

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Zürich

## Cerebrale Organisation somatomotorischer Leistungen

### I. Physikalische Vorbemerkungen und Analyse konkreter Beispiele

Von

**W. R. HESS**

Mit 5 Textabbildungen

(Eingegangen am 12. März 1965)

Ein wacher Mensch, der keinen Anlaß hat, von sich aus Bewegungen auszuführen, nimmt eine bestimmte Haltung ein. Diese Haltung entspricht einer Ausgangsstellung für aktive Bewegungen und einer Handlungsbereitschaft, die in der Regel zielgerichtet ist. Wie sich Mensch und Tier unter konkreten Bedingungen verhalten mögen, immer werden Haltung und Bewegung von physikalischen Gesetzen beherrscht, welche für die zentrale Koordination der verfügbaren Muskelkräfte maßgeblich sind. Das Zusammenspiel der Muskelkräfte ist als Manifestation eines innervatorischen Dispositives aufzufassen. Entsprechend führt die Analyse von Bewegungsabläufen zu Einblicken in die Organisation der motorischen Innervation. In dem Maße, als dies gelingt, werden die Voraussetzungen erfüllt, auch pathologische Störungen der Motorik kausal zu begreifen.

Wenn ein Körper innerhalb des Schwerefeldes ruht, so kann dies bedeuten, daß er ohne andere äußere Kräfte im Schwerpunkt unterstützt ist. Eine solche Körperruhe ist ein *statisch* zu begreifender Zustand. In der Biomotorik ist indessen ein solcher, abgesehen vom tiefen Schlaf, sehr selten. Denn im Wachzustand werden automatisch bestimmte Muskelgruppen unter Spannung gehalten. Die angeregte Aufmerksamkeit findet in einer gerichteten Tonisierung ihren innervatorischen Ausdruck. Diese Tonisierung ist gleichbedeutend mit aktiver Stabilisierung und der *Bereitschaft* zum Handeln. Äußerlich betrachtet kann sich das Individuum gleichwohl ruhig verhalten und in einer der gerichteten Aufmerksamkeit entsprechenden Stellung verharren. Bei Abtasten der Muskeln oder bei elektromyographischer Kontrolle erkennt man, daß und welche Muskeln mehr oder weniger unter Spannung, also aktiviert sind. Wenn trotzdem keine Bewegung in Erscheinung tritt, so beruht dies darauf, daß sich entgegengerichtete Kräfte aufheben. Unter solchen Umständen handelt es sich um ein *dynamisches Gleichgewicht*. Dieses ist auch dadurch gekennzeichnet, daß eine innervatorische *Hemmung*

Anlaß zu einer *Bewegung* gibt, nämlich infolge des Übergewichtes der antagonistischen Muskeln (Abb. 1). Dieser Mechanismus kann unter Umständen unter pathologischen Verhältnissen Bedeutung erlangen, z. B. als Ursache von Tremor, athetotischen Bewegungen, Chorea usw. Ein geübliches dynamisch zu konzipierendes Beispiel ist die Haltung des aufrecht stehenden Menschen. Wohl wird die Hauptlast der sich aufeinander stützenden Körperteile statisch getragen. Da aber weder der Kopf für sich noch Kopf mit Rumpf, auch nicht der ganze Körper über den Hüft- und Fußgelenken in den Schwerpunkten unterstützt sind, muß die Stellung durch die Anspannung bestimmter Muskeln gesichert sein. Solche Verhältnisse erscheinen zwar im Widerspruch zum Prinzip der

Kräfteökonomie. In der Tat wird man bei langem Stehen müde und man muß sich zur Entspannung setzen oder niederlegen. Trotz allem ist der Einsatz von Muskelspannungen, welche die Haltung sichern, physiologisch sinnvoll, indem der aufrechtgehaltene Körper bei zufällig einwirkenden exogenen Kräften nicht kippt oder bei unwillkürlicher Tonusminderung nicht zusammensinkt. Die in der Tonisierung der Muskeln zum Ausdruck kommende Stabilität und Aktionsbereitschaft bezieht sich sowohl auf automatischen Einsatz kompensatorischer Kräfte, als auch auf

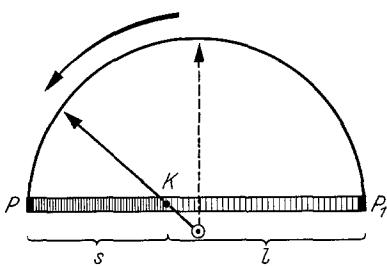


Abb. 1. *Entspannung als Ursache einer Bewegung.* — Zwischen  $P$  und  $K$  und zwischen  $K$  und  $P_1$  sind contractile Bänder eingespannt. Bei  $K$  inseriert ein Zeiger. Wenn sich das tonisierte Band  $l$  entspannt, verschiebt sich der Kontaktpunkt  $K$ , während sich das vorgespannte Band  $s$  zusammen zieht. Der ausgezogene Zeiger bewegt sich nach links. Bei Spannungsgleichgewicht von  $s$  und  $l$  ist er entsprechend dem gestrichelten Pfeil auf die Mittellage stabilisiert (Original)

