

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Handbuch der Physiologie des Menschen

in vier Bänden (und einem Ergänzungsbande)

Physiologie des Nerven- und Muskelsystems

Du Bois- Reymond, René

1909

Spezielle Bewegungslehre mit Überblick über die Physiologie der Gelenke.
Von R. du Bois-Reymond

Spezielle Bewegungslehre

mit

Überblick über die Physiologie der Gelenke

von

R. du Bois-Reymond.

1. Der Körper als einheitliche Masse in Ruhe und in Bewegung.

I. Der Körper als Ganzes unbewegt. Schwerpunkt.

Wie die Aufgabe der Physiologie im ganzen darin besteht, die Gesetze der Physik und Chemie auf die Vorgänge im lebenden Körper anzuwenden, besteht die Aufgabe der speziellen Muskelphysiologie oder Lehre von den Bewegungen in der Anwendung der Mechanik auf die Bewegungen des Körpers. Der einfachste Fall, der sich dieser Betrachtungsweise darbietet, ist der, daß der ganze, als eine unbewegte starre Masse gedachte Körper in Ruhe verharret.

Es entsteht zunächst die Frage, inwieweit sich dieser Fall beim Lebenden tatsächlich verwirklichen läßt. Offenbar kann die Bedingung der Starrheit nur annähernd erfüllt werden, weil der Körper zum Teil aus Flüssigkeit besteht, die in Bewegung ist. Ebenso wenig kann von einem absoluten Ruhezustand die Rede sein, weil einerseits die Atmung Bewegungen erfordert, andererseits die Muskeln, solange sie mit dem Nervensystem in Verbindung stehen, stets in erkennbarem Grade angespannt sind. Diese Spannung wird offenbar bei der geringsten Änderung der inneren oder äußeren Bedingungen wechseln, und folglich eine wirklich absolute Ruhe des Körpers unmöglich machen. Der lebende Körper kann also in Wirklichkeit nie in dem Maße dem physikalischen Begriffe eines starren Körpers nahe kommen, wie etwa eine Marmorstatue, er kann aber unter geeigneten Umständen relativ starr, relativ unbewegt sein, und man darf dann von den tatsächlich vorhandenen minimalen Bewegungen absehen, um auf den lebenden Körper als Ganzes die Lehren der Mechanik anzuwenden, die für starre Körper gelten. Die erste mechanisch wichtige Eigenschaft eines Körpers ist seine Schwere. Durch seine Schwere wirkt auch der ruhende Körper dauernd auf die Körper in seiner Umgebung ein, indem er nach dem Gravitationsgesetze von ihnen angezogen wird, und

seinerseits ebenso sie selbst anzieht. Die Schwere kommt allen Teilen des lebenden Körpers zu, aber nicht in gleichem Maße. Aus der Schwerkraftwirkung aller einzelnen Teile des Körpers setzt sich als Resultante aller dieser Einzelkräfte die Gesamtschwere des Körpers zusammen. Da von allen zu dem Körper in Beziehung stehenden Körpern die Erde mit der größten Masse aus nächster Nähe wirkt, so ist die Anziehung der Erde gegenüber der des Körpers selbst und aller anderen in der Natur vorkommenden Körper so groß, daß man unter „Schwere“ schlechthin nur die Anziehungskraft der Erde zu verstehen pflegt. Die Anziehung der Erde also, die auf alle Teile des Körpers je nach ihrer Masse stärker oder schwächer wirkt, wirkt auf den Gesamtkörper wie eine einzige Gesamtkraft, die man in einem einzigen Punkt des Körpers, dem Schwerpunkt, angreifend denken kann.

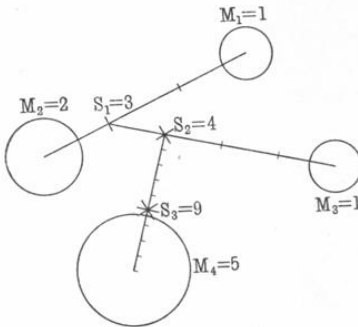
Dies veranschaulicht unter anderem der berühmte Versuch von Borelli¹⁾. Liegt der Körper auf einem Brette ausgestreckt, so drückt die Schwere alle seine einzelnen Teile gegen das Brett an. Legt man nun das Brett auf einen Tisch, und schiebt es mit dem einen Ende über die Tischkante hinaus, so wirkt die Schwere zwar auf das nicht unterstützte Ende, sie bringt es aber nicht zum Herabfallen, weil sie auf den übrigen Teil, der den größeren Teil der Körpermasse trägt, stärker wirkt. Schiebt man das Brett immer weiter, so ist ein immer größerer Teil des Körpers ununterstützt, und schließlich kommt ein Punkt, bei dem ebensoviel von der Körpermasse über die Tischkante hinaus geschoben ist, wie noch auf dem Tische zurückgeblieben ist. Annäherungsweise hat in diesem Augenblicke das Brett ebensoviel Neigung hinunterzukippen, wie auf dem Tische liegen zu bleiben, und es würde sich daher in jeder Kippstellung, die man ihm erteilte, im Gleichgewicht halten. Schiebt man es aber eine Spur weiter hinaus, so hat das freie Ende Übergewicht, Brett und Körper streben nun am freien Ende hinunterzukippen. Der Punkt, bei dem das indifferente Gleichgewicht erreicht war, ist der Schwerpunkt. Solange der Schwerpunkt über dem Tische war, lag der Körper sicher, im Augenblick, wo der Schwerpunkt über den Tisch hinausrückte, fiel er. Man kann also mit Recht sagen, die Schwere wirkt auf den ganzen Körper so, als ob sie im Schwerpunkt allein angriffe. Dies darf man sich aber nicht so vorstellen, als ob sie auf die übrigen Stellen überhaupt nicht wirke, sondern hier wird die Wirkung durch die gleichzeitige Wirkung auf die entgegengesetzten Körperstellen aufgehoben. Der Schwerpunkt ist eben diejenige Stelle des Körpers, von der aus die Masse nach allen Seiten gleichmäßig verteilt ist. Er stellt also in bezug auf die Massenverteilung die Mitte des Körpers dar. Bei regelmäßig gestalteten Körpern aus gleichförmigem Stoff liegt daher der Schwerpunkt auch wirklich in der Mitte des Körpers. Beim menschlichen Körper aber, der weder eine regelmäßige Gestalt, noch eine gleiche Verteilung der Masse innerhalb seiner Gestalt aufweist, ist die Lage des Schwerpunktes viel leichter durch Versuche, wie etwa der eben beschriebene zu ermitteln, als aus der Massenverteilung zu berechnen.

Die Massenverteilung im Körper läßt sich dadurch ermitteln, daß man Gewicht und Schwerpunktslage für alle einzelnen Abschnitte des ganzen Körpers bestimmt. Diese Aufgabe ist bisher immer nur auf anatomischem Wege durch Messungen

¹⁾ Joh. Alph. Borellius, de motu animalium. Lugduni Batavorum, 1679.

an zerteilten Cadavern gelöst worden¹⁾. Der Gesamtschwerpunkt des Körpers kann dann für jede beliebige Stellung gefunden werden, indem man zunächst den gemeinsamen Schwerpunkt von zwei Einzelabschnitten bestimmt, dann den gemeinsamen Schwerpunkt des gefundenen Punktes und eines dritten Einzelabschnittes, dann den des so bestimmten Punktes und eines vierten, und so fort, bis man beim Gesamtschwerpunkt anlangt. Der gemeinsame Schwerpunkt zweier Massen liegt auf der Verbindungslinie der Einzelschwerpunkte, und teilt diese im umgekehrten Verhältnis zur Größe der Massen, er liegt also näher an der schwereren Masse.

Fig. 76.



Lage des Gesamtschwerpunktes eines Massensystems.

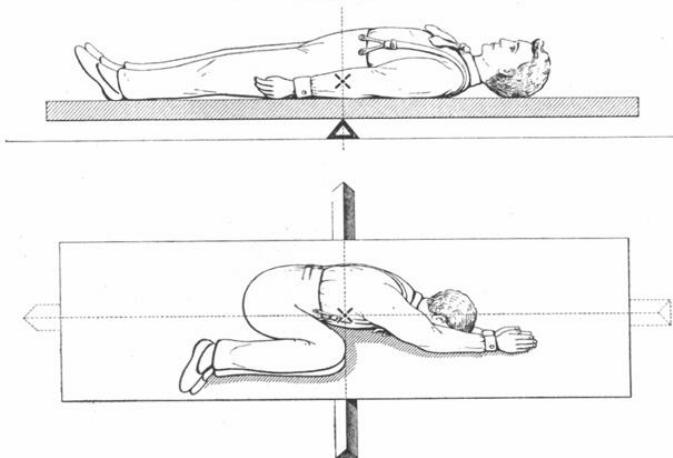
Der gemeinsame Schwerpunkt der beiden Massen $M_1 = 1$ und $M_2 = 2$ ist $S_1 = 3$. Der gemeinsame Schwerpunkt von M_1 , M_2 und M_3 ist $S_2 = 4$. Der gemeinsame Schwerpunkt des Gesamtsystems ist S_3 .

