist, endet die Reproduktion zu nah an der Endposition der vorgegebenen Bewegung; wenn die Endposition zu reproduzieren ist, ist die Weite der Reproduktion der der vorgegebenen Bewegung zu ähnlich. Der durch die zu vernachlässigende Endposition verursachte Fehler bei der Reproduktion der Weite ist generell größer als der durch die zu vernachlässigende Weite verursachte Fehler bei der Reproduktion der Endposition (s. HEUER, 1983, S.75-78).

Nach den besprochenen Ergebnissen können gezielte Bewegungen in flexibler Weise mehrfach repräsentiert werden. Die möglichen Repräsentationen betreffen die motorischen Kommandos und die sensorischen Begleitscheinungen, wie sie durch verschiedene Sinnesmodalitäten erfaßt werden. Daneben kann man Repräsentationen nach den verschiedenen Merkmalen einer gezielten Bewegung wie Weite oder Endposition klassifizieren. Diese beiden Klassifikationen von Repräsentationen sind vermutlich nicht völlig unabhängig voneinander. Befunde von KELSO (1977) verweisen z.B. darauf, daß motorische Repräsentationen in stärkerem Maße die Endposition betreffen als propriozeptive Repräsentationen (HEUER, 1983, S. 77-78). Auf alle Fälle aber hat die innere Repräsentation einer gezielten Bewegung eher den Charakter einer «Vielheit», die durch ihre qualitativ verschiedenen Komponenten charakterisiert ist, als den einer «Einheit», die nur in ihrer Stärke variiert.

## 6.2 Repräsentation von Bewegungsfolgen

Bewegungsfolgen können in einzelne Segmente oder Elemente untergliedert werden, z.B. in Anschläge beim Maschineschreiben und Klavierspiel oder in Sprachlaute beim Sprechen. Modelle zur inneren Repräsentation solcher Folgen betreffen in aller Regel nicht die Frage, auf welche Weise die einzelnen Elemente repräsentiert sind; diese Frage haben wir am Beispiel der gezielten Bewegung behandelt, und sie soll uns in diesem Abschnitt nicht weiter beschäftigen. Stattdessen wollen wir uns der

Frage zuwenden, auf welche Weise die einzelnen Elemente einer Bewegungsfolge miteinander verknüpft sind.

Dabei werden wir ein Problem vernachlässigen, das hier aber zumindest kurz erwähnt werden soll. Die einzelnen Elemente einer Bewegungsfolge ändern sich, wenn benachbarte Elemente verändert werden. Solche Kontexteffekte finden sich vor allem beim Sprechen, aber auch bei Bewegungen der Gliedmaßen (SCHAPPE, 1965). Das Problem ist der Übergang von den (postulierten) kontextunabhängigen Elementen der inneren Repräsentation zu den (beobachtbaren) kontextabhängigen Elementen der resultierenden Bewegungsfolge: Auf welche Weise entstehen z.B. aus einer bestimmten Repräsentation eines Sprachlautes je nach benachbarten Lauten verschiedene Bewegungsmuster der Artikulatoren? Kontexteffekte mögen unterschiedlichste Ursachen haben. Hier soll ein Beispiel genügen, das zwar allenfalls einen geringen Anteil von Kontexteffekten erklärt, aber in allgemeinerer Weise illustriert, daß ihre Existenz kein Argument gegen die Annahme kontextunabhängiger Elemente der inneren Repräsentation darstellt. Dieses Beispiel wurde im Abschnitt «Das Masse-Feder-Modell» beschrieben. Unterstellt man, daß die Elemente der inneren Repräsentation Zielpositionen von Artikulatoren spezifizieren und mit vorgegebenen Zeitintervallen abgearbeitet werden, dann können identische Ziele in variabler Weise «unterschossen» werden. Diese Unterschiede hängen u.a. von der verfügbaren Zeit ab (vgl. Abb. 5) - und damit indirekt auch von den nachfolgenden Silben, die dieses Zeitintervall beeinflussen, - sowie von der Ausgangsposition des Artikulators. Sie sind somit nicht in der inneren Repräsentation angelegt, sondern entstehen erst bei ihrer Umsetzung in die Bewegung, im Beispiel durch die Eigenschaftendes peripheren Masse-Feder-Systems.

### 6.2.1 Sequenzen von Fingerbewegungen

Die einfachste Aufgabe, mit deren Hilfe man die Repräsentation von Bewegungsfolgen untersuchen kann, ist eine sequentielle Abfolge von Fingerbewegungen. Die einfachste Hypothese ist, daß die Struktur der vorgegebenen Folge von Einzelbewegungen ihren Nieder-

schlag in der Struktur der Elemente der inneren Repräsentation findet. Zumindest für eine hierarchische Struktur gibt es Belege dafür, daß das der Fall ist. Ein Experiment von ROSENBAUM, KENNY und DERR (1983) soll das illustrieren.

ROSENBAUM et al. verwendeten Sequenzen der Art *ZzZzMmMm* oder *mZmZzZmZm*; (Z, z) bezeichnet den Zeigefinger, (M, m) den Mittelfinger, Großbuchstaben die rechte Hand und Kleinbuchstaben die linke. Die beiden Zeige- und Mittelfinger lagen auf Tasten, die in der richtigen Reihenfolge gedrückt werden mußten. Eine Sequenz wurde zunächst geübt, bis die Vpn das Gefühl hatten, daß sie sie beherrschten. Anschließend war sie ohne Pausen sechsmal hintereinander möglichst schnell auszuführen.

Die Sequenzen haben eine hierarchische Struktur, die sich mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes darstellen läßt, wie er in Abbildung 15

(oben) gezeigt ist. Die Knoten der untersten Ebene stellen die einzelnen Bewegungen dar, die der zweiten Ebene die Zweiergruppen, die der dritten Ebene die Vierergruppen und der oberste Knoten schließlich die ganze Sequenz. Unabhängig von komplizierteren theoretischen Überlegungen kann man eine solche Darstellung als Untergliederung der Bewegungsfolge in die intuitiv erkennbaren Gruppen oder «Einheiten höherer Ordnung» betrachten. Solche Einheiten höherer Ordnung finden sich z.B. in der Sprache (Phonem, Silbe, Wort) und in der Musik (ein 4/4-Takt etwa besteht aus zwei Einheiten niederer Ordnung von je zwei Schlägen).

Man kann nun postulieren, daß die innere Repräsentation einer Bewegungsfolge mit einer hierarchischen Struktur ebenfalls hierarchisch organisiert ist. Die Beschreibung wird damit zu einer vermuteten psychologischen Realität. Diese Hypothese über die Repräsentation läßt

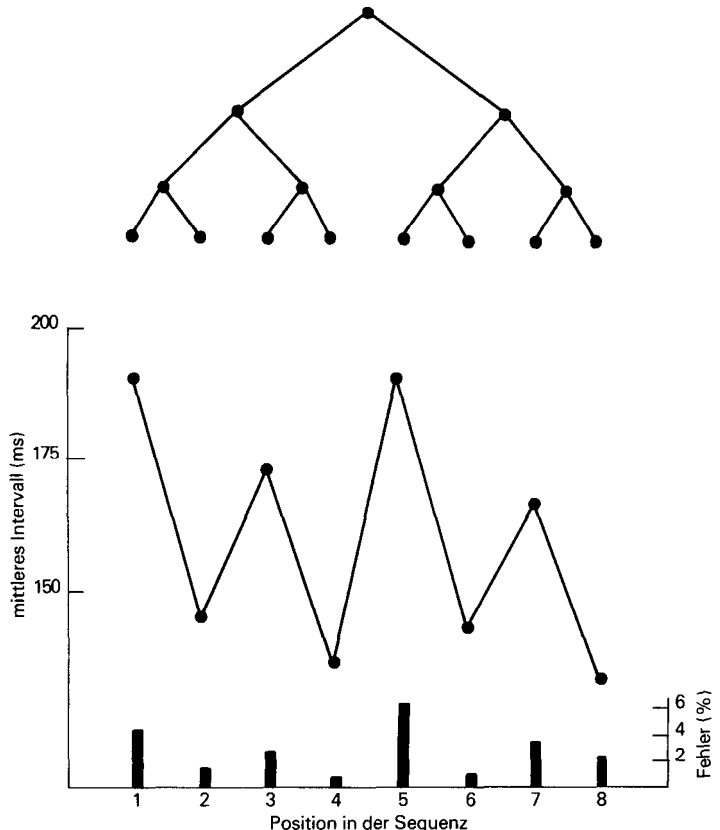


Abbildung 15: Hierarchische Baum-Struktur einer Folge von Fingerbewegungen (oben) und mittlere Intervalle vor sowie Fehlerquoten bei jeder Einzelbewegung (unten; nach ROSENBAUM et al., 1983, S.91).

sichprüfen, Wenn sie durch eine Annahme über deren Umsetzung in eine zeitlich ausgedehnte Bewegungsfolge ergänzt wird.