Anregung willkürlicher gezielter Leistungen. Einen klaren Einblick in die Koordination dieser Spannkräfte vermittelt folgendes Experiment der Abb. 2: *Sprung von der Schulter einer stehenden Person*. In Ruhestellung macht das Paar den Eindruck einer statisch motivierten Einheit. Ist man selbst am Versuch beteiligt, so wird einem klar, daß zur Sicherung der aufrechten Stellung eine ständige Aufmerksamkeit mit fortgesetzter Beteiligung balanzierender Kräfte erforderlich ist. Will man von der eingenommenen Position ausgehend die Bedingungen in konkreter Weise kennen lernen, an welche eine gezielte Bewegung geknüpft ist, so gibt man dem Obermann, ohne daß es dem Untermann zur Kenntnis kommt, das Zeichen zu einem Sprung nach vorn auf ein in einiger Entfernung vor ihm auf den Boden gelegtes Zielobjekt hin. Bei diesem unvorbereiteten Versuch, der Aufforderung nachzukommen, wird der Sprung zu kurz und der Mann fällt vornüber. Die Ursache dieser Fehlleistung wird durch die Wirkung des Sprunges auf den Untermann demonstriert, indem

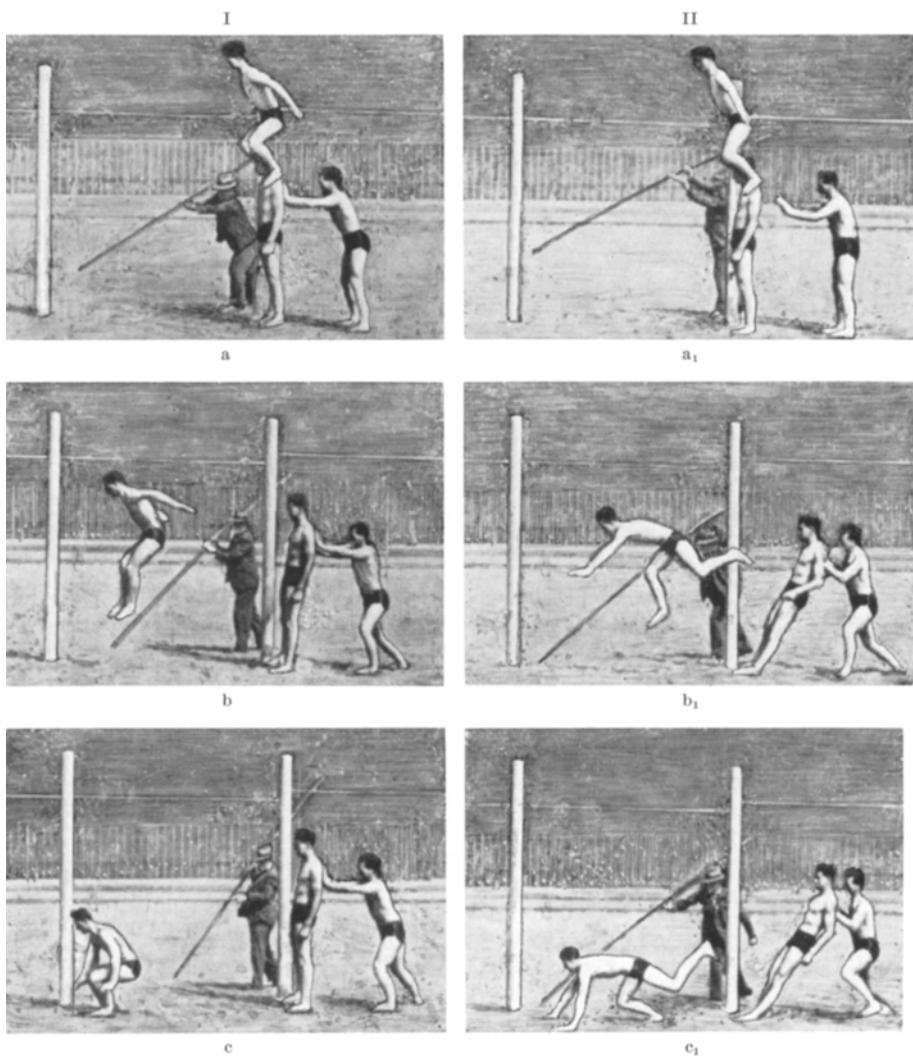
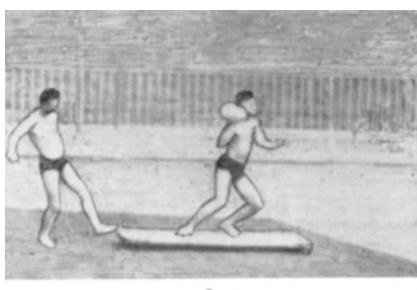
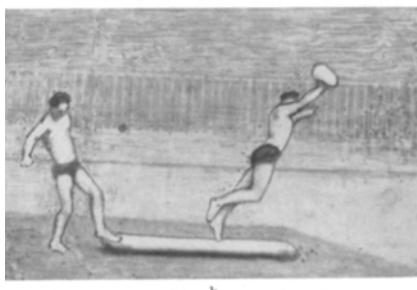