O. Fischer²⁾ hat für die besonderen Zwecke der physiologischen Mechanik noch ein anderes Verfahren zur Ermittlung des Schwerpunktes angegeben, das für viele Fälle weniger umständliche Rechnung ergibt.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß die Lage des Schwerpunktes nur für eine bestimmte Massenverteilung, also

nur für eine bestimmte Stellung des Körpers angegeben werden kann. Hat man z. B. für die gestreckte Lage auf einem Brett gefunden, daß der Schwer-

Fig. 77.



Der Borellische Versuch zur Bestimmung des Schwerpunktes. — Nach E. Kohlrausch.

punkt des Körpers im Promontorium gelegen ist, so kann diese Angabe nicht etwa für andere Stellungen festgehalten werden. Es ist ja ohne weiteres

¹⁾ Vgl. W. Braune u. O. Fischer, Über den Schwerpunkt des menschlichen Körpers usw., Abhandl. d. math.-physikal. Kl. d. k. sächs. Gesellsch. d. Wissensch. 15, 7, Leipzig 1889. Hier sind auch die älteren Arbeiten angeführt. — ²⁾ O. Fischer, Der Gang des Menschen, zweiter Teil: Die Bewegung des Gesamtschwerpunktes und die äußeren Kräfte. Abhandl. d. mathem.-physikal. Kl. d. königl. sächs. Ges. d. Wiss. 25 (1), 27, 1899.

einzusehen, daß derselbe Versuch ein ganz anderes Ergebnis haben muß, wenn beispielsweise die Beine angezogen und die Arme über den Kopf erhoben würden. Für manche Stellungen fällt der Schwerpunkt überhaupt außerhalb des Körpers. Wird der Körper so stark wie möglich nach vorn gebeugt, und zugleich Arme und Beine nach vorn gestreckt, so ist die ganze Masse des Körpers auf drei Seiten eines Luftraumes, der vor dem Bauche liegt, annähernd gleich verteilt, und dementsprechend liegt der Schwerpunkt für diese Stellung vor dem Bauch in der Luft. E. Kohlrausch¹⁾ hat gezeigt, daß man auch die Verlagerung des Schwerpunktes in solchem besonderen Falle auf sehr einfache Weise durch den Borellischen Versuch demonstrieren kann.

Weil die Schwere so wirkt, als ob sie allein im Schwerpunkt angriffe, gilt für jede einzelne Lage des Schwerpunktes, wenn der Körper als ein starres Ganzes aufgefaßt wird, der Satz: Daß der Körper ausreichend unterstützt ist, wenn der Schwerpunkt sich senkrecht unter oder über einem Unterstützungspunkt befindet.

Die senkrechte Unterstützung vom oben oder unten gelegenen festen Punkte aus kann auch als Resultante aus mehreren schrägen Unterstützungen entstehen. Dies führt auf den Begriff der „Unterstützungsfläche“, die dasjenige Gebiet bezeichnet, das zwischen den Fußpunkten der schrägen Unterstützungslinien eingeschlossen ist.

II. Der Körper als Ganzes frei bewegt. Sprungkurve. Drehung.

Der starr gedachte Körper verhält sich der Schwerkraft gegenüber so, als ob seine ganze Masse im Schwerpunkt vereinigt wäre. Wird der Körper durch eine äußere Kraft, z. B. die Erdanziehung, in Bewegung versetzt, so hat daher auch diese Bewegung diejenige Form, die sich aus der Einwirkung der Kraft auf den Schwerpunkt ergibt. Beim freien Fall strebt der Schwerpunkt in gerader Richtung dem Mittelpunkte der Erde zu. Hat der Körper, ehe er dem freien Fall überlassen wurde, eine gegebene Geschwindigkeit in irgendwelcher Richtung besessen, so wirkt diese nach dem Gesetze vom Beharrungsvermögen als „lebendige Kraft“ in ihm fort, und würde, wenn keine anderen Kräfte störend einwirkten, ihn in gerader Linie in die Unendlichkeit fortbewegen. Da aber zugleich die Erdanziehung auf den Körper wirkt, wird die Bahn des Schwerpunktes von ihrer ursprünglichen Richtung allmählich immer mehr und mehr in die Richtung nach dem Mittelpunkt der Erde zu abgelenkt. Dadurch tritt also an Stelle der geraden Bahn, auf der der Körper infolge des Beharrungsvermögens ins Unendliche fortfliegen würde, eine gekrümmte Bahn, und zwar eine Parabel. Unter gewöhnlichen Verhältnissen wird die Bahn eines frei fallenden, oder infolge einer Anfangsgeschwindigkeit in beliebiger Richtung der parabolischen Kurve folgender Körper auch noch durch den Luftwiderstand beeinflusst.

Die Größe des Luftwiderstandes ist für den menschlichen Körper noch nicht gemessen worden. Für ebene Flächen hat man gefunden, daß der Widerstand annähernd die Größe der Fläche und dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, wonach sich die von O. Lilienthal²⁾ angewendete Formel ergibt $W = 0,13 \cdot f \cdot v^2$

¹⁾ E. Kohlrausch, Physik des Turnens, Hof 1887, S. 17. — ²⁾ O. Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Berlin 1875.

wo W der Widerstand, f die Größe der Fläche, v die Geschwindigkeit und 0,13 ein durch Gewicht und Reibung der Luft bedingter empirischer Faktor ist. Lübsen¹⁾

gibt die wenig abweichende Formel
$$\frac{W}{2g} = k \cdot a \cdot \gamma \cdot v^2,$$
 wo k der empirische Faktor $= 1,39$, a die Fläche, γ das Gewicht der Volumeinheit Luft, v die Geschwindigkeit und g die Beschleunigung beim freien Fall $= 9,8 \text{ m}$ ist. Diese Formeln lassen sich aber streng genommen auf den menschlichen Körper nicht anwenden, weil sie an ebenen Flächen gewonnen sind. Selbst für ebene Flächen findet man bei wachsender Geschwindigkeit etwas größere Werte als die Formeln angeben. Für ebene Flächen von verschiedener Gestalt und Größe ist das Ergebnis wiederum ein anderes. Ferner ist infolge der Strudelbewegung, die an den Rändern einer Fläche entsteht, der Luftwiderstand gegen die Bewegung einer Fläche größer als der Widerstand gegen die gleich große Stirnfläche eines körperlichen Gebildes. Endlich ist der Luftwiderstand gegen gekrümmte Flächen von dem gegen ebene Flächen erheblich verschieden. Die konvexen Flächen, die der Körper darbietet, müssen viel geringeren Widerstand bieten als ein ebenes Gebilde von gleicher Querschnittsgröße.

Schätzt man ohne Rücksicht auf diese Fehler den Widerstand des menschlichen Körpers nach dem einer gleich großen ebenen Fläche, so wird er für die größte Geschwindigkeit, die sich der Mensch im Sprunge durch eigene Kraft erteilen kann, nämlich gegen 7 m in der Sekunde, den Wert von 2 bis 3 kg erreichen, mithin neben der Größe der in diesem Falle vorhandenen lebendigen Kraft und der der Schwere noch kaum in Betracht kommen. Jedenfalls wirkt er hemmend auf die Anfangsgeschwindigkeit und beschleunigt daher die Abweichung von der ursprünglichen Richtung der Bewegung.

Mithin kann man sagen, daß die Bahn, die ein unter dem Einfluß einer erteilten Geschwindigkeit und der Schwerkraft durch die Luft bewegter Körper zurücklegt, eine noch etwas stärker gekrümmte Form haben wird, als dem Parabelverlauf entsprechen würde.

Damit ist die Bahn beschrieben, die der als starr gedachte Körper beschreibt, wenn er sich frei in der Luft unter dem Einfluß einer Anfangsgeschwindigkeit, der Schwere und des Luftwiderstandes bewegt. Dies sind die Bedingungen, denen der Körper des Menschen beim Sprung unterliegt. Die Bahn des Schwerpunktes ist nur von der Größe und Richtung dieser drei Kräfte abhängig. Da der Luftwiderstand stets der vorhandenen Bewegung entgegen, die Schwerkraft stets senkrecht nach unten wirkt, ist nur die dritte Kraft, nämlich die infolge der Anfangsgeschwindigkeit vorhandene lebendige Kraft der Richtung und Größe nach unbekannt, und wenn diese gegeben ist, läßt sich die Bahn des Schwerpunktes physikalisch exakt vorausbestimmen.