Eine einfache Annahme ist, daß bei der Umsetzung der hierarchisch strukturierten Repräsentation die Hierarchie, also der Entscheidungsbaum, durchlaufen wird. ROSENBAUM et al. sprechen von einem «tree traversal process». Dann sollten die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Bewegungen davon abhängen, auf welcher Ebene der Hierarchie sie miteinander verknüpft sind. Vom ersten zum zweiten Element der untersten Ebene ist z.B. nur ein Knoten zu durchlaufen, vom zweiten zum dritten Element aber sind es drei. Da außerdem jeder Knoten eine Möglichkeit für das Auftreten eines Fehlers darstellt, sollte die Fehlerhäufigkeit bei einem bestimmten Element der Sequenz ebenfalls davon abhängen, wie viele Knoten beim Übergang vom vorhergehenden Element zu durchlaufen sind.

Die mittleren Zeitintervalle vor jeder einzelnen Fingerbewegung und die Fehlerhäufigkeiten sind in Abbildung 15 (unten) gezeigt. Beides sind an den Positionen 1 und 5 am größten, an den Positionen 3 und 7 am zweitgrößten und an den geradzahlig Positionen am kleinsten. In diesen Daten wird also deutlich die hierarchische Struktur reflektiert: Je mehr Knoten vor einer Einzelbewegung durchlaufen werden, desto länger ist das Zeitintervall und desto größer die Zahl der Fehler.

Die Ergebnisse von ROSENBAUM et al. werden durch Befunde von POVEL und COLLARD (1982) bestätigt, die zwei weitere in unserem Zusammenhang wichtige Ergebnisse berichten. Zum einen zeigen sie, daß das für hierarchische Strukturen charakteristische Profil der Zeitintervalle zwischen den Einzelbewegungen nicht auf unterschiedlich schwierige Übergänge von einem Finger zum nächsten zurückgeführt werden kann. Zum anderen verwendeten sie auch unstrukturierte Bewegungsfolgen. Diese Folgen wurden insgesamt langsamer ausgeführt als die strukturierten, und im Profil der Zeitintervalle zwischen den Einzelbewegungen zeigten sich nur noch die Auswirkungen unterschiedlich schwieriger Fingerübergänge. Es ist nicht ganz klar, ob die  $V_{pn}$  auch die unstrukturierten Folgen auf interindividuell unterschiedliche Weise strukturierten. Je weniger

eindeutig nämlich eine bestimmte Struktur vorgegeben ist, desto unterschiedlicher können die individuellen Strukturierungen ausfallen, und wenn sie hinreichendverschieden sind, treten sie in den Mittelwerten nicht mehr in Erscheinung.

Eine hierarchische Organisation ist ganz offensichtlich kein Merkmal, das sich nur bei der Repräsentation von Bewegungsfolgen findet. Bildung von Einheiten höherer Ordnung ist vielmehr ein sehr häufig zu beobachtendes Phänomen, wann immer wir Gedächtnisleistungen oder Repräsentationen von Wissen betrachten (s. Kap.3, Gedächtnis und Wissen). Man kann daher die Vermutung haben, daß die Repräsentation von Bewegungssequenzen nicht prinzipiell verschieden ist von der Repräsentation irgendwelcher anderen Gegebenheiten, zumindest was die Prinzipien der Organisation der Elemente angeht. Die Elemente selbst natürlich sollten durchaus verschieden sein, wenn es sich z.B. um eine innere Repräsentation der Bewegungsfolge beim Spielen einer Fuge handelt oder um eine innere Repräsentation des Alphabets.

### 6.2.2 Sprechen

Annahmen über die innere Repräsentation einer intendierten sprachlichen Äußerung finden sich in einer Vielzahl unterschiedlicher Modellvorstellungen. Hier sollen nur einige wenige Prinzipien dargestellt werden, die relativ breit akzeptiert sind, und die nicht allzuweit über die vorhandenen Daten hinausgehen.

Die wohl nächstliegende Frage im Zusammenhang mit inneren Repräsentationen intendierter Äußerungen ist, ob es sie überhaupt gibt. Offensichtlich haben wir - von Ausnahmen abgesehen - vor dem Beginn einer Äußerung eine Idee davon, was wir sagen wollen. Aber geht dieser Gedanke auch mit einer Repräsentation der Artikulationen einher, mit deren Hilfe wir ihn ausdrücken werden? Diese Frage ist im übrigen für einen strengen Behavioristen sinnlos: Wenn Denken als «unterschwelliges Sprechen» betrachtet wird, ist der Inhalt des Denkens unmittelbar an die Artikulation gebunden. Das Problem der Bewegungssteuerung besteht nur noch in einer hinreichenden Verstärkung der motorischen Kommandos, damit das Sprechen hörbar wird.

Der wohl klarste Beleg für die Existenz einer Repräsentation der Artikulationen ergibt sich aus Versprechern, bei denen einzelne Phoneme zwischen aufeinanderfolgenden Wörtern vertauscht werden. Ein typischer Spoonerismus wie «Kasse Taffee» besteht aus einem Austausch von z. B. den Anfangsphonemen zweier Wörter, ohne daß sonst irgendwelche Änderungen auftreten. Seltener als die Anfangsphoneme sind andere Silbenpositionen betroffen (z.B. BAARS & MOTLEY, 1976). (Die Bezeichnung «Spoonerismus» für Vertauschungen der beschriebenen Art geht auf Reverend Dr. WILLIAM ARCHIBALD SPOONER, 1844-1930, zurück, dem Rektor eines College in Oxford. SPOONER zeigte zwar Auffälligkeiten unter anderem der Sprache, aber nicht die typischen Spoonerismen. Sie wurden ihm wohl nur von anderen Personen zugeschrieben. S. POTTER, 1980.)

Fragt man nach der Art der Repräsentation einer geplanten Äußerung, so kann man zunächst zwei Ebenen unterscheiden (vgl. MACNEILAGE, HUTCHINSON & LASATER, 1981). Auf einer prämotorischen Ebene sind die Einheiten der Repräsentation Sprachsegmente wie Phoneme, Silben oder Wörter. Auf der motorischen Ebene sind dagegen Bewegungen von Artikulatoren repräsentiert. Ein wichtiges Kriterium für diese Unterscheidung ist die Tatsache, daß bei Vertauschungen von Phonemen, Silben oder Wörtern nicht alle Merkmale der Artikulation betroffen sind. Die vertauschten Sprachsegmente werden in ihrem neuen Kontext nicht so ausgesprochen, wie es zum ursprünglichen und richtigen Kontext gehört hätte, sondern sie werden im Hinblick auf Koartikulation, Betonung und Sprachmelodie an den neuen und falschen Kontext angepaßt. Die Vertauschung erfolgt also auf der prämotorischen Ebene, und die Umsetzung in motorische Kommandos für die Artikulation erfolgt erst nach der Vertauschung.

Die Annahmen darüber, welche Merkmale von Artikulator-Bewegungen auf der motorischen Ebene repräsentiert sind, variieren sehr stark zwischen einzelnen Modellen. In erster Linie hängen sie ab von den Annahmen über den Prozeß, durch den aus dieser Repräsentation das reale Muster der Artikulator-Bewegungen entsteht. Allgemein kann man sagen, daß die

motorische Repräsentation die Information enthält, die das motorische System benötigt, seien das nun Festlegungen von motorischen Kommandos oder Festlegungen von Führungsgrößen für nachgeordnete Regelkreise.

Eines der augenfälligsten Merkmale der Sprache ist die Möglichkeit, Einheiten unterschiedlicher Größe zu definieren. In aufsteigender Folge sind das Phonem, die Silbe, das Wort und das Satzglied zu nennen. Diese Existenz von Einheiten unterschiedlicher Größe läßt eine hierarchische Repräsentation auf der prämotorischen Ebene vermuten, durch die die verschiedenen großen Einheiten konstituiert werden.

Eine Möglichkeit für eine hierarchische Repräsentation auf der prämotorischen Ebene beschreibt SHAFER (1976). Zunächst werden zwei Ebenen nach schwacher und starker Betonung der Silbe unterschieden, dann zwei Ebenen für das Anfangsglied und den Rest jeder Silbe. Die «Tasse Kaffee» wird also dargestellt als

$$\begin{array}{cc} T_{as} & K_{af} \\ s_e & f_{ee} \end{array}$$

Eine solche Darstellung - und das gilt auch für andere Formen hierarchischer Repräsentationen (z.B. MACKAY, 1982) - macht eine Reihe von Versprechern plausibel. Die Grundregel ist, daß Vertauschungen im wesentlichen innerhalb einer Ebene auftreten. Der Anfangskonsonant einer Silbe wird praktisch nie mit einem Phonem aus der Mitte oder vom Ende einer anderen Silbe vertauscht, und eine betonte Silbe praktisch nie mit einer unbetonten. Auf der anderen Seite aber reicht das Modell von SHAFER (1976), das neben Annahmen über die Repräsentation natürlich auch Annahmen über das «Auslesen» dieser Repräsentation enthält, nicht aus, um alle Versprecher zu erklären, wie sie z.B. bei Zungenbrechern auftreten (BUTTERWORTH & WHITTAKER, 1980).