Abb. 2. Zielgerichtete Aktion und dynamischer Unterbau. Sprung von der Schulter; I gelungen mit dynamischer Stützaktion; II Mißerfolg ohne dynamischen Unterbau bei fehlender Vorauskenntnis der stützenden Partner. (Originale aus Zeitlupenfilm, W.R.H. Physiol. Inst., Zürich; zuerst 1943 kurz beschrieben<sup>5</sup>). Ia—c. Vorbereiter Sprung. Der Untermann ist über den bevorstehenden Sprung des Obermannes orientiert. Auf das Zeichen zum Sprung stemmt sich jener nach vorn und fängt so den Rückstoß auf. Jetzt erreicht der Obermann das vorgegebene Ziel. Teleokinetische und ereismatische Innervation sind koordiniert. IIa<sub>1</sub>—c<sub>1</sub>. Gezielter Sprungversuch ohne dynamischen Unterbau. Der Untermann ist von dem bevorstehenden Sprung des Obermannes nicht unterrichtet. Durch den an seinen Achseln angreifenden Rückstoß fällt er rückwärts und der Obermann verfehlt das gesteckte Ziel. Analyse der mechanischen Impulse bei zielgerichteter motorischer Leistung. Von links nach rechts zu lesen; linke Reihe: Rückstoß wird aufgefangen = kompensiert. Beachte Stemmstellung des Hintermannes bei b und c verglichen mit a. Die Haltung des Springers bei b und c ist zielgerecht. Der Stab im Bild a zeigt auf das Ziel. Rechte Reihe: Beachte bei a<sub>1</sub>, der Hintermann fängt den Rückstoß nicht auf und verhindert in b<sub>1</sub> und c<sub>1</sub> nur den Sturz auf dem platten Rücken. Der Obermann fällt vorwärts und erreicht das Ziel nicht, d. h. springt zu kurz. Vergleiche auch „Springer“ in Bild b bzw. b<sub>1</sub>, d. h. im Sprung zielgerecht bzw. vornüberfallend und sekundär die Arme schützend vorgestreckt

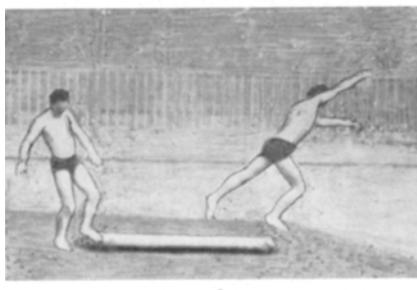
dieser nach rückwärts fällt. Es ist dies die Folge davon, daß dem Vorstoß des auf den Achseln des Untermannes stehenden Obermannes



a



b



c

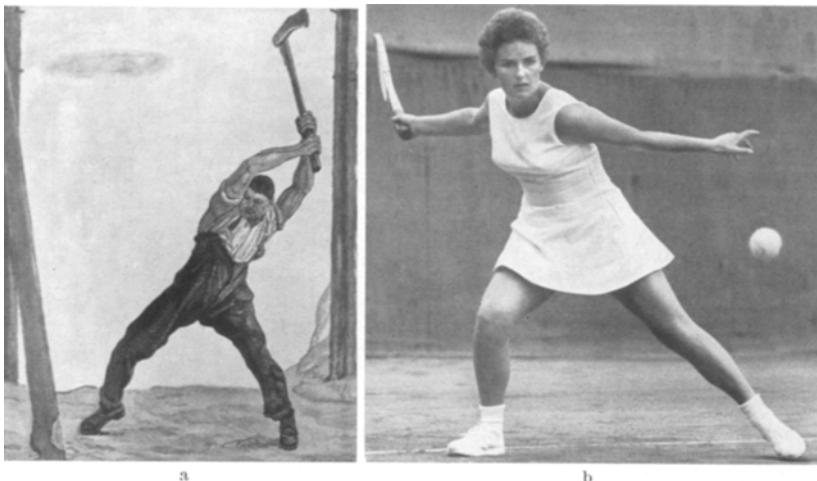
ein quantitativ gleich bemessener Rückstoß entspricht. — Anders als eben beschrieben ist der Ausgang des Experimentes, wenn man vor dem Signal zum Absprung den Untermann informiert. In diesem Fall stemmt er sich auf das verabredete Zeichen dem zu erwartenden Rückstoß antizipierend entgegen und koordiniert dadurch seine eigenen Kräfte denjenigen des Obermannes. Dabei wird das vorgegebene Ziel richtig erreicht (Abb. 2\*).

Analog verhält es sich, wenn ein Mensch einen *gezielten Wurf* ausführt. Auch hierbei machen sich Reaktionskräfte geltend, welche den Oberkörper rückwärts drängen. Ein Umkippen wird dadurch vermieden, daß sich die Wirbelsäule in einer zum Abfangen des Rückstoßes geeigneten Haltung versteift. Gleichzeitig spannen sich Muskeln der Unterextremitäten an und übertragen die Kraftlinien, welche das Becken, die Hüft- und Fußgelenke durchlaufen,