Dieser Umstand erhält dadurch besondere Bedeutung, daß, was hier vom Schwerpunkt des starr gedachten Körpers ausgesagt ist, auch für den in sich beweglichen Körper, also den lebenden Körper, in der Wirklichkeit gilt. Denn obschon, wie oben gezeigt worden ist, die Lage des Schwerpunktes zum Körper bei verschiedenen Körperhaltungen verschieden ist, kann die Lage des Schwerpunktes im Raum nur durch äußere Kräfte, aber nicht durch die Bewegung von Körperteilen gegeneinander bewegt werden. Diese Tatsache wird gewöhnlich in der Form ausgesprochen: Durch innerhalb eines Massensystems wirkende Kräfte kann die Lage seines Gesamtschwerpunktes im Raume nicht verändert werden.

Der Inhalt dieses Satzes wird durch ein praktisches Beispiel am handgreiflichsten vor Augen gestellt: Man denke sich einen Mann am hinteren Ende eines leichten

¹⁾ H. B. Lübsen, Einleitung in die Mechanik, Leipzig 1876, § 366.

Kahnes stehend, dessen vorderes Ende eben das Ufer berührt. Das Gewicht des Kahnes betrage ebensoviel wie das des Mannes, der Schwerpunkt des Kahnes liege in der Mitte seiner Länge. Die gemeinsame Masse von Mann und Kahn ist auf dem Wasser so leicht beweglich, daß sie mit großer Annäherung ein freischwebendes System darstellt. Der gemeinsame Schwerpunkt des Systems wird nach Voraussetzung im hinteren Viertelpunkt der Länge des Kahnes gelegen sein. Geht nun der Mann im Kahn nach dem vorderen Ende, etwa um ans Land zu steigen, so ist das eine Verschiebung der Massen des Systems durch innere Kräfte. Man könnte glauben, daß dadurch der Gesamtschwerpunkt bis an den vorderen Viertelpunkt des Kahnes vorrücken, also viel näher an das Ufer verlegt werden würde. Tatsächlich aber gelingt es dem Manne gar nicht, das Ufer zu erreichen, sondern indem er nach dem vorderen Ende des Kahnes auf das Ufer zugeht, bewegt sich der Kahn unter ihm vom Ufer fort, und wenn er am Vorderende angekommen ist, wird der Kahn um seine halbe Länge vom Ufer abgewichen sein. Der gemeinsame Schwerpunkt von Mann und Kahn liegt dann allerdings im vorderen Viertelpunkt, aber genau in derselben Entfernung vom Ufer wie vorher. Will der Mann wirklich ans Ufer kommen, so muß er durch ein Ruder, eine Stange oder einen Haken äußere Kräfte zur Einwirkung auf das System herbeiziehen.

Ganz ebenso wie Mann und Kahn auf dem Wasser verhalten sich die einzelnen Teile des menschlichen Körpers, wenn man ihn, etwa nach einem Absprung, in der Luft frei schwebend denkt. Es wirken dabei allerdings die oben erwähnten äußeren Kräfte auf ihn ein, die seinem Schwerpunkt die erwähnte parabolische Bahn aufzwingen. Aus dieser Bahn abzuweichen, kann aber der Schwerpunkt durch keine Entfaltung noch so großer innerer Bewegungskräfte gezwungen werden. Zieht z. B. ein Springer, während er fliegt, die Beine kräftig empor, so zieht das Beharrungsvermögen der Beine den Oberkörper um eine genau entsprechende Größe abwärts, so daß der Schwerpunkt seine parabolische Bahn ohne jede Störung innehält. Oder, wenn der Sprung mit gebeugter Haltung der Beine begann, so wird, wenn die Beine durch eine Streckbewegung nach abwärts geschleudert werden, genau wie in dem Beispiel vom Mann im Kahn der Oberkörper durch Rückstoß entsprechend emporgetrieben, und der Schwerpunkt bleibt abermals auf seiner gesetzmäßigen Bahn.

E. Kohlrausch¹⁾ demonstriert die Unabhängigkeit der Lage des Schwerpunktes eines frei beweglichen Körpers im Raum von dessen Einzelbewegungen auf folgende Weise: Wenn ein Mensch sich an ein langes Seil hängt, ist er innerhalb gewisser Grenzen seitlich ohne merklichen äußeren Widerstand beweglich. Macht er nun irgend eine Bewegung, streckt er z. B. ein Bein und einen Arm plötzlich seitlich aus, so bemerkt man deutlich, wie der ganze Körper um ein entsprechendes Stück nach der anderen Seite ausweicht. Der Gesamtschwerpunkt bleibt unverändert senkrecht unter dem Aufhängepunkt des Seiles.

Aus diesen Angaben geht hervor, daß die Lage oder auch die Bewegung des Schwerpunktes des ganzen Körpers im Raume von der Bewegung der Körperteile gegeneinander unabhängig ist. Daraus folgt, daß der Körper die Bahn seines Schwerpunktes während des Sprunges durch Eigenbewegung nicht beeinflussen kann.

Hierzu ist die einschränkende Bemerkung zu machen, daß der Luftwiderstand als eine äußere Kraft wohl imstande ist, die Bewegung des Schwerpunktes zu beeinflussen, und daß daher eine Stellungsänderung, die den Luftwiderstand merklich verändert, auch die Bahn des Schwerpunktes verändern kann.

¹⁾ E. Kohlrausch, Physik des Turnens, Hof 1887, S. 50.

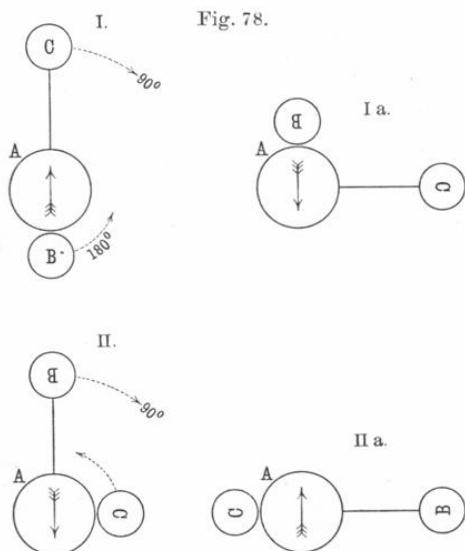
Ferner ist zu bemerken, daß Drehung des ganzen Körpers um seinen Schwerpunkt stattfinden kann, ohne daß der Schwerpunkt seine Lage ändert. Es kann sich der Körper also auch während des Sprunges um den Schwerpunkt drehen, ohne daß dadurch die Bahn des Schwerpunktes verändert wird. Theoretisch können innere Kräfte ebensowenig Drehung eines frei schwebenden Systems um seinen Schwerpunkt herbeiführen, wie Abweichung des Schwerpunktes aus seiner anfänglichen Lage.

Es kann nämlich niemals durch bloß innere Kräfte eine gleichzeitige Drehung der Gesamtmasse in einer und derselben Richtung zustande kommen, im Gegenteil bleibt die Summe der gleichzeitig stattfindenden Drehungen, nach ihren Momenten in bezug auf die Drehungsachse berechnet, stets gleich Null.

Der Begriff des Momentes einer Masse ist bei der vorliegenden Betrachtung nicht zu umgehen, doch dürfte die folgende Darstellung selbst eine Anschauung von dem zu vermitteln geeignet sein, was unter dem Drehungsmoment einer

Masse, bezogen auf eine bestimmte Drehungsachse, zu verstehen ist. Zahlenmäßig ist das Trägheitsmoment einer Masse bestimmt durch ihr Produkt in das Quadrat ihres Abstandes von der Drehungsachse, mr^2 .