Die Unterscheidung zwischen prämotorischer und motorischer Ebene ist vermutlich nicht nur im Zusammenhang mit dem Sprechen bedeutsam, sondern auch für andere Bewegungssequenzen. Sind z.B. Elemente der hierarchischen Repräsentation der Sequenzen von Fingerbewegungen tatsächlich Repräsentationen

von Einzelbewegungen in der Art, wie wir sie im Abschnitt ((Repräsentation einfacher Zielbewegungen)) besprochen haben? Oder handelt es sich nur um «Etiketten» auf einer prämotorischen Ebene, die sich ähnlich wie ein Phonem der Information zuordnen lassen, die das motorische System für die Steuerung der Bewegung benötigt?

Eine Möglichkeit zur Beantwortung dieser Frage besteht in einer genaueren Analyse der Fehler. Voraussetzung für diese Analyse ist, daß einzelne Merkmale der Fingerbewegungen, wie z. B. der Druck, von ihrer Position abhängen. Wenn im Fall eines Fehlers der Druck der richtigen Position auch in der falschen beibehalten wird, handelt es sich um eine Vertauschung auf der motorischen Ebene. Wenn aber mit dem vertauschten Finger der für die neue Position richtige Druck ausgeübt wird, dann sollte es sich um eine Vertauschung auf der prämotorischen Ebene handeln, genauso, wie eine Vertauschung von Silben ohne Vertauschung z.B. der Satzmelodie der prämotorischen Ebene zugeschrieben wird. Da die Häufigkeit von Fehlern die hierarchische Organisation reflektiert, folgt aus der Zuordnung der Fehler zur prämotorischen oder motorischen Ebene auch die Zuordnung der Hierarchie. Untersuchungen dieser Art aber stehen aus. Die Frage, ob tatsächlich Repräsentationen der Einzelbewegungen hierarchisch organisiert sind oder aber nur die «Etiketten» auf einer prämotorischen Ebene, bleibt daher unbeantwortet.

### **6.3 Implizite Repräsentationen der Umwelt**

Bisher haben wir innere Repräsentationen von Einzelbewegungen und Bewegungsfolgen betrachtet. Neben Repräsentationen von Bewegungen gibt es natürlich auch solche der Umwelt. Abschließend möchte ich darauf hinweisen, daß eine Repräsentation von Bewegungen gleichzeitig eine Repräsentation der Umwelt darstellen kann.

Wenn man ein bestimmtes Wort auf einer Schreibmaschine schreiben will, muß man wissen, wo sich die entsprechenden Tasten befinden. Ein solches Wissen, aufgrund dessen man z.B. in ein Schema einer Schreibmaschinentastatur die zugeordneten Buchstaben eintragen

kann, möchte ich als explizite Repräsentation der Umwelt bezeichnen. Wennmangelern hat, eine einem bestimmten Wort zugeordnete Folge von Fingerbewegungen auszuführen, kann die Zuordnung der Buchstaben zu den Tasten im Prinzip vergessen werden. Obwohl dann keine explizite Repräsentation der Umwelt mehr existiert, enthalten die Bewegungen doch eine implizite Repräsentation, da sie an die Umwelt angepaßt sind. Tatsächlich scheinen hochgeübte Typistinnen die Aufgabe, Buchstaben in das Schema einer Schreibmaschinentastatur einzutragen, zu bewältigen, indem sie sich die erforderlichen Fingerbewegungen vorstellen (HAY, 1974).

Ein operationales Kriterium für die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Repräsentationen der Umwelt ist die fehlende oder vorhandene Abhängigkeit von der Ausführung bestimmter Bewegungen. Explizite Repräsentationen lassen unterschiedlichste Bewegungen zu, implizite Repräsentationen nur eine. Andere auf eine implizit repräsentierte Umwelt bezogene Leistungen - wie die verbale Beschreibung - sind nur auf dem Umweg über die Vorstellung des Bewegungsablaufs möglich.

Die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Repräsentationen bezieht sich zunächst nur auf die räumlichen Merkmale der Umwelt. Sie läßt sich verallgemeinern zu der Unterscheidung zwischen deklarativem und prozeduralem Wissen. Grob gesprochen betrifft deklaratives Wissen Fakten, während prozedurales Wissen in Form von Produktionen, bedingungsbezogenen Handlungen, repräsentiert ist. Analog dem von ANDERSON (1982) postulierten Übergang von einem deklarativen Stadium zu einem prozeduralen Stadium im Verlauf der Übung kann man im Verlauf des sensumotorischen Lernens einen Übergang von einer expliziten zu einer impliziten Repräsentation der Umwelt erwarten. Solche Übergänge sollten allerdings nur dann stattfinden, wenn bestimmte räumliche Aspekte der Umwelt nur für ein einzelnes oder wenige Bewegungsmuster relevant sind.

## 7. Bewegung und Vorstellung

Auf dem Weg von den mechanischen Eigenschaften des Muskels zu den inneren Repräsentationen von Bewegungen sind wir den höheren geistigen Prozessen immer näher gekommen. In diesem Abschnitt soll nun direkt nach Beziehungen zwischen Bewegungssteuerung und kognitiven Prozessen gefragt werden. Wenn an der Ausführung von Bewegungsmustern unterschiedliche innere Repräsentationen beteiligt sind, sollten diese nicht mit anderen Repräsentationen der Umwelt interferieren können? Sollte es nicht auch möglich sein, Repräsentationen von Bewegungen rein mental zu manipulieren und auf diese Weise die zugeordneten Bewegungen zu verändern?

Bevor wir diese Fragen näher besprechen, ist es notwendig, auf den etwas schillernden Begriff der inneren Repräsentation genauer einzugehen. Dieser Begriff bezeichnet die Abbildung einer äußeren Gegebenheit im Zentralnervensystem. Im extrem vereinfachten Fall, den es real nicht gibt, stellt also eine einzelne Nervenzelle, deren Aktivierung eine bestimmte Bewegung zur Folge hat, eine Repräsentation dieser Bewegung dar. Dieses Beispiel soll deutlich machen, daß eine innere Repräsentation einer äußeren Gegebenheit nicht identisch ist mit deren Erleben. Wir können über innere Repräsentationen sprechen, ohne uns um das, was erlebt wird, zu kümmern. Das haben wir bisher getan. Z.B. haben wir unterschiedliche Repräsentationen von Bewegungen nur nach Verhaltenskriterien unterschieden.

Man kann nun nicht nur über innere Repräsentationen sprechen, ohne sich um das Erleben zu kümmern, sondern innere Repräsentationen existieren offenbar auch dann, wenn es kein irgendwie auf sie bezogenes Erleben gibt. Es ist ja ganz offensichtlich, daß es eine größere Zahl von Repräsentationen der Umwelt oder auch eigener Bewegungen gibt, als uns jeweils bewußt ist.

Obwohl die innere Repräsentation einer äußeren Gegebenheit nicht notwendig mit Erleben einhergeht, sollte umgekehrt das Erleben einer äußeren Gegebenheit an die Existenz einer inneren Repräsentation gebunden sein. Man kann kaum bestreiten, daß Bewußtsein auf die

Aktivität unseres Zentralnervensystems zurückgeht. Wenn bewußtes Erleben sich auf eine äußere Gegebenheit bezieht, stellt das zugrundeliegende neuronale Aktivitätsmuster somit auch eine Abbildung dieser äußeren Gegebenheit dar. Wenn wir uns also z. B. eine Bewegung vorstellen, sollte dieser Vorstellung eine innere Repräsentation der entsprechenden Bewegung zugrundeliegen.

Eine Besonderheit unserer Vorstellungen ist es, daß sie sich von den real existierenden äußeren Gegebenheiten lösen können. Wir können uns Dinge vorstellen, die wir nicht wahrgenommen haben, und Bewegungen, die wir nicht ausgeführt haben. Wenn solche Vorstellungen mit inneren Repräsentationen speziell von Bewegungen einhergehen, sollten wir nicht anschließend entsprechende Bewegungen ausführen können? Wie wir sehen werden, ist das unter bestimmten Bedingungen tatsächlich der Fall. Zunächst aber soll gezeigt werden, daß auch solche Vorstellungen, die gar nicht auf Bewegungen bezogen sind, eine Beziehung zu den an der Bewegungssteuerung beteiligten Strukturen aufweisen.

### 7.1 Interferenzen zwischen Bewegungssteuerung und räumlichen Vorstellungen

Wenn wir zwei Tätigkeiten gleichzeitig ausführen, geht das in der Regel mit einer Leistungseinbuße bei der einen oder anderen Tätigkeit einher. Beispiele sind gleichzeitige Bewegungen beider Hände, aber auch stärker voneinander verschiedene Tätigkeiten wie das Lenken eines Autos und die gleichzeitige Unterhaltung mit dem Beifahrer. Auf welche Weise kommen solche Doppeltätigkeits-Interferenzen zustande?

In relativ grober Weise (eine genauere Darstellung findet sich bei HEUER & WING, 1984) kann man unspezifische und spezifische Ursachen unterscheiden. Unspezifische Interferenz geht im wesentlichen auf eine Überforderung zurück. Der zentrale Begriff bei ihrer Interpretation ist der der Kapazität. Unabhängig von jeder inhaltlichen Bedeutung hat diese hypothetische Variable drei wesentliche Merkmale:

1. Die Gesamtkapazität eines Menschen ist begrenzt.
2. Kapazität kann, mit einigen Ausnahmen, ei-

ner bestimmten Tätigkeit in willkürlich kontrollierbarem Maße zugewiesen werden.