Abb. 3. Beim Vorstoß der tragen Masse des Steines werden die abstützenden Kräfte über Schulter, Rückgrat, Hüftgelenke und Beine auf die Unterlage übertragen. Die Wirkung ist eine Retropulsion. Kurz nach Beginn der Aktion wird die Reaktionskraft von einer Hilfsperson abgefangen, so daß das Projekttil doch annähernd das Ziel erreicht. (Original aus Zeiltupenfilm, W. R. H. Physiol. Inst., Zürich.) a—c. *Wurf eines Projektils nach vorn / von oben nach unten*. a Es wird die Muskulatur des rechten Armes und der Beine (bei gesteifter Wirbelsäule) zum Vorstoßen angespannt; b Wirkung: rechter Arm und die Beine werden auf Fernziel gerichtet gestreckt. Ausdruck zielgerichteter synerger Koordination fast der ganzen Körpermuskulatur; c Der ganze Körper wird nach vorn geworfen, synerg mit Arm, das Gewicht von der Armmuskulatur zusätzlich beschleunigt = geschleudert. Die *Stemmkräfte* werden zu Förderkräften verstärkt im Sinne zielgerichteter Mitinnervation bzw. selektiver Komposition zu einem *Kräfte system*. Beachte Ausweichen des auf Rollen liegenden Brettes. Auf dieses wird der Rückstoß übertragen. Das linke Bein des Untermannes kompensiert zuschends die Retropulsion, welche via Arm, Wirbelsäule und Beine auf die Tragfläche übertragen wird

\* Eine schematisierte Darstellung der hier reproduzierten Originalbilder ist von R. JUNG in anderem Zusammenhang besprochen worden<sup>9</sup>.

auf die Standfläche. Ist diese nicht eine feste Unterlage, so wird der Rückstoß in der Weise sichtbar, daß z.B. ein auf Rollen liegendes Brett nach hinten ausweicht (Abb. 3). Was der Beobachter bei fester Standfläche und entsprechend richtig gehender somatomotorischer Leistung sieht, ist nur der Ablauf der gezielten Bewegung und deren



a

b

Abb. 4 a—c. *Typische Bilder motorischer Leistungen.* a *Somatomotorische Leistung bei feststehendem Ziel.* — Im Bild des Holzfällers (HODLER) gelangt die zielgerichtete Kräftekomposition in den muskulösen Armen zum Ausdruck. Der dynamische Unterbau wird durch Anspannung der Hüft-, Bein- und Fußmuskulatur repräsentiert. — Der Wirbelsäule kommen zur Hauptsache elastisch-statische Funktionen zu. — Rücken und Teile der Bauchmuskulatur sind an der aktiven Anpassung an die sich im Ablauf der Handlung ändernden Stellungen beteiligt. Beachte ferner den visuellen Kontakt mit dem vorgegebenen Ziel. b *Somatomotorische Leistung bei bewegtem Ziel.* — Zielgerichtete Aufmerksamkeit. Die Fluglinie des Balles steuert die motorische Innervation des rechten Armes und des Oberkörpers. Dabei ist das Ziel als gedankliche Vorstellung extrapoliert. — Der dynamische Unterbau ist mit der zielgerichteten Kräftekomposition verzahnt (Wirbelsäule und rechtes Bein) als Stützen. Linker Arm und linkes Bein wirken als Hilfen zur Stabilisierung des ganzen Körpers relativ zur Vertikalen; während der rechte Arm sich im Verlauf des gezielten Schlages von der Seite nach vorn bewegt, verschiebt sich die Schwerkraftwirkung auf andere Muskeln der Achsel. Die Treffsicherheit des Schlages beweist die automatische Anpassung des sich wandelnden inner-votorischen Dispositives an die veränderten Belastungsverhältnisse. (Legende zu Foto V. NEUWEILER, HC Winterthur.) c *Weitgehend automatisierte somatomotorische Leistungen.* — In der Simultan- und Successiv-Koordination und den fortgesetzten Bewegungen von zwei Fingern jeder Hand manifestiert sich eine fortlaufende Wandlung des Innervationsmusters. Die Führung erfolgt durch visuelle und taktile Kontrolle. Die einzelnen Bewegungsphasen sind als Folge eines Lernprozesses automatisiert: Knoten in Schnur. (Original aus Zeitlupefilm W. R. H. Physiol. Inst., Zürich)



c

Erfolg. Die Funktion der stabilisierenden Muskelgruppen kann durch Kontrolle der tonischen Spannungen mit Abfühlen der gespannten Muskeln oder Registrierung deren Aktionsströme festgestellt werden.

Das so erweiterte Bild wird vervollständigt, wenn man die äußeren *Widerstände*, die *Trägheit* der bewegten Massen und die *Schwerewirkung* berücksichtigt, die im Fluß einer Bewegung von Situation zu Situation auf die bewegten Körperteile einen ausgleichenden Einfluß ausüben (Abb. 4). So ist z. B. die Schultermuskulatur bei angezogenem, seitwärts ausgestrecktem Arm (Abb. 4a und b) anders belastet, als bei Haltung nach vorn, wenn der Arm gegen Ende des Schlages gestreckt wird. Die Treffsicherheit des gut geübten Spielers beweist, daß die sich ändernden Belastungsverhältnisse in das entsprechende Innervationsmuster quantitativ mit einbezogen werden. Was speziell das regulierte Spiel der Muskelkräfte betrifft, muß im ganzen Zusammenhang noch auf die experimentell dokumentierten Untersuchungen von R. WAGNER hingewiesen werden<sup>10</sup>.