Da nun die Momente der einzelnen Körperteile durch Veränderung ihres Abstandes vom Schwerpunkt des Gesamtkörpers beliebig verändert werden können, so lassen sich durch wiederholte Drehungen der Massen gegeneinander mit veränderten Abständen Lagen des Gesamtsystems herbeiführen, in denen alle Einzelteile von der Anfangslage aus in gleichem Sinne, wenn auch nicht in gleichem Maße, gedreht erscheinen. Dieser Vorgang läßt sich folgendermaßen darstellen: Das zu drehende System bestehe aus drei Massen, die in geeigneter Weise miteinander verbunden und auf



„Drehung“ eines freien Massensystems infolge innerer Kräfte. Aus der Anfangslage I werde die Masse B um A dem Sinne des Uhrzeigers entgegen um 180° gedreht, während C um 90° im Sinne des Uhrzeigers zurückgeht. Es entsteht die Stellung Ia. Nun rücke C an A heran, B dagegen so weit ab wie vorher C, so daß die Stellung II entsteht. Es werde nun die Masse C um A dem Sinne des Uhrzeigers entgegen um 180° gedreht, während B um 90° zurückgeht. A werde jedesmal im Sinne der stärkeren Drehung mitgenommen, so wird A in IIa um 360° gedreht erscheinen.

einer wagerechten Ebene reibungsbeweglich sein sollen. Die eine Masse, A, sei soviel größer als die anderen, daß ihr Mittelpunkt selbst bei beträchtlicher Entfernung der anderen Massen annähernd den Schwerpunkt des ganzen Systems bildet. Es werde nun die zweite Masse, B, ganz dicht an A herangebracht, die dritte, C, dagegen weit von A entfernt, und nun C durch Eigenkräfte des Systems, die also von A und B ausgehen, in einer Richtung, die als die negative bezeichnet werden möge, um den Schwerpunkt A um 90° gedreht. Dadurch würde C gezwungen werden, einen sehr großen Kreisbogen zu beschreiben. Diese große Bewegung kann nur dadurch zustande kommen, daß A und B

eine entsprechend große Bewegung in positiver Richtung ausführen. Da aber A und B ganz nahe am Drehpunkt liegen, erfordert hier eine ganz kleine Massenverschiebung schon einen sehr erheblichen Drehungswinkel, der viel größer ausfällt als die 90° , um die C bewegt wurde. So mögen sich, während C um 90° nach negativer Richtung bewegt worden ist, A und B um 180° in positiver Richtung gedreht haben. Nun werde durch geeignete innere Kräfte des Systems C ganz nahe an A herangezogen, wobei selbstverständlich keine Drehung eintritt, und nun B, ebenso wie vorher C, weit von A entfernt, und um 90° in negativer Richtung gedreht. Dabei wird sich A und C um 180° in positiver Richtung drehen müssen. Dann ist das Ergebnis der ganzen Bewegungen, daß C um 90° in negativer und 180° in positiver Richtung gedreht worden ist, B um 180° in positiver und 90° in negativer, A um 360° in positiver Richtung. Dies Ergebnis würde man nach dem praktischen Sprachgebrauch selbstverständlich nur als eine Drehung des gesamten Systems bezeichnen können. Daher ist auch die praktische Möglichkeit nicht zu bezweifeln, daß sich ein lebender frei schwebender Körper durch eigene Kräfte um seinen Schwerpunkt dreht.

Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die seinerzeit von Marey¹⁾ wissenschaftlich untersuchte Tatsache, daß eine mit dem Rücken nach unten fallen gelassene Katze sich in der Luft dreht, um auf die Beine zu fallen. Wie man auf Mareys Augenblicksbildern deutlich sieht, spielt der Rumpf der Katze die Rolle der Masse A, Kopf und Vorderbeine die der Masse B, Schwanz und Hinterbeine die der Masse C. Eine solche Drehung durch Eigenbewegungen des Körpers läßt sich auch an frei aufgehängten oder auf einer leicht drehbaren Unterlage stehenden Menschen demonstrieren.

Bei den Drehungen, die der Mensch im Sprunge ausführt, dürfte es schwer sein zu entscheiden, wie weit sie selbsttätig hervorgerufen, beim Absprung dem Körper mitgeteilt, oder endlich durch Luftwiderstände veranlaßt sind (vgl. Kohlrausch).

III. Bewegung des Gesamtkörpers gegen äußere Widerstände.

Der allgemeine Satz, daß bei der Bewegung, die infolge innerer Kräfte in einem Massensystem stattfindet, die Lage des Schwerpunktes im Raume unverändert bleibt, läßt sich auch auf diejenigen Fälle anwenden, in denen der Körper sich gegen äußere Widerstände bewegt, wenn man die Massen, von denen der Widerstand ausgeht, als zum System gehörend betrachtet. Befindet sich z. B. der Körper in Rückenlage auf der Erde, und erhebt er sich durch irgendwelche Bewegungen zum Stehen, so ist der Widerstand des Bodens nach der gewöhnlichen Anschauungsweise eine äußere Kraft, und man sieht die Erhebung des Schwerpunktes als eine Veränderung seiner Lage im Raume an. Für das Massensystem: „Erdkugel und menschlicher Körper“ ist aber der Bodenwiderstand so gut wie die Muskelwirkungen eine innere Kraft, es gilt also der obige Satz, der in diesem Falle besagt, daß, wenn der Körper sich erhebt, die Erdkugel um gerade so viel nach unten zurückweicht, daß der Gesamtschwerpunkt von Körper und Erdkugel vor und nach der

¹⁾ E. J. Marey, Des mouvements que certains animaux exécutent pour retomber sur leurs pieds, lorsqu'ils sont précipités d'un lieu élevé. *Compt. rend. de l'Acad.* 1894, T. CXIX, p. 714.

Bewegung genau dieselbe Stelle behält. Denkt man sich den Körper etwa unter einem Baumast stehend, den Ast mit den Händen erfassend und sich dazu hinaufziehend, so stößt er sich sozusagen durch Vermittelung des Baumes von der Erde ab, und die Erdkugel wird durch den Baumstamm so weit zurückgeschoben, daß die Verschiebung des Körperschwerpunktes nach oben ausgeglichen wird, und der Gesamtschwerpunkt von Körper und Erdkugel nach wie vor derselbe bleibt. Ebenso muß bei einem Sprunge die Erdkugel eine gewisse Rückstoßbewegung ausführen. In allen diesen Fällen ist die Bewegung der Erdkugel selbstverständlich unmeßbar klein, und man pflegt sie deshalb gänzlich außer acht zu lassen. Dagegen kommen entsprechende Bewegungen der einzelnen Körperteile untereinander vor, die für die spezielle Bewegungslehre von wesentlicher Bedeutung sind. Daher erfordert die Einheitlichkeit der Darstellung, daß auch bei den Bewegungen des Gesamtkörpers dieser Punkt nicht übergangen werde.

2. Bewegung eines Einzelgliedes gegen den Gesamtkörper.

I. Gelenklehre.

1. Die Grade der Bewegungsfreiheit.

Im Vorhergehenden ist die Bewegung des Gesamtkörpers betrachtet worden. Die Lehre von den Bewegungen der Gliedmaßen gegeneinander und gegen den Körper mag nun in der Weise eingeteilt werden, daß zuerst die Bewegung eines Einzelgliedes gegen den gesamten übrigen unbeweglich gedachten Körper betrachtet wird, dann die Bewegung eines Systems von zwei beweglich aneinander gehängten Gliedern, endlich die Bewegung eines Systems von drei oder mehr solchen Gliedern, worin dann die verwickeltesten Fälle der Körperbewegung eingeschlossen sind.

Es soll demnach zunächst die Bewegung eines Einzelgliedes gegen den übrigen starr und unbeweglich gedachten Körper betrachtet werden. Nun kann der Grad der Bewegungsfreiheit des Gliedes je nach Art der Gelenkverbindung ein verschiedener sein. Die Fingergelenke beispielsweise lassen nur Bewegung und Streckung zu, während das Handgelenk auch seitliche Bewegung gestattet.

Die Untersuchung der Bewegungen der einzelnen Glieder muß daher mit der Untersuchung der durch die Gelenke gegebenen Bewegungsmöglichkeiten beginnen. Diese bildet ein besonderes Hauptstück der speziellen Bewegungslehre, nämlich die Lehre von den Gelenken. Diese kann wiederum eingeteilt werden in die Lehre von den Formen der Gelenke im allgemeinen, die den Zusammenhang zwischen Bau und Bewegungsform der Gelenke seinen Grundzügen nach festzustellen sucht, und die spezielle Lehre von den Gelenken, die die Funktion jedes einzelnen Gelenkes nach seinen besonderen Eigentümlichkeiten behandelt. Dieser letzterwähnte Teil der gesamten Gelenklehre beruht so wesentlich auf anatomischen Angaben, daß er als ein Gegenstand anatomischer Untersuchung aus dieser Darstellung ganz fortgelassen werden soll.

Die allgemeine Betrachtung der Gelenke mag begonnen werden mit einem Überblick über die verschiedenen überhaupt denkbaren Möglichkeiten der Bewegungsfreiheit eines Gliedes.