3. Je mehr Kapazität einer Tätigkeit zugewiesen wird, desto besser ist die Leistung.

KAHNEMAN (1973) gibt einen Überblick über eine Vielzahl von experimentellen Ergebnissen, die sich mit Hilfe eines solchen Kapazitäts-Konzeptes interpretieren lassen.

Eine der inhaltlichen Konnotationen des Begriffs der Kapazität ist Anstrengung. In diesem Sinne ist Kapazität ein energetisches Konzept. Die gesamte Energie, die uns zur Verfügung steht, kann auf mehrere gleichzeitig ausgeführte Aufgaben verteilt werden. Allerdings reicht sie oft nicht aus, um die Aufgaben mit gleicher Güte auszuführen wie im Fall der Einzeltätigkeit.

In unserem Zusammenhang bedeutsamer sind die spezifischen Ursachen von Interferenzen. Spezifische Interferenz geht im wesentlichen auf die gleichzeitige Beanspruchung derselben Strukturen oder Funktionen zurück, ganz allgemein darauf, daß bestimmte Aufgabenkombinationen Gemeinsamkeiten haben, die andere Aufgabenkombinationen nicht besitzen. Der Nachweis spezifischer Interferenz erfordert bestimmte Muster experimenteller Ergebnisse (HEUER, 1985a), und zwar solche, die nicht mehr mit Hilfe des globalen Kapazitäts-Konzeptes zu erklären sind. Für die Interferenz zwischen Bewegungssteuerung und räumlichen Vorstellungen liegt ein solches Ergebnismuster vor.

BADDELEY, GRANT, WEHT und THOMSON (1975) und BADDELEY und LIEBERMAN (1980) kombinierten in einer Serie von Experimenten Tracking-Aufgaben mit Vorstellungsaufgaben. Für die Tracking-Aufgabe wurde ein Pursuit-Rotor verwendet, eins der klassischen Geräte vor allem im Bereich des motorischen Lernens. Es besteht im wesentlichen aus einem auf einer Kreisbahn rotierenden Zielpunkt, den die Vp mit einem in der Hand gehaltenen Griffel verfolgen muß.

In einem Experiment mußten die Vpn Sätze lernen, die die Platzierung von Ziffern in einer vorgestellten Matrix beschrieben (z.B. «In the next square to the *right* put a 2», «In the next square *up* put a 3»). In der Kontrollbedingung hatte das Lernmaterial keinen räumlichen Bezug (z. B. «In the next square to the *quick* put a 2»,

«In the next square to the good put a 3»). Diese Sätze wurden zum einen dargeboten, während die Vp gleichzeitig die Tracking-Aufgabe ausführte, und zum anderen ohne diese Zweitaufgabe. Im Fall der Doppeltätigkeit war die Vp instruiert, in ihrer Tracking-Leistung nicht nachzulassen. Ohne die zusätzliche Tracking-Aufgabe war die Gedächtnisleistung bei den beiden Aufgaben nicht verschieden, ihre Schwierigkeit war also im wesentlichen gleich. Mit der zusätzlichen Tracking-Aufgabe war die Gedächtnisleistung nur bei der Vorstellungsaufgabe beeinträchtigt. Die Interferenz der Tracking-Aufgabe mit der Vorstellungsaufgabe ist also stärker als die mit der Kontroll-Aufgabe. Dieses Ergebnis wurde für verschiedene Arten von Vorstellungs- und Kontroll-Aufgaben bestätigt, und auch mit einer auditiven statt einer visuellen Tracking-Aufgabe.

Aus der Tatsache, daß die Tracking-Aufgaben mit den Vorstellungsaufgaben stärker interferieren als mit den Kontroll-Aufgaben, folgt noch nicht eine spezifische Ursache der Interferenz. Dieses Ergebnis kann auch darauf zurückgehen, daß die Vorstellungsaufgaben mehr Kapazität erfordern, so daß das Fehlen der Kapazität, die für die Tracking-Aufgaben benötigt wird, zu einer stärkeren Leistungseinbuße führt als bei den Kontroll-Aufgaben. Aus der unspezifischen Interpretation folgt aber, daß die Leistungseinbuße bei den Vorstellungsaufgaben auch dann größer ist, wenn die Tracking-Aufgaben durch andere Zweitaufgaben ersetzt werden. Diese Implikation wurde nicht bestätigt. Wenn als Zweitaufgabe eine Helligkeits-Diskrimination (BADDELEY & LIEBERMAN, 1980) oder eine einfache Reaktionszeitaufgabe (GRIFFITH & JOHNSTON, 1973) verwendet wird, findet sich vielmehr eine stärkere Leistungseinbuße in Kombination mit den Kontroll-Aufgaben als mit den Vorstellungsaufgaben.

Aus dem beschriebenen Ergebnismuster folgt eine spezifische Ursache der Interferenz zwischen Tracking-Aufgaben und Vorstellungsaufgaben. Welches die gemeinsamen Strukturen oder Funktionen sind, die der spezifischen Interferenz zugrundeliegen, ist aus den Ergebnissen nicht unmittelbar ersichtlich. Die Vermutung ist aber zumindest naheliegend, daß es sich um solche Strukturen handelt, die mit der

Repräsentation räumlicher Gegebenheiten zu tun haben.

## 7.2 Funktionelle Äquivalenz von Bewegungen und Bewegungsvorstellungen

Während die bisher beschriebenen Experimente als Nachweis gemeinsamer Strukturen für räumliche Vorstellungen und die Steuerung zumindest bestimmter Bewegungen gelten können, geht das folgende Experiment über diesen Nachweis hinaus. Es zeigt eine funktionelle Äquivalenz von vorgestellten und tatsächlich ausgeführten Bewegungen, d. h., nach bestimmten Kriterien gleichartige Wirkungen. Diese funktionelle Äquivalenz impliziert, daß Bewegungen und Bewegungsvorstellungen mit zumindest teilweise identischen Repräsentationen einhergehen, durch die ihre gleichartige Wirkung zustandekommt. Im speziellen Fall handelt es sich um den Einfluß auf die innere Repräsentation einer vorher gelernten Bewegung.

JOHNSON (1982) ließ seine Vpn eine Bewegung von 30 oder 60 cm Weite 15mal ausführen. Die Weite war durch einen mechanischen Anschlag festgelegt; außerdem war die Zielposition durch ein rotes Licht markiert. Nach einem Behaltensintervall von 40 sec Dauer war diese Bewegung zehnmal zu reproduzieren (ohne das rote Licht). Im Behaltensintervall war jeweils eine von vier verschiedenen Aktivitäten auszuführen:

- (1) In Dreierschritten rückwärts zählen.
- (2) Zehn Bewegungen mit jeweils anderer Weite als bei Vorgabe ausführen.
- (3) Wie (2), aber die Vp sollte sich die Bewegungen nur vorstellen.
- (4) Wie (3), aber die vorgestellten Bewegungen hatten die gleiche Weite wie die vorgegebene Bewegung.

Tabelle 6 zeigt die konstanten Fehler. Beim Zählen im Intervall oder beim Vorstellen der vorgegebenen Bewegung wird diese im Mittel genau reproduziert. Führen die Vpn aber im Intervall Bewegungen anderer Weite aus oder stellen sich diese vor, so fallen die Reproduktionen zu kurz aus, wenn die zusätzliche Bewegung kürzer ist als die vorgegebene, und zu weit, wenn sie weiter ist. Für die Größe dieser

*Tabelle 6: Konstanter Fehler (in mm) bei der Reproduktion einer gezielten Bewegung nach unterschiedlichen Aktivitäten im Behaltensintervall; ein positiver Wert bezeichnet eine zu große Weite der Reproduktion, ein negativer Wert eine zu geringe Weite (nach JOHNSON, 1982, S.353).*

Weite (cm)	Aktivität zwischen Vorgabe und Reproduktion			
	Zählen	andere Bewegungen	vorgestellte	
			andere Bewegungen	gleiche Bewegungen
30	-4	+48	+42	0
60	-4	-45	-41	0

Verzerrung der Reproduktionen ist es gleichgültig, ob die Vpn die zusätzlichen Bewegungen ausführen oder sie sich nur vorstellen.

Lassen sich Merkmale der Bewegungsvorstellung identifizieren, die für die Interferenz mit der vorher gelernten Bewegung kritisch sind? ANNETT (1985) beschreibt ein Experiment zu dieser Frage, in dem versucht wurde, die Bewegungsvorstellungen selektiv zu beeinträchtigen. Das Experiment entsprach in seinen Grundzügen dem von JOHNSON (1982). Gleichzeitig mit der Vorstellung der zusätzlichen Bewegung aber war eine von insgesamt sechs verschiedenen Zweitaufgaben auszuführen. In je zwei dieser Aufgaben war auf visuelle oder akustische Reize zu achten, oder es waren rhythmische Bewegungen auszuführen. Die Reize wurden entweder nur in einer Position dargeboten oder in zwei voneinander entfernten Positionen; die Bewegungen waren entweder nur an einer Stelle auszuführen oder alternierend an zwei. Wenn zwei Positionen verwendet wurden («räumliche Zweitaufgaben»), lagen die dadurch definierten Strecken stets parallel zu den Bahnen der gezielten Bewegungen.