Faßt man die genannten automatisch mobilisierten Kräfte zusammen, so bilden sie den *dynamischen Unterbau* der Kräftekomposition, die den Bewegungsablauf dem Ziel zuführt<sup>5</sup>. Die Auslösung und Formulierung erfolgt zum Teil reflektorisch. Bei eingebüßten Fertigkeitsbewegungen vollzieht sich die Aktivierung der Muskelkräfte, welche zum dynamischen Unterbau integriert werden, weitgehend zentral, d. h. im Sinne angelerner Automatismen, welche an das gewollt aktivierte Innervationsmuster gekettet sind. — Nach dieser Darstellung allgemein gültiger physikalischer Gesetzmäßigkeiten soll jetzt die Analyse einiger konkreter Beispiele somatomotorischer Leistungen besprochen werden. Dabei wird uns der Schlüssel in die Hand gegeben, auch pathologisch deformierte Somatomotorik kausal zu interpretieren.

### Dynamische Aspekte somatomotorischer Leistungen

Zunächst sei die Funktionsweise des *Augenmuskelapparates* besprochen, die sich durch besondere Klarheit auszeichnet: Drei Augenmuselpaare beherrschen alle drei Ebenen des Raumes und zwar je in zwei entgegengesetzten Richtungen. Dabei ist die Leistung außerordentlich exakt und die Wirkung steht auch unter Kontrolle des Bewußtseins. — Eine erste Aussage betrifft die Fixierung der Augäpfel in Primärstellung, d. h. bei Blick geradeaus. Wohl hat man bei oberflächlichem Zusehen den Eindruck, daß diese Stellung statisch bedingt sei. Doch zeigen Lähmungserscheinungen und operative Eingriffe an Sehnen der Augenmuskeln, daß ein Gleichgewicht zwischen Spannkräften von Muskeln verschiedener Zugrichtungen vorliegt. Tatsächlich sind im Wachzustand alle 6 Muskeln jedes Auges zu einem innervatorisch integrierten System verbunden, so daß stets alle Glieder zusammenspielen. Dabei ändert die Aktion jedes Einzelmuskels die Wirkungsweise eines jeden andern. Denn sobald sich die Stellung des Augapfels in irgend einer Richtung verschiebt, kommt es zu einer Verlagerung der Ansatzstellen aller am Bulbus ansetzenden

Muskelsehnen. Infolgedessen wird auch ihre Zugrichtung — also die Wirkung innerhalb des Systems — abgelenkt (Abb. 5a und b). Eine indirekte Folge davon macht sich im Verlauf einer Augenbewegung geltend. Indem sich die Zugrichtung und der Wirkungsgrad von Stellung zu Stellung verschieben, ist die gezielte Bewegung an eine fortgesetzte Anpassung der innervatorischen Organisation gebunden. Von diesen zwangsläufigen Änderungen der von den Augenmuskelkernen ausgehenden Impulse ist selbst die Innervation geradliniger Augenbewegung nicht

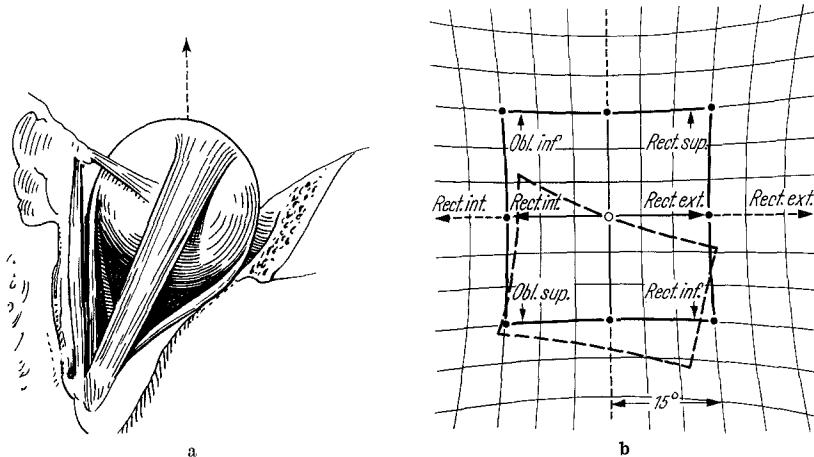


Abb. 5 a und b. *Augenmuskelmotorik und ihre gestörte Koordination.* a *Muskeln des rechten Auges von oben.* (Der Pfeil bedeutet Visierlinie in Primärstellung.) — Die Zugrichtung des M. rect. superior heißt Blickbewegung aufwärts. — Bei adduziertem Auge ist der Sehnenansatz am Bulbus nasalwärts verlagert; die Hebekomponente ist entsprechend vermindert. Dafür machen sich eine Adduktions- mit Rotationskomponente geltend. — Zusammengefaßt: Jede Änderung der Augenstellung im Ablauf einer Blickbewegung bewirkt Verschiebung der Zugrichtung und Änderung des Wirkungsgrades aller Augenmuskeln. Das zugehörige nervöse Impulsmuster wandelt seine Struktur im Lauf der Bewegung. Abbildung aus SPALTEHOLZ, Handatlas der Anatomie (vereinfacht nachgezeichnet). b *Fehlstellung infolge Lähmung des Musc. rect. superior am rechten Auge.* Das ausgezogene sphärische Quadrat umschreibt die systematisch geordneten Projektionsstellen der Visierrichtungen bis maximal 15° Ablenkungen bei normaler Funktion des Augenmuskelapparates. — Die gestrichelten Linien umschreiben Augenstellungen bei Ausfall des Musc. rect. superior rechts. — Infolge der Lähmung ist das Feld, welches die möglichen Augenstellungen umschreibt, nach unten verschoben, und zwar temporal mehr als nasal. In dieser Weise kommt die Verschiebung der Gleichgewichtslage des Auges zum Ausdruck. — Die Zugkraft des paretischen Muskels ist im linken (nasalen) Blickfeld wesentlich geringer als im rechten (temporalen) Teil. Derart wird die Reduktion der Hebewirkung bei Adduktionsstellung demonstriert. — Zusammenfassend: die Beteiligung der einzelnen Muskeln ändert sich bei jeder Art von Augenbewegungen von Position zu Position; entsprechend erfährt das vom System der Augenmuskelkerne ausgegebene Innulationsmuster eine kontinuierliche Umgestaltung (nach HESS<sup>1,2,8</sup>)