Die mathematische Anschauung teilt die Bewegungsfreiheit in sechs Grade. Unbeweglich festgelegt ist ein Körper, von dem drei nicht auf derselben geraden Linie gelegenen Punkte ihre Lage nicht ändern können. Sind nur zwei Punkte des Körpers gezwungen, ihre Lage beizubehalten, so kann sich der Körper um die durch diese beiden Punkte gehende Grade als um eine Achse drehen. Dies ist die Bewegungsfreiheit vom ersten Grade. Hat der Körper die Freiheit, sich um eine solche Achse zu drehen und außerdem um eine sie senkrecht schneidende Achse, die bei der ersten Drehung mit dem Körper bewegt gedacht wird, so ist durch diese Bedingung die Lage eines einzigen Punktes des betreffenden Körpers, nämlich dessen, in dem sich die Achsen schneiden, im Raum festgelegt. Der Körper kann sich um diesen Punkt nach allen Seiten beliebig neigen, wobei man jedesmal die Neigung zerlegen kann in zwei Drehungen, um die feste und um eine auf ihr senkrechte, mit dem Körper beweglich gedachte Achse. Eine Drehung um den festen Punkt ist aber durch die Bedingung ausgeschlossen, daß die beiden Achsen aufeinander senkrecht bleiben müssen.

Die bestehende Bewegungsfreiheit ist die vom zweiten Grade. Ist als einzige Bedingung gestellt, daß ein Punkt des Körpers seine Lage im Raum beibehalten soll, so besteht Bewegungsfreiheit vom dritten Grade. Hier kann sich der Körper so wie im zweiten Falle durch Kombination der Drehungen um zwei aufeinander senkrechte Achsen nach allen Seiten neigen, und außerdem beliebig um den festen Punkt drehen, was im zweiten Falle ausgeschlossen war. Ist endlich der eine Punkt des Körpers nicht absolut festgelegt, sondern auf einer Linie verschieblich, so besteht Bewegungsfreiheit des vierten Grades, ist er auf einer Ebene beweglich, des fünften Grades, ist er im Raume beweglich, des sechsten Grades.

2. Eigenschaften der Gelenke.

Für alle diese verschiedenen Bewegungsmöglichkeiten finden sich unter den Gelenkverbindungen Beispiele. Die Forderung, bestimmte Punkte eines beweglichen Körperteiles im Raum festzuhalten, ist selbstverständlich in der Natur nicht in der Weise verwirklicht, daß Punkte von unendlich kleiner Ausdehnung an ihren Ort befestigt werden, sondern diese Forderung wird dadurch erfüllt, daß ein Abschnitt des Knochens, der den betreffenden Punkt enthält, von anderen Knochen oder Weichteilen so umspannt wird, daß bei allen ihm noch frei gelassenen Bewegungen der betreffende Punkt in Ruhe bleibt. Die Oberfläche dieses Knochenabschnittes sei z. B. von dem Punkte überall gleich weit entfernt, so bildet sie eine Kugelfläche. Ist diese von einer im Raume feststehenden Kugelschale eingeschlossen, so vermag sich die Kugel noch beliebig zu drehen, ihr Mittelpunkt ist aber gezwungen, seine Lage im Raum beizubehalten. Um eine derartige Fixierung eines oder mehrerer Punkte zu erreichen, braucht der bewegliche Knochenteil nun auch nicht allseitig eingeschlossen zu sein, sondern es genügt, und dies ist der dem tatsächlichen Befund entsprechende Fall, daß er gegen einen entsprechend geformten Knochenteil auf der einen Seite von der anderen Seite her beständig angepreßt wird.

Für die Mechanik der Gelenke ist es daher die erste und wesentlichste Bedingung, daß die gelenkig verbundenen Teile beständig gegeneinander-gedrückt werden.

Diese Bedingung wird dadurch erfüllt, daß die Muskeln und Sehnen, die über das Gelenk hinwegziehen, stets einen gewissen Grad von Spannung haben, der sich für die größeren Gelenke zu einem beträchtlichen Gesamtdruck vereinigt. Bei manchen Gelenkformen ist auch eine feste Verbindung durch Gelenkbänder vorhanden, die die erwähnten Druckkräfte überflüssig macht. Solche Gelenke, beispielsweise die Fingergelenke, behalten ihren bestimmten Gang auch als Bänderpräparat, während die anderen schlottern, sobald sie aus dem Zusammenhang mit den Weichteilen gelöst werden.

Hier mag eingeschaltet werden, daß die durch die hergebrachte Einteilung der systematischen Anatomie üblich gewordene Darstellung des Körpers als eines Gerüsts aus durch Gelenke verbundenen Knochen, das von den Muskeln bewegt wird, einer sachgemäßen Auffassung der physiologischen Mechanik überhaupt hinderlich ist. Die Verbindungen der Knochen ohne die Mitwirkung von Muskeln und Sehnen sind ganz unzureichend, um ein irgend widerstandsfähiges „Gerüst“ darzustellen. Nur durch die Anspannung zahlreicher Muskeln erhält der Körper die Festigkeit, die als Widerhalt selbst für verhältnismäßig geringfügige Bewegungen erforderlich ist.

Auf Grund des berühmten Versuches der Gebrüder Weber am Hüftgelenk wird ziemlich allgemein angenommen, daß auch der Luftdruck¹⁾ bei der Erhaltung des Zusammenhanges der Gelenke eine wesentliche Rolle spiele. Offenbar sind aber die im lebendigen Körper bestehenden Bedingungen von denen des Versuches sehr verschieden, und die von den Gebrüdern Weber und anderen gemessene Leistung des Luftdruckes im günstigsten Falle so klein, im Verhältnis zu den anderen in Betracht kommenden Kräften, daß es richtiger scheint, diese Annahme fallen zu lassen.

Obschon die Beschreibung der allgemeinen Eigenschaften der Gelenke als ins Gebiet der Anatomie gehörig hier fortbleiben soll, muß doch ein für die Gelenkmechanik sehr wichtiger Punkt hervorgehoben werden: Die Bewegung der Diarthrosen geht vermöge der Glätte und Nachgiebigkeit der Gelenkknorpel selbst beim stärksten Druck so leicht vor sich, daß die Gelenke selbst für die feinste Untersuchung unter allen Umständen als völlig reibungslos angesehen werden dürfen.

¹⁾ Wirkung des Luftdruckes auf die Gelenke: Chr. Aeby, Beiträge zur Kenntnis der Gelenke, Deutsch. Zeitschr. f. Chir. 6, 394, 1876. P. Bert, La pression barometrique 1878, p. 358. W. u. E. Weber, Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge, II. Teil, 64, 147, Göttingen 1836. E. Rose, Die Mechanik des Hüftgelenkes, Arch. f. Physiol. 1865, S. 545. H. Buchner, Kritische und experimentelle Studien über den Zusammenhang des Hüftgelenkes während des Lebens in allen normalen Fällen, Arch. f. Anat. 1877, S. 22; Zur Frage über den Zusammenhalt des Hüftgelenkes, ebenda 1878, S. 229. E. Pick, Zur Frage der Hüftgelenksfixation, ebenda 1878, S. 222; Zur Mechanik des Hüftgelenkes, ebenda 1878, S. 519. van Braam Houckeest, Über den Einfluß des Luftdruckes auf den Zusammenhalt der Gelenke, ebenda 1867, S. 381. Ph. J. W. Henke, Die Aufhängung des Armes und der Schulter durch den Luftdruck, Zeitschr. f. rat. Med. 7, 263, 1859. Langer, Über die Fixierung des Humeruskopfes in der Schulterpfanne, Zeitschr. d. Ges. d. Ärzte zu Wien 1861. Koster, De drukking der lucht op het heupgewricht. Nederl. Arch. v. Genees- en Naturkunde 3, 21, 1897. Chr. Aeby, Gelenke und Luftdruck, Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1875, Nr. 5. R. du Bois-Reymond, Spezielle Muskelphysiologie, Berlin 1903, S. 85.

Durch die Form der Gelenkflächen und die Verbindung durch Bänder, Sehnen und Muskeln werden auf die angedeutete Weise bestimmte Punkte der beweglichen Teile so fixiert, daß dem beweglichen Gliede nur eine mehr oder weniger bestimmte Bewegungsform übrig bleibt. Da indessen die Knorpelüberzüge der Gelenkflächen elastisch nachgiebig, die Bänder elastisch dehnbar sind, so ist auch die Bedingung einer bestimmten Bewegungsform in einem tierischen Gelenk immer nur mit einer gewissen Annäherung verwirklicht. Im Gegenteil bestehen sogar gewisse Gelenkverbindungen, deren ganze Beweglichkeit auf der Nachgiebigkeit des Materials beruht. Für die Bewegung dieser Verbindungsarten läßt sich dann keine bestimmte Form als typisch angeben, und ihre Bewegung hängt ganz und gar von Größe und Richtung der auf sie wirkenden Kräfte ab. Diese Gelenke unterscheiden sich von den anderen dadurch, daß ihnen eine bestimmte Ruhe- oder Gleichgewichtslage zukommt, die sie einnehmen, sobald keine äußeren Kräfte auf sie einwirken, während die ausgebildeten Gelenke innerhalb ihrer Bewegungsfreiheit in jeder beliebigen Stellung verharren können.