Das Ergebnis dieses Experiments zeigt in recht eindeutiger Weise, daß die räumlichen Merkmale der vorgestellten Bewegungen für ihren Einfluß auf die Reproduktion kritisch sind. Der Einfluß der vorgestellten Bewegungen auf die Reproduktion, wie er in Tabelle 6 gezeigt ist, bleibt erhalten, wenn bei der Zweitaufgabe Reize an einer einzelnen Position zu beachten sind oder Bewegungen an einer ein-

zelen Position auszuführen. Er verschwindet dagegen bei den räumlichen Zweitaufgaben, bei denen zwei Positionen verwendet werden. Der räumliche Aspekt dieser Aufgaben interferiert offenbar mit den räumlichen Merkmalen der vorgestellten Bewegungen, so daß sie ihren Einfluß auf die Reproduktionen verlieren.

### 7.3 Mentale Übung

Wenn es gelingt, die Reproduktion einer gezielten Bewegung durch eine vorgestellte Bewegung in gleicher Weise zu beeinflussen wie durch eine tatsächlich ausgeführte, sollte es dann nicht auch gelingen, mit Hilfe von Vorstellungen Bewegungsmuster zu erlernen? Das ist tatsächlich der Fall. Einen umfassenden Überblick über die vorliegenden Ergebnisse geben FELTZ und LANDERS (1983).

Nach den Befunden zur funktionellen Äquivalenz von Bewegungen und Bewegungsvorstellungen liegen den letzteren in erster Linie räumliche Repräsentationen zugrunde. Mentale Übung - die wiederholte Vorstellung von Bewegungen - sollte also vorwiegend oder ausschließlich räumliche (oder raum-zeitliche) Repräsentationen betreffen. Das ist der Kern der sog. kognitiven Hypothese, die eine der beiden zentralen Hypothesen zur Wirkungsweise mentaler Übung ist. (Die kognitive Hypothese bezieht sich auch auf symbolische oder verbale Repräsentationen von Bewegungen, die hier aber vernachlässigt werden sollen.) Für die tatsächliche Ausführung von Bewegungen sollte mentale Übung also in dem Maße nützlich sein, in dem räumliche Repräsentationen dafür von Nutzen sind.

Die räumliche Repräsentation einer Riesenselle am Hochreck, mag sie noch so exakt sein, hat nun keineswegs zur Folge, daß ich ein solches Bewegungsmuster ausführen kann; einem guten Sportler könnte es dagegen gelingen. In allgemeiner Weise kann man sagen, daß die räumliche Repräsentation eines Bewegungsmusters nur dann für die Ausführung von Nutzen ist, wenn sie in eine entsprechende motorische Repräsentation umgesetzt werden kann, also z. B. in den Aufruf eines geeigneten generalisierten Bewegungsprogramms und das Einsetzender erforderlichenparameter. Wenn das nicht der Fall ist, bleibt die Veränderung der

räumlichen Repräsentation während der mentalen Übung gewissermaßen isoliert.

Aufgaben, bei denen die Umsetzung einer räumlichen Repräsentation in entsprechende motorische Kommandos möglich ist und bei denen vor allem eine bestimmte räumliche Repräsentation zu erwerben ist, werden oft als «kognitive Aufgaben» bezeichnet. Aufgaben dagegen, bei denen die Umsetzung einer räumlichen Repräsentation in motorische Kommandos nicht gelingt und bei denen in erster Linie diese Umsetzung gelernt werden muß, sind eher «motorisch». Nach dem Überblick von FELTZ und LANDERS (1983) ist es einer der am besten gesicherten Befunde, daß die Wirkung der mentalen Übung bei kognitiven Aufgaben größer ist als bei motorischen. Dieses Ergebnis entspricht der kognitiven Hypothese zur Wirkungsweise der mentalen Übung. (Ein zweiter gut gesicherter Befund ist, daß die Wirkung mentaler Übung in veröffentlichten Arbeiten größer ist als in unveröffentlichten.)

Die Annahme, daß Bewegungsvorstellungen in erster Linie an eine räumliche Repräsentation von Bewegungen gebunden sind, und daß das Umsetzen dieser zunächst isoliert veränderten Repräsentation in motorische Kommandos nur bei bestimmten Bewegungen gelingt, macht einen großen Teil der Befunde zur mentalen Übung verständlich. Es gibt aber einige Ergebnisse, nach denen Bewegungsvorstellungen auch direkt zu motorischen Repräsentationen in Beziehung stehen.

Im Abschnitt «Aufruf motorischer Programme» haben wir das ideomotorische Phänomen erwähnt: Die Vorstellung (oder auch das Sehen) einer Bewegung trägt gewissermaßen die Tendenz zu ihrer Realisierung in sich. Tatsächlich läßt sich während der Vorstellung einer Bewegung Aktivität in den betroffenen Muskeln beobachten (JACOBSON, 1932). Diese Aktivität ist aber sehr schwach und nicht immer vorhanden. Dennoch gibt es eine Hypothese, die psychoneuromuskuläre Hypothese, - und das ist die zweite zentrale Hypothese zur Wirkungsweise der mentalen Übung - nach der sie die Grundlage der Wirkung der mentalen Übung darstellt. Wichtiger aber wohl als die periphere Muskelaktivität ist der zentrale Prozeß, der durch sie indiziert wird.

Einen näheren Einblick in diesen Prozeß erlau-

ben Befunde von ROLAND, LARSEN, LASSEN und SKINHOJ (1982) zur lokalen cerebralen Durchblutung, die als Indikator für den Grad der Aktivität verschiedener Regionen der Hirnrinde dienen kann. Die Vpn führten zu einer bestimmten Folge von Fingerbewegungen aus, und zum anderen stellten sie sich diese Tätigkeit vor. Formal gesehen waren diejenigen Hirnregionen, die bei der Vorstellung aktiviert waren, eine Teilmenge der bei der Ausführung besonders aktiven Regionen. Speziell war der primäre motorische Kortex, der eine sehr direkte Verbindung zu den Motoneuronen von Finger Muskeln besitzt, nur bei der Ausführung aktiv. Der supplementär-motorische Kortex dagegen zeigte bei Ausführung und Vorstellung eine erhöhte Aktivität. Eine der Funktionen, die dieser Hirnregion zugeschrieben werden, ist die Programmierung von Bewegungen (WIESENDANGER, 1986).

Den Gedanken, daß die Vorstellung einer Bewegung mit ihrer Programmierung einhergeht und auf diese Weise zur Verbesserung der motorischen Leistung beiträgt, kann man als Programmierungs-Hypothese bezeichnen (HEUER, 1985b). Dieser Gedanke mag ungewohnt sein, da wir Vorstellungen zumeist als eine Art von «blassen Wahrnehmungen» ansehen und damit als an sensorische Repräsentationen gebunden, aber nicht an motorische. Aber auch Wahrnehmungen aktiver Bewegungen können durch die motorischen Kommandos zustandekommen, ohne daß sensorische Information erforderlich ist.

Welche Belege gibt es dafür, daß die mit Bewegungsvorstellungen vermutlich einhergehende Programmierung zum Erfolg mentaler Übung beiträgt? Sie bestehen vor allem in der Tatsache, daß mentale Übung auch bei solchen Bewegungen erfolgreich sein kann, deren Verlauf in erster Linie durch die motorischen Kommandos bestimmt wird. Der Wurf z. B. ist eine sehr kurz dauernde Bewegung, bei der die Zeit für eine Anpassung motorischer Kommandos an eine sensorische Repräsentation während der Bewegung nicht ausreichen sollte. Dafür sprechen zum einen die Zeitverzögerungen, die bei der Verarbeitung von sensorischer Information für Korrekturen einer Bewegung zu beobachten sind. Zum anderen bemerken wir Fehlwürfeoftschon dann, wenn das geworfene

Objekt kaum die Hand verlassen hat. Offenbar wird der Vergleich der sensorischen Rückmeldungen mit einer sensorischen Repräsentation erst nach dem Ende der Bewegung beendet, wenn es für eine Korrektur zu spät ist.

Der klassische Versuchsplan von Experimenten zur mentalen Übung umfaßt drei Gruppen, die mental übende Versuchsgruppe sowie eine physisch und eine gar nicht übende Kontrollgruppe. MENDOZA und WICHMAN (1978) fanden bei der nicht übenden Gruppe vom Vortest zum Nachtest einen Leistungsfortschritt von 6% beim Pfeilwerfen und bei der physisch übenden Gruppe von 34%. Der Leistungsanstieg der mental übenden Gruppe, die sich unter anderem die Korrektur vorgestellter Fehlwürfe vorstellen sollte, lag mit 22% zwischen den beiden Kontrollgruppen. Ein solches Ergebnis stützt die Auffassung, daß zumindest bei einigen Bewegungen auch eine mit Bewegungsvorstellungen einhergehende Programmierung zu einer Leistungsverbesserung beitragen kann.