ausgenommen. Derart vermittelt die dynamisch konzipierte Struktur somatomotorischer Leistungen bindende Rückschlüsse auf das ihr zugrunde liegende nervöse Impulsmuster. Beobachtungen am Auge und Modellversuche bestätigen, daß nicht nur eine Zunahme, sondern auch eine Abnahme der Spannung einzelner Muskeln eine Augenbewegung zur Folge haben. Eine Bewegung durch Spannungsabnahme ist dadurch

bedingt, daß die Muskeln, deren Tonus von der Entspannung nicht betroffen werden, das Übergewicht erhalten. Je nach der allgemeinen Tonuslage wirkt sich dasselbe mit größerem oder geringerem Akzent aus (siehe auch S. 34).

Von der dreidimensionalen Bewegungsfreiheit der Oculomotorik ausgehend ist es einfach, jene Bedingungen abzuleiten, bei welchen die Bewegungen durch typisierte Gelenkformationen eingeschränkt werden, so daß sie in vorgezeichneten Bahnen ablaufen. Ein nächstliegendes Beispiel betrifft Haltung und Bewegung des Kopfes, wie sie in proportioniertem Ausmaß den Blickbewegungen der Augen koordiniert sind. Auch die aufrechte Kopfhaltung macht zunächst den Eindruck, als ob sie statisch bedingt sei. Eine nähere Untersuchung belehrt uns hingegen, daß der Kopf exzentrisch, nämlich etwas zu weit nach hinten unterstützt ist, so daß er die Neigung hat, vornüber zu fallen. Man sieht dies, wenn jemand im Sitzen einschläft. Im Wachzustand wird die beschriebene Schwerkraftwirkung durch tonische Innervation der Nackenmuskulatur kompensiert. Abgesehen von den Bewegungen des Kopfes in der Sagittalebene gewähren die Halswirbelgelenke eine begrenzte Bewegungsfreiheit in der Horizontalebene, d. h. bei Wendebewegungen nach links und rechts. Noch stärker eingeengt ist ein Neigen des Kopfes seitwärts, d. h. in der Frontalebene. Mit den Beschränkungen der Bewegungsfreiheit geht eine größere Stabilität der Kopfhaltung einher, außerdem eine Einsparung an Muskelkräften. Im Zusammenhang mit unserem Thema interessiert die mit der Beschränkung der Bewegungsfreiheit einhergehende *Vereinfachung der innervatorischen Apparatur*, deren Organisation aus der dynamischen Interpretation der Bewegungsabläufe direkt abgelesen werden kann.

Schwieriger zu verstehen sind die Bewegungen der thorakalen *Wirbelsäule*. Charakteristisch ist die wechselnde Kombination von elastischer Abstützung auf das Wirbelsystem mit ihren Zwischenwirbelscheiben unter plastisch aktiver Mitwirkung der Muskulatur, welche die Wirbelgelenke auf kurze und weitere Distanz überspannt. Durch diese Verbindung starrer Elemente, passiv elastischer und zu aktiver Kontraktion befähigter Gewebe kann die Wirbelsäule je nach den Erfordernissen statische und dynamische Funktionen erfüllen. — Relativ große *Bewegungsfreiheit* gewährt die fast kugelige Form des Femurkopfes in den *Hüftgelenken*. Ihre paarige Anordnung gewährleistet bei geeigneter Stellung der abstützenden Beine eine sowohl statisch wie muskulär dynamisch bedingte Stabilität. Hinsichtlich der innervatorischen Organisation sind hier enge Beziehungen zwischen symmetrisch angelegten nervösen Strukturen die Voraussetzung einer wirkungsvollen Koordination der Muskeln über den Hüft-, Knie- und Fußgelenken. An den Gelenken der Beine stellt man eine starke Einschränkung der Bewegungsfreiheit fest, die beim Knie praktisch auf eine einzige Ebene reduziert ist. Dementspre-

chend bewältigt eine relativ einfache innervatorische Organisation die zu erfüllenden tonischen und motorischen Funktionen.