Der Typus eines Gelenkes der vorerwähnten Art ist ein elastisch biegsamer Stab. Solche Verbindungen finden sich an vielen Stellen des Körpers aus hyalinem Knorpel hergestellt, und werden als Synchrondrosen bezeichnet. Ihre Beweglichkeit ist desto größer, je länger und schwächer, desto kleiner, je dicker und kürzer die Knorpelmasse ist¹⁾. Wo die Knorpelmasse nur eine dünne Schicht bildet, kann die Beweglichkeit ganz schwinden, und die Verbindung ist dann der starren Verbindung von Knochen untereinander, durch Naht (Sutura), Harmonie (Harmonia) oder Einkeilung (Gomphosis), gleichzustellen. Eine freiere Beweglichkeit derselben unregelmäßigen Art entsteht, wenn an Stelle des elastischen Knorpels die schmiegsamere Bandmasse tritt (Syndesmosis), auch hier kann aber, wenn die Verbindung sehr kurz und dabei über eine größere Fläche verbreitet ist, die Beweglichkeit nahezu verschwinden (Symphysis). Alle die genannten Formen werden als Amphiarthrosen zusammengefaßt gegenüber den eigentlichen Gelenken oder Diarthrosen.

Der Bewegungsform nach schließen sie sich auch solchen ausgebildeten Gelenken an, bei denen die Form der Flächen und die Bandverbindung nur sehr geringe Ausschläge erlaubt, so daß im wesentlichen die Elastizität der Bänder für die Bewegung maßgebend ist (Amphiarthrosen im engen Sinne). Daher werden diese Gelenke auch als Halbgelenke bezeichnet. Die Abgrenzung zwischen Synchrondrosen oder Symphysen einerseits und Diarthrosen andererseits ist eine rein anatomische Aufgabe, da sie sich der Bewegungsform nach nicht unterscheiden.

Alle ausgiebigeren Bewegungen der Körpergliedmaßen werden durch eigentliche Gelenke, Diarthrosen, vermittelt. Der Grad der Beweglichkeit ist ein deutlich verschiedener, und es liegt daher nahe, die Gelenke nach dem Grade der Bewegungsfreiheit einzuteilen. Dies ist daher auch allgemein gebräuchlich, indem die Gelenke mit Bewegungsfreiheit vom ersten, zweiten und dritten Grade als ein-, zwei- und dreiaxige unterschieden werden. Aber

¹⁾ C. Ludwig, Lehrb. d. Physiol. 1, 367, Heidelberg 1852.

die Eigentümlichkeiten der Gelenkmechanismen werden durch diese Einteilung nur ganz im allgemeinen bezeichnet, so daß man im einzelnen eine viel größere Zahl besonderer Typen unterscheiden muß.

3. Kugelgelenk.

Es mag dabei das Gelenk von drei Graden der Freiheit, das dreiachsige oder Kugelgelenk, den Anfang machen, da es sich am genauesten an die theoretisch behandelten Grundsätze annähert. In diesem Gelenk ist sicher ein Punkt des beweglichen Gliedes dadurch im Raume festgestellt, daß er den Mittelpunkt eines kugelförmigen Gelenkkopfes bildet, der gegen eine mehr oder minder tiefe, mehr oder minder genau schließende Gelenkpfanne durch den Gesamtdruck der umgebenden Weichteile ausgedrückt ist. Der Gelenkkopf kann sich in der Pfanne frei nach allen Seiten so weit drehen, bis der Hals an den Rand der Pfanne stößt. Daher ist, praktisch gesprochen, die Bewegungsfreiheit des Kugelgelenkes um so größer, einen je größeren Abschnitt einer ganzen Kugelfläche der Gelenkkopf darstellt, und einen je kleineren die Pfanne. Beispiele dieses Gelenkes sind Hüft- und Schultergelenk.

Entsprechend der Bezeichnung als Gelenk vom dritten Grade der Bewegungsfreiheit wird das Kugelgelenk auch als ein „dreiachsiges Gelenk“ bezeichnet. Das bedeutet, daß der bewegte Körperteil Drehungen um drei zueinander senkrechte Achsen auszuführen vermag. Eigentlich ist dies nur eine andere Art, die Bewegungsfreiheit vom dritten Grade zu beschreiben.

Praktisch entsteht ein gewisser Unterschied insofern, als man sich die drei Achsen auch in ihrer Lage zum Gesamtkörper vorstellen kann. So wird die Beweglichkeit des Hüftgelenkes etwa dadurch angegeben, daß man ihm Bewegungsfreiheit um eine frontale Achse, die Flexionsachse, eine sagittale Achse, die Abduktionsachse, und eine vertikale Achse, die Rotationsachse, zuschreibt. Diese Angaben passen aber offenbar nur auf eine bestimmte Stellung, nämlich die aufrechte Stellung des Körpers mit vertikal nach abwärts gerichtetem Oberschenkel. Was also an Anschaulichkeit bei dieser Bezeichnung gewonnen ist, geht an allgemeiner Anwendbarkeit wieder verloren.

Man kann allerdings die Anschauung von den drei Achsen festhalten, indem man sie sich beliebig, aber stets aufeinander senkrecht, durch den Gelenkmittelpunkt gelegt denkt, und zwar so, daß sie als sogenannte „instantane Achsen“ auch ihre Lage während der Bewegung ändern. Von diesen beliebigen Lagen hat diejenige für die Anschaulichkeit einen besonderen Vorzug, bei der die eine Achse mit der Längsachse des bewegten Gliedes zusammenfällt. Die Bewegung um diese Achse hat die Eigentümlichkeit, daß dabei das Glied seine Lage im Raume nicht ändert, und sie wird deshalb als „Rotation“ oder „Rollung“, mitunter auch „Torsion“, unterschieden. Die Gelenke, die ausschließlich einer solchen Bewegung dienen, die Drehgelenke, bilden daher auch eine besonders zu unterscheidende Gruppe, obschon sie der Form nach von anderen Gelenken ersten Grades nicht verschieden sind.

Außer durch Kugelgelenke kann Beweglichkeit vom dritten Grade der Freiheit, ebenso wie die von anderen Graden, auch durch das Zusammenwirken mehrerer Gelenke hervorgebracht werden. Hiervon wird weiter unten die Rede sein.

4. Eigelenk.

Gelenkverbindungen von zwei Graden der Freiheit sind im Körper an verschiedenen Stellen auf verschiedene Weise, aber nur in einem gewissen Grade der Vollkommenheit ausgebildet. Als erste Art sei das sogenannte Eigelenk (Ellipsoidgelenk, Sphäroidgelenk) angeführt, von dem das Gelenk zwischen Unterarm und Handwurzel ein Beispiel gibt. An Stelle der Kugel tritt hier ein länglichrundes Gebilde, von dem das Gelenk seinen Namen hat, und zwar steht die lange Achse dieses Gebildes quer zur Längsrichtung des Gliedes. Der länglichrunde oder eiförmige Gelenkkopf liegt in einer mit gewisser Annäherung anschließenden Pfanne. Ganz ähnlich wie beim Kugelgelenk ist durch diese Gelenkform die Mitte des beweglichen Gelenkkopfes in der Pfanne festgestellt. Aber wegen der ungleichen Länge des größten und kleinsten Durchmessers des Gelenkkopfes ist es klar, daß er in der Pfanne nicht frei drehbar sein kann. Seine Bewegung beschränkt sich daher im wesentlichen auf Drehungen um seinen größten und kleinsten Durchmesser. Es läßt sich nun auf rein geometrischem Wege beweisen, daß ein eiförmiger Körper in einer genau passenden Pfanne überhaupt nur um seinen größten Durchmesser gedreht werden kann. Soll auch Bewegung um den kleinsten Durchmesser möglich sein, so muß man von dem genauen Zusammenschließen der Flächen absehen. Wenn aber die Flächen nicht genau schließen, ist immer auch eine gewisse Freiheit zur Drehung um die Längsachse, zur „Rollung“ (Rotations- oder Torsionsbewegung) vorhanden. Mithin ist auch diese Gelenkform streng genommen nicht als ein zweiachsiges Gelenk anzusehen, das nur Bewegungsfreiheit vom zweiten Grade gestattet. Doch ist dies wiederum dadurch gerechtfertigt, daß die bestehende Rotationsfreiheit in den Eigelenken nicht ausgenutzt wird, so daß tatsächlich nur Bewegung im Gebiete des zweiten Freiheitsgrades vorkommt.