Es ist nicht ohne weiteres einsichtig, warum bei wiederholter Vorstellung und Programmierung der Bewegung beim Werfen die Genauigkeit des Treffens steigen sollte. Die erhöhte Genauigkeit setzt ja voraus, daß bei der wiederholten Programmierung eine Änderung der motorischen Repräsentation erfolgt, und zwar nicht eine beliebige, sondern eine gerichtete. Wodurch aber wird die Richtung der Änderung angegeben? Bei der Ausführung des Wurfes erfährt die Vp etwas über seine Genauigkeit, und der nachfolgende Wurf kann entsprechend modifiziert werden. Bei der Vorstellung des Wurfes aber gibt es keine solche Kenntnis des Resultats.

Das Experiment von MENDOZA und WICHMAN (1978) liefert einen Hinweis auf eine mögliche Antwort, die aber sehr spekulativ ist. In einer vierten Gruppe des Experiments führten die Vpn die Wurfbewegungen aus wie in der physisch übenden Gruppe, aber sie hielten keinen Pfeil in der Hand und bekamen somit keine Kenntnis des Resultats. Mit 24% entsprach der Leistungsanstieg in dieser Gruppe dem in der mental übenden Gruppe. Der größere Leistungsanstieg in der physisch übenden Gruppe (34%) dürfte auf die Kenntnis des Resultats zurückgehen. Der gleichartige Leistungsanstieg

bei Ausführung der Wurfbewegungen und bei mentaler Übung legt die Vermutung nahe, daß in beiden Fällen eine «interne Kenntnis des Resultats» wirksam sein könnte. Genauso, wie die Genauigkeit einer Wurfbewegung relativ genau auf der Grundlage sensorischer Rückmeldungen der Bewegung selbst festgestellt werden kann, kann möglicherweise auch die Genauigkeit einer nur programmierten Bewegung festgestellt werden.

### Literaturverzeichnis

- ABBS, J.H., GRACCO, V.L. & COLE, K.J. (1984). Control of multi-movement Coordination: Sensorimotor mechanisms in speech motor programming. *Journal of Motor Behavior*, 16, 195-232.
- ADAMS, J.A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-150.
- ADAMS, J.A. (1976). Issues for a closed-loop theory of motor learning. In G. E. Stelmach (Ed.), *Motor control: issues and trends* (pp.87-107). New York: Academic Press.
- ADAMS, J.A., GOPHER, D. & LINTERN, G. (1977). Effects of visual and proprioceptive feedback on motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 9, 11-22.
- ADAMS, J.A., MARSHALL, P.H. & GOETZ, E.T. (1972). Response feedback and short-term motor retention. *Journal of Experimental Psychology*, 92, 92-95.
- ANDERSON, J.R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89, 369-406.
- ANNETT, J. (1985). Motor learning: A review. In H. Heuer, U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Eds.), *Motor behavior: Programming, control, and acquisition* (pp. 189-212). Berlin: Springer.
- ARBIB, M.A. (1981). Perceptual structures and distributed motor control. In V.B. Brooks (Ed.), *Handbook of physiology* (Section 1: The nervous system. Vol. 2: Motor control, Teil 2 [pp. 1449-1480]). Bethesda, Maryland: American Physiological Society.
- BAARS, B. J. & MOTLEY, M.T. (1976). Spoonerisms as sequencer conflicts: Evidence from artificially elicited errors. *American Journal of Psychology*, 89, 467-484.
- BADDELEY, A.D., GRANT, S., WIGHT, E. & THOMSON, N. (1975). Imagery and visual working memory. In P.M.A. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), *Attention and performance V* (pp. 205-217). New York: Academic Press.
- BADDELEY, A.D. & LIEBERMAN, K. (1980). Spatial working memory. In R.S. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance VIII* (pp. 521-539). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- BALDISSERA, F., CAVALLARI, P. & CIVASCHI, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neuroscience Letters*, 34, 95-100.
- BEGGS, W.D.A., ANDREW, J.A., BAKER, M.L., DOVE, S.R., FAIRCLOUGH, I. & HOWARTH, C.I. (1972). The accuracy of non-visual aiming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24, 515-523.
- BIZZI, E., ACCORNERO, N., CHAPPLE, W. & HOGAN, N. (1982). Arm trajectory formation in monkeys. *Experimental Brain Research*, 46, 139-143.
- BRIDGEMAN, B., KIRCH, M. & SPERLING, A. (1981). Segregation of cognitive and motor aspects of visual function using induced motion. *Perception & Psychophysics*, 29, 336-342.
- BRUNIA, C.H.M., HAAGH, S.A.V.M. & SCHEIRS, J.G.M. (1985). Waiting to respond: electrophysiological measurements in man during preparation for a voluntary movement. In H. Heuer, U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Eds.), *Motor Behavior: Programming, control, and acquisition* (pp.35-78). Berlin: Springer.
- BUTTERWORTH, B. & WHITTAKER, S. (1980). Peggy Babcock's relatives. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 647-656). Amsterdam: North-Holland.
- CAMPION, J., LATTO, R. & SMITH, Y.M. (1983). Is blindsight an effect of scattered light, spared cortex, and near-threshold Vision? *The Behavioral and Brain Sciences*, 6, 423-486.
- CARLTON, L.G. (1981). Processing of visual feedback information for movement control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1019-1030.
- CARTER, M.C. & SHAPIRO, D.C. (1984). Control of sequential movements: Evidence for generalized motor programs. *Journal of Neurophysiology*, 52, 787-796.
- CHRISTINA, R. W. (1970). Minimum visual feedback processing time for amendment of an incorrect movement. *Perceptual and Motor Skills*, 31, 991-994.
- COHEN, L. (1971). Synchronous bimanual movements performed by homologous and nonhomologous muscles. *Perceptual and Motor Skills*, 32, 639-644.
- COOKE, J.D. (1980). The organization of simple, skilled movements. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 199-212). Amsterdam: North-Holland.
- CORDO, D.J. & NASHNER, L.M. (1982). Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. *Journal of Neurophysiology*, 47, 287-302.
- CRAIK, K. J. W. (1947). Theory of the human operator in control systems. I. The Operator as an engineering system. *British Journal of Psychology*, 38, 56-61.
- CROSSMAN, E.R.F.W. & GOODEVE, P.J. (1983). Feedback control of hand movement and Fitts'

- law. Paper presented at the meeting of the Experimental Psychology Society, Oxford, July 1963. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35A, 251-278.
- DENIER VAN DER GON, J. J. & THURING, J. P. (1965). The guidance of human writing movements. *Kybernetik*, 2, 145-148.
- DERWORT, A. (1938). Untersuchungen über den Zeitablauf figurierter Bewegungen beim Menschen. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*, 240, 661-675.
- DEWAR, R. (1971). Adaptation to displaced Vision: Variations in the shaping technique. *Perception & Psychophysics*, 9, 155-157.
- DUFOSSE, M., MACPHERSON, J.M., MASSION, J. & POLIT, A. (1983). Maintenance of equilibrium during movement. In A. Hein & M. Jeannerod (Eds.), *Spatially oriented behavior* (pp. 15-33). Heidelberg: Springer.
- EASTON, T.A. (1978). Coordinative structures - the basis of a motor program. In D.M. Landers & R. W. Christina (Eds.), *Psychology of motor behavior and sport - 1977* (pp.63-81). Champaign, Ill.: Human Kinetics Publishers.
- FELTZ, D.L. & LANDERS, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sport Psychology*, 5, 25-57.
- FITTS, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- FITTS, P.M. & SEEGER, C.M. (1953). S-R compatibility: Spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46, 199-210.
- FORSBERG, H., GRILLNER, S., ROSSIGNOL, S. & WALLEIN, P. (1976). Phasic control of reflexes during locomotion in vertebrates. In R. M. Herman, S. Grillner, P.S.G. Stein & D.G. Stuart (Eds.), *Neural control of locomotion* (pp.647-674). New York: Plenum Press.
- GENTNER, D.R. (1982). Evidence against a central control model of timing in typing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 793-810.
- GLENCROSS, D.J. (1973). Response complexity and the latency of different movement Patterns. *Journal of Motor Behavior*, 5, 95-104.
- GREENWALD, A.G. (1972). On doing two things at once: Time sharing as a function of ideomotor compatibility. *Journal of Experimental Psychology*, 94, 52-57.
- GRIFFITH, D. & JOHNSTON, W. (1973). An information processing analysis of visual imagery. *Journal of Experimental Psychology*, 100, 141-146.
- GUNDRY, J. (1975). The use of location and distance in reproducing different amplitudes of movement. *Journal of Motor Behavior*, 7, 91-100.
- GUNKEL, M. (1962). über relative Koordination bei willkürlichen menschlichen Gliederbewegungen. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*, 275, 472-477.
- HACKER, W. (1974). Anforderungen an Regulation und Zeitbedarf bei geführten Bewegungen: Zur Gültigkeit des Derwort-von Weizsäckerschen Gesetzes der konstanten Figurzeit. *Zeitschrift für Psychologie*, 182, 307-337.
- HAGMAN, J.D. & FRANCIS, E.W. (1975). The instructional variable and kinesthetic cue recall. *Journal of Motor Behavior*, 7, 141-146.
- HANCOCK, P.A. & NEWELL, K.M. (1985). The movement Speed-accuracy relationship in space-time. In H. Heuer, U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Eds.), *Motor behavior. Programming, control, and acquisition* (pp. 153-188). Berlin: Springer.
- HAY, J.C. (1974). Motor transformation learning. *Perception*, 3, 487-496.
- HEIN, A. (1980). The development of visually guided behavior. In C.S. Harris (Ed.), *Visual coding and adaptability* (pp. 51-67). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- HEIN, A. & DIAMOND, R.M. (1971). Contrasting development of visually triggered and guided movements in kittens with respect to interocular and interlimb equivalence. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 76, 219-224.
- HEIN, A. & HELD, R. (1962). A neural model for labile sensorimotor coordinations. In E. E. Bernard & M. R. Kare (Eds.), *Biological prototypes and synthetic systems I* (pp.71-74). New York: Plenum Press.
- HELLEBRANDT, F.A., HOUTZ, S. J., PARTRIDGE, M. J. & WALTERS, C.E. (1956). Tonic neck reflexes in exercises of stress in man. *American Journal of Physical Medicine*, 35, 144-159.
- HENRY, F.M. & ROGERS, D.E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a «memory-drum» theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, 31, 448-458.
- HEUER, H. (1981). Fast aiming movements with the left and right arm: Evidence for two-process theories of motor control. *Psychological Research*, 43, 81-96.
- HEUER, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart: Kohlhammer.
- HEUER, H. (1984a). Binary choice reaction time as a function of the relationship between durations and forms of responses. *Journal of Motor Behavior*, 16, 392-404.
- HEUER, H. (1984b). On re-scaleability of force and time in aiming movements. *Psychological Research*, 46, 73-86.
- HEUER, H. (1984c). Bewegungen mit der rechten und linken Hand: Interferenzen bei der Programmierung. *Psychologische Beiträge*, 26, 561-581.
- HEUER, H. (1985a). Some points of contact between models of central capacity and factor analytic models. *Acta Psychologica*, 60, 135-155.