Der Rückschluß von den dynamischen Aspekten somatomotorischer Leistungen auf die innervatorische Organisation erfährt eine wesentliche Förderung, wenn man die Verhältnisse bei *verschiedenen Tierarten* zu Rate zieht und sich bewußt ist, daß die von den Elementen des Muskelapparates produzierten Kräfte eine Manifestation nervöser Impulse darstellen. Diese Gesichtspunkte können offenkundig dazu anregen, nach Unterschieden zentralnervöser Systeme bei verschiedenen Species zu fahnden. Dabei ist zu erwarten, daß z. B. bei Tierarten, die normalerweise den Kopf relativ hoch tragen, bestimmte Kernabschnitte und Faserzüge weniger massiv entwickelt sind, als wo die Halsmuskulatur durch den horizontal nach vorn gehaltenen Kopf belastet ist. Auch das absolute Gewicht des Kopfes spielt eine Rolle. Diese würde z. B. beim Vergleich der innervatorischen Organisation einerseits bei der Eidechse, andererseits beim Molch zum Ausdruck kommen, da beim Molch der Kopf vom Wasser getragen wird, während die Eidechse denselben auf langem Hals hochhalten muß. Nach der histologischen Kontrolle der betreffenden Hirnpartien werden vermutlich auch Beziehungen zwischen Ergebnissen der Verhaltensforschung und Organisation der motorischen Innervation feststellbar sein.

### Grundsätzliches über die motorischen Zentren

Nach den vorstehenden programmatischen Hinweisen, welche für komplexe Aufgaben der Hirnforschung gewisse Perspektiven eröffnen, ist noch ein Wort über die sogenannten motorischen Zentren zu sagen. Notwendig wäre zunächst eine Präzision der eben genannten Bezeichnung. Die bis in die Neuzeit vorwiegend morphologische Orientierung der Hirnforschung verbindet mit ihr die Vorstellung einer circumscripten Lokalisation. Wenn man sich aber die dynamisch konzipierte Struktur irgend einer motorischen Leistung vor Augen hält, kann man dieser Interpretation nur sehr bedingt zustimmen. Man erinnere sich an das Beispiel, wo im Gesichtsfeld des rechten Auges oben ein Objekt erscheint und eine entsprechend gerichtete Blickbewegung auslöst. Für diesen Fall wurde bereits festgestellt, daß hierzu der M. rect. superior, wie aus Abb. 5a und 5b ersichtlich, in Aktion gerufen wird<sup>1,3</sup>. Indessen nimmt sein Wirkungsgrad wegen Rückverlagerung der Insertionsstelle am Bulbus um so mehr ab, je mehr das Auge schon hochgehoben ist. Dafür entfalten die synerg koordinierten Musculi rectus externus und rectus internus eine aufwärts gerichtete Komponente. Wird der Blick nasalwärts nach oben gerichtet, so macht der M. rect. sup. neben der Hebewirkung noch eine rotatorische Komponente geltend. Infolgedessen wird der M. obliquus

inferior in das innervatorische Dispositiv soweit mit einbezogen, daß er eine subjektiv störende Raddrehung des Auges verhindert.

Daß zu dieser ohnehin komplexen Komposition aktiver Muskelkräfte eine Entspannung des Antagonisten hinzukommt, ist aus dem Gesetz der reziproken Innervation zu entnehmen. — Noch um einen Grad komplizierteren Verhältnissen steht man bei der Analyse der *binocularen Blickbewegungen* gegenüber. Dabei werden nicht symmetrisch, sondern seitengleich wirkende Muskeln mobilisiert, wobei beim Sehen in die Nähe die Adduktoren je nach Distanz des anvisierten Objektes unterschiedliche Kräfte entfalten. Entwirft man sich nun nach diesen Hinweisen ein Bild vom Zusammenspiel der bei Blickbewegungen beanspruchten Muskeln, so wird man sich darüber klar, daß stets eine Mehrzahl der verschiedenen gelagerten Augenmuskelkerne beteiligt sind. Noch ausgedehnter ist die zentrale Repräsentation für gezielte Blickbewegungen, wenn den Ablenkungen der Augen gleichgerichtete Bewegungen des Kopfes assoziiert sind. Diese Verbindung bedeutet, daß auch die zentralen Repräsentanten von Halsmuskeln in den nervösen Apparat einbezogen sind, welcher bei fließend sich ändernder Kräftekomposition das „visuelle Ergreifen“ des Objektes steuert.

Praktisch total umfassend ist das zentrale „Steuerorgan“, welches einen gezielten Schlag koordiniert. Wie Abb. 4a und 4b (S. 37) erkennen lassen, sind an den zu *funktionellen Einheiten* gefügten somatomotorischen Leistungen de facto alle Körpermuskeln beteiligt, nach Richtung und Spannkraft zielgerecht aufeinander abgestimmt. So scharf und eng umrissen das Ziel, im konkreten Fall der Ball, raum-zeitlich definiert ist, so weitgespannt ist die zentral nervöse Organisation, welche den treffsichereren Bewegungsablauf formuliert. Richtig ist, daß peripher benachbarte Muskelgruppen — in der motorischen Hirnrinde ebenfalls benachbart — also gewissermaßen fokussiert sind. Dieses anatomische Factum entspricht indessen nicht dem Begriff der im physiologischen wie im klinischen Sprachgebrauch für ein leistungsspezifisches nervöses Organ, d. h. einem „Zentrum“ verstanden wird<sup>6,7</sup>. — Indem man zwischen anatomisch bzw. physiologisch orientiertem Vokabular unterscheidet, werden störende Mißverständnisse vermieden und dem Suchen nach den Ursachen mancher Fehlfunktionen wird ein anderes Ziel gesteckt als wenn man in der Vorstellung eines integral fokussierten Steuerorgans befangen ist. Freilich ist für gewisse Fälle in Betracht zu ziehen, daß die zentralen Repräsentanten bestimmter Muskelgruppen auf höherer Ebene auf engem Raum zusammengefaßt, also lokalisatorisch umschrieben sein können. Damit würden der anatomisch und der funktionell verstandene Zentrenbegriff sich mehr oder weniger decken. Die Lähmung der Blickbewegung nach oben bei mesencephalen Läsionen des Parinaud'schen Syndroms könnte als Bestätigung der erwähnten

Interpretation herangezogen werden. Die Verhältnisse sind nach experimentellen Befunden doch wesentlich verwickelter, als der Vorstellung einer circumscripten Lokalisation entsprechend.