Das Eigelenk weicht übrigens auch insofern von den Anforderungen der Theorie ab, als auch bei den Drehungen um den größten und kleinsten Durchmesser offenbar nicht genau derselbe Punkt im Innern des Gelenkkopfes in Ruhe bleibt, denn der Krümmungsmittelpunkt liegt für den kleinen Durchmesser viel näher an der Gelenkfläche als für die flachere Krümmung in der Richtung des großen Durchmessers.

Fragt man sich, welche Flächenform bei einem schließenden Eigelenk mit der geringsten Zusammenpressung des Knorpels eine gegebene Bewegungsfreiheit vom zweiten Grade ergibt, so kommt man nach O. Fischer¹⁾ auf eine neue besondere Eigenschaft dieser Gelenke. Da, wie aus obigem ersichtlich, die Bewegungsbedingungen für Drehung um die große und kleine Achse des Sphäroids verschieden sind, ergibt sich für alle Bewegungen in den dazwischen liegenden Richtungen eine ungleichmäßige Zusammenpressung, deren Einseitigkeit sich vermindert, wenn zugleich mit der Verschiebung der Gelenkflächen aufeinander eine gewisse Rotation ausgeführt wird. Selbstverständlich wird umgekehrt die Elastizität des Gelenkknorpels bei einem solchen Gelenk stets die betreffende Rotationsstellung hervorbringen müssen, bei der die Zusammendrückung ein Minimum ist. Die Gelenkform bedingt mithin für jede schiefe Bewegung der Gelenkflächen aufeinander auch eine gewisse Rotation, deren Größe zu der Größe der Verschiebung in einem bestimmten Verhältnis steht. Dies ist ganz dasselbe, was von den Bewegungen des

¹⁾ O. Fischer, Über Gelenke von zwei Graden der Freiheit, Arch. f. Anat. 1897, Suppl., S. 242.

Augapfels unter dem Namen des Listingschen Gesetzes bekannt ist. Man kann daher das Ergebnis der Betrachtung einfach so ausdrücken, daß ein in einem Eigelenk beweglicher Körperteil bei seiner Bewegung das Listingsche Gesetz befolgt.

5. Sattelgelenk.

Ganz dieselbe Bewegungsform wird nun, wie Adolf Fick¹⁾ zuerst gefunden hat, noch durch einen anderen Gelenktypus vermittelt, nämlich durch Gelenke mit sattelförmigen Flächen, durch „Sattelgelenke“. Die Form der Fläche ist hier, wie der Name besagt, sattelförmig, und zwar ist das ganze Gelenk der Berührung von zwei mit den Rückenflächen quer aufeinander gelegten Sätteln vergleichbar. Es ist also hier keine eigentliche Pfanne vorhanden, sondern nur ein in einer Richtung hohler, in der anderen gewölbter Rücken. Man kann, da sich das Sattelgelenk hinsichtlich der Bewegungsform ganz ähnlich wie das Eigelenk verhält, das Sattelgelenk auffassen als ein Eigelenk, bei dem an Stelle der in zwei senkrechten Richtungen konvexen eiförmigen Fläche die nur in einer Richtung konvexe, in der darauf senkrechten konkave Fläche getreten ist. Was von der Rotationsmöglichkeit beim Eigelenk gesagt worden ist, gilt für das Sattelgelenk genau ebenso²⁾. Was die Lage des Drehpunktes des bewegten Gliedes betrifft, so folgt aus der Krümmung der Sattelfläche, daß der ruhende Punkt bei der Bewegung des Gliedes in der Richtung seiner konvexen Krümmung ganz wie beim Eigelenk in der Mitte dieser Krümmung, also in dem Gelenkende des bewegten Knochens liegt, aber bei Bewegung in der Richtung der konvexen Fläche in der Mitte des ruhenden Knochens in der (hier in dieser Richtung konvexen) „Pfanne“. Das einzige gut ausgeprägte Beispiel eines Sattelgelenkes bildet die Verbindung zwischen *Os Multangulum maius* und *Metacarpus pollicis*.

Eine andere Form des zweiachsigen Gelenkes ist das freie Zylindergelenk, bei dem die Flächen vollkommen zylindrisch sind, und mithin drehende Bewegung um eine Achse zulassen, während zugleich die Freiheit besteht, daß die eine Fläche längs der anderen gleiten kann. Diese Gelenkform stellt das Ringknorpelgelenk des Kehlkopfes dar. Sie läßt sich aus dem Typus des Eigelenkes ableiten, indem man den Zylinder als eine ins Unendliche in die Länge gezogene Kugelfläche auffaßt. In diesem Falle ist die Übereinstimmung der Gelenkmechanik mit den theoretischen Bedingungen der Bewegungsfreiheit vom zweiten Grade eine fast vollkommene zu nennen, da Bewegung um zwei Achsen (die allerdings nicht durch denselben Punkt gehen, sondern von denen die zur Längsrichtung des Zylinders senkrechte in unendlicher Entfernung zu denken) möglich, Rollung aber ausgeschlossen ist.

6. Scharniergelenk, Drehgelenk, Schraubengelenk.

Die Gelenke mit Bewegungsfreiheit vom ersten Grade, oder die einachsigen Gelenke, sind im Körper viel häufiger vertreten und lassen mehrere verschiedene Formen erkennen.

Eine dieser Formen wird gemeinhin als Zylinder- oder Walzengelenk bezeichnet, doch gibt es wohl nur ein Gelenk mit wirklich zylindrischer Fläche,

¹⁾ A. Fick, Über Gelenke mit sattelförmigen Flächen, Zeitschr. f. rat. Med. 4 (1854); Die Medizinische Physik, Braunschweig 1885. — ²⁾ R. du Bois-Reymond, Über das Sattelgelenk, Arch. f. Physiol. 1895, S. 433; Über die Oppositionsbewegung, ebenda 1896, S. 154; Nachtrag in der Abhandlung: Über das Sattelgelenk, ebenda 1897, S. 426.

nämlich das oben erwähnte Gießbeckenknorpelgelenk. Bei allen übrigen sogenannten Zylindergelenken ist die angeblich zylindrische Fläche durch eine sogenannte Leitfurche in eine Sattelfläche verwandelt. Es würde daher in vielen dieser Gelenke, gerade wie in einem Sattelgelenk, Bewegung vom zweiten Grade der Freiheit stattfinden können, wenn nicht als ein wesentliches Merkmal der in Rede stehenden Gelenkform starke und straffe Seitenbänder vorhanden wären, die jede seitliche Bewegung ausschließen.

Passender ist daher die von der Bewegungsform hergenommene Bezeichnung Scharniergelenke (oder mit dem deutschen Kunstwort Gewerbe- oder Gewindgelenke). Obschon die Fläche des Gelenkkopfes nicht zylindrisch ist, ist sie doch drehrund, jeder Querschnitt hat reine Kreisform, und indem dieser Form des Gelenkkopfes die der Pfanne genau entspricht, sichert die Berührung der Flächen genau in derselben Weise die Lage einer festen Achse im Raume, wie in dem oben besprochenen Falle des Kugelgelenkes die Kugelfläche die Lage eines festen Punktes bestimmt. Beispiele dieses Gelenkes bieten die Fingergelenke, das Sprunggelenk und andere mehr.

Eine zweite Form des einachsigen Gelenkes ist das Zapfengelenk (Drehgelenk), dessen Mechanismus ganz derselbe ist wie der des Gewerbe- oder Gewindgelenkes, nur daß die Richtung des Knochens, um dessen Bewegung es sich handelt, in die Längsrichtung des Zylinders fällt. Statt einer Winkeldrehung um die Achse des Gelenkes findet daher eine bloße Rollung des bewegten Knochens um seine eigene Längsachse statt. Bei dieser Form sind Seitenbänder nicht wesentlich. Das vornehmste Beispiel bildet die Verbindung des *Capitulum radii* mit der Incisur der Ulna und dem *Ligamentum anulare*.