- HEUER, H. (1985b). Wie wirkt mentaleübung? *Psychologische Rundschau*, 36, 191-200.
- HEUER, H. (1986a). Intermanual interactions during programming of aimed movements: Converging evidence on common and specific Parameters of control. *Psychological Research*, 48, 37-46.
- HEUER, H. (1986b). Intermanual interactions during programming of finger movements: Transient effects of «homologous coupling». In H. Heuer & C. Fromm (Eds.), *Generation and modulation of action patterns* (pp. 87-101). Berlin: Springer.
- HEUER, H. & WING, A. (1984). Doing two things at once: Process limitations and interactions. In M. Smyth & A. Wing (Eds.), *Psychology of human movement* (pp. 183-213). London: Academic Press.
- HOLLERBACH, J.M. & ATKESON, L.G. (1986). Characterization of joint-interpolated arm movements. In H. Heuer & C. Fromm (Eds.), *Generation and modulation of action patterns* (pp. 41-54). Berlin: Springer.
- HOPF, H.C., HANDWERKER, H. & HAUSMANN, J. (1967). Die rasche Willkürbewegung des Menschen. Untersuchungen zur Bedeutung der zentralen Programmierung. *Deutsche Zeitschrift für Nervenheilkunde*, 191, 196-209.
- HUGHES, O.M. & ABBS, J.H. (1976). Labial-mandibular Coordination in the production of speech: Implications for the Operation of motor equivalence. *Phonetica*, 33, 199-221.
- INGLE, D.J. (1982). Organization of visuomotor behaviors in vertebrates. In D. J. Ingle, M.A. Goodale & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 67-109). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- JACOBSON, E. (1932). Electrophysiology of mental activities. *American Journal of Psychology*, 44, 677-694.
- JAGACINSKI, R. J., REPPERGER, D. W., MORAN, M.S., WARD, S.L. & GLASS, B. (1980). Fitts' law and the microstructure of rapid discrete movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 309-320.
- JEANNEROD, M. (1981). Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX* (pp. 153-169). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- JEANNEROD, M. & BIGUER, B. (1982). Visuomotor mechanisms in reaching within extrapersonal space. In D.J. Ingle, M.A. Goodale & R.J.W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp.387-409). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- JOHNSON, P. (1982). The functional equivalence of imagery and movement. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 349-365.
- JONES, B. (1978). The role of efference in motor control: A centralist emphasis for theories of skilled performance. In D.M. Landers & R.W. Christina (Eds.), *Psychology of motor behavior and sport - 1977* (pp. 36-58). Champaign, Ill.: Human Kinetics Publishers.
- KAHNEMAN, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- KEELE, S.W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403.
- KEELE, S. W. (1981). Behavioral analysis of movement. In V.B. Brooks (Ed.), *Handbook of physiology* (Section 1: The nervous system. Vol. 2, Motor control) (pp. 1391-1414). Bethesda, Maryland: American Physiological Society.
- KEELE, S. W. & POSNER, M.I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 155-158.
- KELSO, J.A.S. (1977). Motor control mechanisms underlying human movement reproduction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 529-533.
- KELSO, J.A.S. (1981). Contrasting perspectives on order and regulation in movement. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and Performance IX* (pp. 437-457). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- KELSO, J.A.S. (Ed.) (1982). *Human motor behavior*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- KELSO, J.A.S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual Coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative, and Comparative*, 246, R1000-R1004.
- 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, N.J.: Erlbaum.
- KELSO, J.A.S., PUTNAM, C.A. & GOODMAN, D. (1983). On the space-time structure of human interlimb Co-ordination. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35A, 347-375.
- KELSO, J.A.S., SOUTHARD, D.L. & GOODMAN, D. (1979). On the Co-ordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5, 229-238.
- KELSO, J.A.S. & WALLACE, S.A. (1978). Conscious mechanisms in movement. In G.E. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning* (pp. 79-116). New York: Academic Press.
- KLAPP, S.T. (1977). Response programming, as assessed by reaction time, does not establish commands for particular muscles. *Journal of Motor Behavior*, 9, 301-312.
- KLAPP, S.T. (1979). Doing two things at once: The role of temporal compatibility. *Learning and Cognition*, 7, 375-381.
- KLAPP, S.T. (1981). Temporal compatibility in dual motor tasks II: Simultaneous articulation and hand movements. *Memory and Cognition*, 9, 398-401.

- KLAPP, S.T. & ERWIN, C.I. (1976). Relation between programming time and duration of the response being programmed. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2, 591-598.
- LAABS, G.J. (1974). The effect of interpolated motor activity on the short-term retention of movement distance and end-location. *Journal of Motor Behavior*, 6, 279-288.
- LANGOLF, D.G., CHAFFIN, D.B. & FOULKE, J.A. (1976). An investigation of Fitts' law using a wide range of movement amplitudes. *Journal of Motor Behavior*, 8, 113-128.
- LASHLEY, K.S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *American Journal of Physiology*, 43, 169-194.
- LASHLEY, K.S. (1951). The problem of serial order in behavior. In L.A. Jeffres (Ed.), *Cerebral mechanisms in behavior* (pp. 112-146). New York: Wiley.
- LEE, D.N. & YOUNG, D.S. (1986). Gearing action to the environment. In H. Heuer & C. Fromm (Eds.), *Generation and modulation of action patterns* (pp. 217-230). Berlin: Springer.
- LEE, D.N., YOUNG, D.S., REDDISH, P.E., LOUGH, S. & CLAYTON, T.M.H. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35A, 333-346.
- LEGGE, D. (1965). Analysis of visual and proprioceptive components of motor skills by means of a drug. *British Journal of Psychology*, 56, 243-254.
- LEONARD, J.A. (1959). Tactual choice reactions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11, 76-84.
- LINDBLOM, B. (1983). Economy of speech gestures. In P.F. MacNeilage (Ed.), *The production of speech* (pp. 217-245). New York: Springer.
- MACKAY, D.G. (1982). The problem of flexibility, fluency, and speed-accuracy trade-off in skilled behavior. *Psychological Review*, 89, 483-506.
- MACKAY, D.G. & SODERBERG, G.A. (1971). Homologous intrusions: An analogue of linguistic blends. *Perceptual and Motor Skills*, 32, 645-646.
- MACNEILAGE, P. F., HUTCHINSON, J.A. & LASATER, S.A. (1981). The production of speech: Development and dissolution of motoric and premotoric processes. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX* (pp. 503-519). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- MARTENIUK, R.G. & MACKENZIE, C.L. (1980a). Information processing in movement organization and execution. In R.S. Nickerson (Ed.), *Attention and performance VIII* (pp. 29-57). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- MARTENIUK, R.G. & MACKENZIE, C.L. (1980b). A preliminary theory of two-hand co-ordinated control. In G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 185-197). Amsterdam: North-Holland.
- MEGAW, E.D. (1972). Directional errors and their correction in a discrete tracking task. *Ergonomics*, 15, 633-643.
- MENDOZA, D. & WICHMAN, H. (1978). Inner darts: Effects of mental practice on Performance of dart throwing. *Perceptual and Motor Skills*, 47, 1195-1199.
- MERTON, P.A. (1953). Speculations on the servo control of movement. In G.E. W. Wolstenholme (Ed.), *The spinal cord* (pp. 247-255). Boston: Little Brown.
- NASHNER, L.M. & WOOLLACOTT, M. (1979). The organization of rapid postural adjustments of standing humans: An experimental-conceptual model. In R.E. Talbot & D.R. Humphrey (Eds.), *Posture and movement* (pp. 243-257). New York: Raven Press.
- NEWELL, K.M., SHAPIRO, D.C. & CARLTON, M. J. (1979). Coordinating visual and kinesthetic memory codes. *British Journal of Psychology*, 70, 87-96.
- NICHOLS, T.R. & HOUK, J.C. (1976). The improvement in linearity and the regulation of stiffness that results from the actions of the stretch reflex. *Journal of Neurophysiology*, 39, 119-142.
- OSTRY, D.J. (1980). Execution-time movement control. In G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 457-468). Amsterdam: North-Holland.
- PAILLARD, J. (1982). The contribution of peripheral and central vision to visually guided reaching. In D.J. Ingle, M.A. Goodale & R. J.W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 367-385). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- PERENIN, M.T. & JEANNEROD, M. (1978). Visual function within the hemianopic field following early cerebral hemidecortication in man. - I. Spatial localization. *Neuropsychologia*, 16, 1-13.
- PETERS, M. (1977). Simultaneous performance of two motor activities: The factor of timing. *Neuropsychologia*, 15, 461-465.
- PETERS, M. (1981). Attentional asymmetries during concurrent bimanual performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 33A, 95-103.
- PEW, R. W. (1966). Acquisition of hierarchical control over the temporal organization of skill. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 764-771.
- PEW, R. W. (1974). Human perceptual motor performance. In B.H. Kantowitz (Ed.), *Human information processing: Tutorials in performance and cognition* (pp. 1-39). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- PEW, R.W. (1984). A distributed processing view of human motor control. In W. Prinz & A. F. Sanders (Eds.), *Cognition and motor processes* (pp. 19-27). Berlin: Springer.
- POLIT, A. & BIZZI, E. (1979). Characteristics of motor programs underlying arm movements in

- monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 42, 183-194.
- POTTER, J.M. (1980). What was the matter with Dr. Spooner? In V.A. Fromkin (Ed.), *Errors in linguistic performance: Slips of the tongue, ear, pen, and hand* (pp. 13-34). New York: Academic Press.
- POULTON, E.C. (1957a). On the stimulus and response in pursuit tracking. *Journal of Experimental Psychology*, 53, 189-194.
- POULTON, E.C. (1957b). On prediction in skilled movements. *Psychological Bulletin*, 54, 467-478.
- POULTON, E.C. (1966). Tracking behavior. In E.A. Bilodeau (Ed.), *Acquisition of skill* (pp. 361-410). New York: Academic Press.
- POVEL, D.J. & COLLARD, R.F.A. (1982). Structural factors in patterned finger tapping. *Acta Psychologica*, 52, 107-123.
- PREILOWSKI, B. (1975). Bilateral motor interaction: Perceptual-motor performance of partial and complete «split-brain» patients. In K. J. Zülch, O. Creutzfeldt & G.G. Galbraith (Eds.), *Cerebral localization* (pp. 115-132). Berlin: Springer.
- RACK, P.M.H. & WESTBURY, D.R. (1969). The effects of length and stimulus rate on tension in the isometric cat soleus muscle. *Journal of Physiology*, 204, 443-460.
- REQUIN, J. (1980). Toward a psychobiology of preparation for action. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 373-398). Amsterdam: North-Holland.
- ROLAND, P.E., LARSEN, B., LASSEN, N. A. & SKINHOJ, E. (1980). Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *Journal of Neurophysiology*, 43, 118-136.
- ROSENBAUM, D.A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 444-474.
- ROSENBAUM, D. A. (1983). The movement precuing technique: Assumptions, applications, and extensions. In R. A. Magill (Ed.), *Memory and control of action* (pp. 231-274). Amsterdam: North-Holland.
- ROSENBAUM, D. A. (1985). Motor programming: A review and scheduling theory. In H. Heuer, U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Eds.), *Motor behavior: Programming, control, and acquisition* (pp. 1-33). Berlin: Springer.
- ROSENBAUM, D.A., KENNY, S.B. & DERR, M.A. (1983). Hierarchical control of rapid movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 86-102.
- SCHAPPE, R.H. (1965). Motion element synthesis - an assessment. *Perceptual and Motor Skills*, 20, 103-106.
- SCHMIDT, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- SCHMIDT, R. A. (1980). On the theoretical status of time in motor program representation. In G.E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 145-166). Amsterdam: North-Holland.
- SCHMIDT, R.A. (1982). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Champaign, Ill.: Human Kinetics Publishers.
- SCHMIDT, R.A. & MCGOWN, C. (1980). Terminal accuracy of unexpectedly loaded rapid movements: Evidence for a mass-spring mechanism in programming. *Journal of Motor Behavior*, 12, 145-161.
- SCHMIDT, R.A., ZELAZNIK, H.N., HAWKINS, B., FRANK, J.S. & QUINN, J.T. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86, 415-451.
- SHAFFER, L. H. (1976). Intention and performance. *Psychological Review*, 83, 375-393.
- SHAPIRO, D.C. & SCHMIDT, R.A. (1982). The schema theory: Recent evidence and developmental implications. In J. A.S. Kelso & J.E. Clark (Eds.), *The development of movement control and Co-ordination* (pp. 113-150). New York: Wiley.
- SHAPIRO, D.C., ZERNICKE, R.F., GREGOR, R. J. & DIESTEL, J.D. (1981). Evidence for generalized motor programs using gait pattern analysis. *Journal of Motor Behavior*, 13, 33-47.
- SMYTH, M. & WING, A. (Eds.). (1984). *Psychology of human movement*. London: Academic Press.
- SOECHTING, J.F. & LACQUANITI, F. (1981). Invariant characteristics of a pointing movement in man. *Journal of Neuroscience*, 1, 710-720.
- SOECHTING, J.F. & LACQUANITI, F. (1983). Modification of trajectory of a pointing movement in response to a change in target location. *Journal of Neurophysiology*, 49, 548-564.
- STEMMACH, G.E. (Ed.). (1976). *Motor control: Issues and trends*. New York: Academic Press.
- STEMMACH, G.E. (Ed.). (1978). *Information processing in motor control and learning*. New York: Academic Press.
- STEMMACH, G.E. & REQUIN, J. (Eds.). (1980). *Tutorials in motor behavior*. Amsterdam: North-Holland.
- STERNBERG, S., MONSELL, S., KNOLL, R.L. & WRIGHT, C.E. (1978). The latency and duration of rapid movement sequences: Comparisons of speech and typewriting. In G.E. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning* (pp. 118-152). New York: Academic press.
- STIMPEL, E. (1933). Der Wurf. *Neue Psychologische Studien*, 9, 105-138.
- STROOP, J.R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- TAUB, E., GOLDBERG, I.A. & TAUB, P. (1975). De-

- afferentation in monkeys: Pointing at a target without visual feedback. *Experimental Neurology*, 46, 178-186.
- TERZUOLO, C.A. & VIVIANI, P. (1980). Determinants and characteristics of patterns used for typing. *Neuroscience*, 5, 1085-1103.
- TREVARTHEN, C.B. (1968). Two mechanisms of vision in Primates. *Psychologische Forschung*, 31, 299-337.
- VALLBO, A.B. (1971). Muscle spindle response at the onset of isometric voluntary contractions in man: Time difference between fusimotor and skeletomotor effects. *Journal of Physiology*, 218, 405-431.
- VIVIANI, P. (1986). DO units of motor action really exist? In H. Heuer & C. Fromm (Eds.), *Generation and modulation of action patterns* (pp. 201-216). Berlin: Springer.
- VON HOFSTEN, C. (1987). Catching. In H. Heuer & A.F. Sanders (Eds.), *Perspectives on perception and action* (pp. 33-46). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- VON HOLST, E. (1939). Die relative Koordination als Phänomen und als Methode zentralnervöser Funktionsanalyse. *Ergebnisse der Physiologie*, 42, 228-306.
- WIESENDANGER, M. (1986). The initiation of voluntary movements and the supplementary motor area. In H. Heuer & C. Fromm (Eds.), *Generation and modulation of action patterns* (pp. 3-13). Berlin: Springer.
- WING, A. & MILLER, E. (1984). Research note: Peak velocity timing invariance. *Psychological Research*, 16, 121-127.
- WING, A. & FRASER, C. (1983). The contribution of the thumb to reaching movements. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35A, 297-309.
- WOODWORTH, R.S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review Monogr. Suppl.*, whole no. 13.
- YAMANISHI, J., KAWATO, M. & SUZUKI, R. (1980). Two coupled oscillators as a model of the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, 37, 219-225.