In dem später folgenden zweiten Teil werden die Ergebnisse von cerebralen Reizexperimenten für die Motorik behandelt. Vorweggenommen seien hier die stufenweise Verknüpfungen des motorischen Innervationsapparates mit sensorischen Kontrollvorrichtungen entsprechend der funktionellen Organisation des vegetativen Nervensystems<sup>6</sup> und wie dies für die Somatomotorik in modellmäßigen Darstellungen skizziert wurde<sup>4</sup>. E. v. HOLST hat auf theoretischer Grundlage auf weite Sicht einen wichtigen Beitrag zu sinnvoll disponierten experimentellen Untersuchungen geleistet<sup>8</sup>.

Im eben erwähnten II. Teil wird über experimentell beigefügte Kriterien berichtet werden, welche bei der Entwicklung somatomotorischer Leistungen eine maßgebliche Rolle spielen, und welche auch bei gestörter Funktion zu beachten sind.

### Zusammenfassung

Einleitend werden einige für die Analyse der Somatomotorik verwendete Begriffe definiert und die physikalisch-mechanischen Grundlagen einer Physiologie der motorischen Koordinationen dargestellt. Statische und dynamische Gleichgewichtszustände der Körperhaltung werden unterschieden.

Konkrete Beispiele von Haltungen und Bewegungen werden am Sprung aus unterstützter Haltung von 3 Personen, am Steinwurf und an der Augenmotorik als Manifestationen der innervatorischen Apparatur analysiert. Allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten motorischer Funktionen ergeben nicht nur Einsichten in physiologische Zusammenhänge, sondern eröffnen auch Zugänge zum Verständnis pathologischer Störungen.

Da sich die Komposition aktivierter Muskelkräfte im zielgerichteten Bewegungsablauf fortlaufend wandelt, muß die Regulation der Bewegung fortlaufend auf neue Kraftwirkungen eingestellt werden. Aus diesen wechselnden Koordinationen und dem offenkundigen Zusammenwirken verschieden gelagerter cerebraler Formationen ergibt sich eine funktionell motivierte Vorstellung über Aufbau und Wirkungsweise motorischer Zentren.

In einem folgenden zweiten Teil sollen experimentelle Befunde dargestellt werden, die für die neurologische Interpretation von motorischen Störungen von Bedeutung sind.

Die vorliegende Arbeit ist in verdankenswerter Weise durch den Schweizerischen Nationalfonds unterstützt worden. Dank auch meinem Nachfolger im Amt Prof. O. Wyss für Überlassung eines Arbeitsraumes.

### Literatur

- <sup>1</sup> HESS, W. R.: Die graphische Darstellung von Bewegungsstörungen der Augen (Taf. III a und b). *Arch. Augenheilk.* **70**, H. 1 (1911).
- <sup>2</sup> — Ein einfaches messendes Verfahren zur Motilitätsprüfung des Auges. *Z. Augenheilk.* **35**, 201—219 (1916).
- <sup>3</sup> — Experimentelles zur Dynamik der Augenmuskeln. *Arch. Augenheilk.* **97**, 460 bis 466 (1926).
- <sup>4</sup> — Die Motorik als Organisationsproblem. *Biol. Z.* **61**, 545—572 (1941).
- <sup>5</sup> — Teleokinetisches und ereismatisches Kräftesystem in der Biomotorik. *Helv. physiol. pharmacol. Acta* **1**, C62—C63 (1943).
- <sup>6</sup> — Die funktionelle Organisation des vegetativen Nervensystems. Basel: Schwabe 1948.
- <sup>7</sup> — Psychologie in biologischer Sicht. Stuttgart: G. Thieme 1962.
- <sup>8</sup> HOLST, E. v.: Neue Gedanken und Versuche zur Sensomobilität. *Acta neuroveg.* (Wien) **12**, 337 (1955).
- <sup>9</sup> JUNG, R., and R. HASSLER: The extrapyramidal motor system. In: *Handbook of Physiology, Neurophysiology II*, p. 863—927, (Ed.: J. FIELD, H. W. MAGOUN, V. E. HALL). Washington Amer. Physiol. Soc. (1960).
- <sup>10</sup> WAGNER, R.: Über die Regelung der Muskelkraft und Bewegungsgeschwindigkeit bei Willkürbewegungen. Mitteilung V (mit Hinweisen auf Mitteilung I—IV). *Z. Biol.* **111**, 449—478 (1960).

Prof. Dr. W. R. HESS,  
8006 Zürich/Schweiz, Goldauerstraße 25