Diese beiden Formen können dadurch, daß die Leitfurche schief über die Zylinderfläche hinzieht, und auf diese Weise einen Schraubengang bildet, in zwei Formen des Schraubengelenkes übergehen. Die Bewegung hat dabei die Eigentümlichkeit, daß sie in Drehung um eine feste Achse besteht, mit der zugleich eine Parallelverschiebung längs der Achse verbunden ist. Als ein höherer Grad von Bewegungsfreiheit erscheint aber diese Bewegung nicht, weil die Verschiebung auf der Achse nicht frei, sondern durch die schräge Leitfurche erzwungen ist. Die Bewegung längs der Achse kann daher nicht beliebig zu der Drehung hinzugefügt werden und vermehrt daher auch nicht die Freiheit. Als Beispiele der ersten Art Schraubengelenke sind zu nennen das Sprunggelenk, das indessen beim Menschen mehr einem reinen Gewerbe- oder Gewindgelenk gleicht, das Ellenbogengelenk, bei dem indessen die Schraubenform nur als individuelle Eigentümlichkeit vorkommt¹⁾. Als ein Drehgelenk mit Schraubencharakter ist nach Henke das gemeinsame Gelenk zwischen Zahnfortsatz und Condylen des Epistropheus einerseits und Atlas andererseits aufzufassen.

Wenn der Querschnitt des Gelenkkopfes an Stelle der kreisförmigen Krümmung eine nach der Streckseite abnehmende Krümmung zeigt, so daß die Form des Querschnittes eine Spiralkurve bildet, so geht das Gewerbe- oder Gewindgelenk in das sogenannte Spiralgelenk über, das die Eigentümlichkeit hat, daß bei der Streckung infolge des zunehmenden Abstandes der Fläche von ihrer ursprünglichen Krümmungsachse der bewegte Knochenteil von der ursprünglichen Drehungsachse des Gelenkes abrücken muß. Dadurch werden die Seitenbänder angespannt und das Gelenk, das in der Beugstellung, in der die Berührung der Knochen an der Stelle der stärksten

¹⁾ J. W. Hultkranz, Das Ellenbogengelenk und seine Mechanik, Jena 1897, S. 74.

Krümmung stattfindet, schlottert, steht in der Streckstellung fest. Für diesen Mechanismus bildet, wenn man von mannigfachen besonderen Verhältnissen absieht, das Kniegelenk ein Beispiel¹⁾.

7. Ginglymarthrodie.

An dieser Stelle möge als eine Gelenkform für sich die sogenannte Ginglymarthrodie erwähnt werden. Diese wird beschrieben als mit einem teils walzenartigen, teils kugelförmigen Kopfe versehen und soll an der Basis der Finger zu finden sein. Die hier vorhandenen Gelenkköpfe sind aber, soweit die Flächenform überhaupt bestimmbar ist, ganz kugelförmig, und wenn trotzdem in gebeugter Stellung keine seitliche Bewegung stattfinden kann, so liegt dies nicht an der Form der Fläche, sondern daran, daß sich in dieser Stellung die Seitenbänder spannen. Der Mechanismus ist also ganz ähnlich dem des Spiralgelenkes, nur daß die Spannung hier nicht durch eine Abweichung der Fläche von der gleichmäßigen Gestalt, sondern durch eine exzentrische Anheftung der Bänder hervorgerufen wird.

8. Wackelgelenk, Doppelgelenk, zusammengesetztes und kombiniertes Gelenk.

Soweit entspricht wenigstens ungefähr der Bau der Gelenke einfachen Mechanismen, die die mathematischen Bedingungen der Bewegungsfreiheit der ersten drei Grade erfüllen. Es kommt nun aber eine Reihe weiterer Gelenkformen vor, die man nicht von diesem Gesichtspunkte aus betrachten kann. Bei diesen ist weder die Form des Mechanismus noch die der Bewegung irgend einer vorherrschenden Richtung angepaßt. Solche Gelenke werden als Wackelgelenke oder Gelenke mit unbestimmten Achsen bezeichnet. Vom mechanischen Standpunkt sind diesen Gelenken zuzurechnen die sogenannten Doppelgelenke, bei denen durch Einschiebung eines Zwischenknorpels zwischen die beiden Gelenkteile der gangbestimmende Einfluß der Flächenform stark beeinträchtigt ist. Andererseits kann durch solche Einschiebung die Freiheit der Bewegung so weit vermehrt werden, daß sie über den dritten Grad hinausgeht, und zwar gleich bis zum fünften. Dieser Grad der Bewegungsfreiheit besteht darin, daß ein Punkt des beweglichen Körpers nur innerhalb einer bestimmten Fläche bewegt werden kann, während der Körper sich im übrigen frei um diesen Punkt drehen kann. Beim Doppelgelenk besteht ähnliches, insofern der Gelenkkopf auf dem Zwischenknorpel frei beweglich ist, und der Zwischenknorpel selbst auf der Pflanne umherzugleiten vermag. Der Begriff des Doppelgelenkes kann auch auf solche Fälle ausgedehnt werden, bei denen an Stelle eines bloßen Zwischenknorpels größere Knochenteile zwischen zwei Gelenke eingeschaltet sind. Hierbei ist die Zunahme der Bewegungsfreiheit im eben erörterten Sinne sehr merklich. Ein Beispiel hiervon gewährt die Einschiebung der Handwurzelknochen zwischen Hand und Unterarm. Als Kennzeichen dieses Falles ist der Umstand anzusehen, daß dem eingeschobenen Zwischenstück keine selbständige Bewegungen durch daran angreifende Muskeln zukommen.

¹⁾ W. u. E. Weber, Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge, 2. Teil, Göttingen 1836, § 68.

An diese Darstellung des Doppelgelenkes schließt sich die Betrachtung der Bewegungsweise mehrfacher Gelenke überhaupt an. Einen Fall solcher gemeinsam wirkenden mehrfachen Gelenke bildet die Wirbelsäule mit ihren vielen Einzelgelenken. Für gewisse Zwecke ist diese Anschauung auch auf die Reihe sämtlicher Gelenke einer Extremität zu übertragen, nämlich wenn es gilt, die Bewegungsfreiheit des letzten Gliedes der Extremität zu ermitteln. Es ist klar, daß diese sich summiert aus den Bewegungsmöglichkeiten aller proximal gelegenen Gelenke, und daß die dazwischen liegenden Knochen, was die bloße Form der Bewegung betrifft, Schaltstücke darstellen, die dem Zwischenknorpel eines Doppelgelenkes analog sind. Volkmann¹⁾ hat zuerst die auf diese Weise entstehende Gesamtbeweglichkeit einzelner Körperteile untersucht.

Es sind schließlich noch zwei Arten der Gelenkverbindung zu nennen, für die man besondere Bezeichnungen eingeführt hat, ohne daß dazu eigentlich Ursache war. „Zusammengesetztes Gelenk“ nennt man ein Gelenk, in dem mehrere physiologisch unabhängige Mechanismen eine anatomische Einheit bilden, wie z. B. das Ellenbogengelenk, das Hand- und Fußgelenk.

„Kombiniertes Gelenk“ nennt man solche Gruppen von Gelenken, die gemeinsam einen einheitlichen Mechanismus bilden, obschon sie örtlich getrennt sind. Als Beispiel werden gewöhnlich die Kiefergelenke angeführt, doch können gerade diese auch als Einzelgelenke bewegt werden. Ein besseres Beispiel bildet das proximale und distale Gelenk zwischen Radius und Ulna, in denen bei der Pronation und Supination gleichzeitige Drehung stattfindet. Beliebige andere Gelenke, z. B. die Hüftgelenke beim Rumpfbiegen, die Schulter- und Ellenbogengelenke bei gleichartiger Tätigkeit können mit demselben Recht als „kombiniertes Gelenk“ zusammengefaßt werden.

II. Bewegung eines Einzelgliedes gegen den Gesamtkörper in einer Ebene.

1. Drehungsmoment der Schwere.

Soll nun die Bewegung eines einzelnen Gliedes gegen den im übrigen starr und unbeweglich gedachten Körper betrachtet werden, so kann diesem Gliede durch Vermittelung irgend eines der erwähnten Gelenkmechanismen ein verschiedener Grad der Bewegungsmöglichkeit verliehen sein. Die Betrachtung wird offenbar um so einfacher ausfallen, je geringer die Bewegungsfreiheit des betreffenden Gliedes ist. Es soll daher zuerst die Bewegungsfreiheit vom ersten Grade, also die Bewegung des Gliedes um eine feste Gelenkachse, betrachtet werden. Um eine konkrete Vorstellung von einem entsprechenden Falle zu gewinnen, denke man sich den ganzen Körper mit Ausnahme des einen Ellenbogengelenkes starr und unbeweglich und nur den einen Unterarm samt der Hand, als ein einziges wiederum in sich starr gedachtes Glied, beweglich, und zwar soll die Beweglichkeit, wie es tatsächlich beim Ellenbogengelenk annähernd zutrifft, auf eine Ebene (sagittale Ebene) beschränkt sein. Statt auf den menschlichen Körper, an dem die zu betrachtenden mechanischen Verhältnisse nur in angenähertem Maße aufgefunden werden, kann man die nachfolgenden Betrachtungen mit Vorteil

¹⁾ Volkmann, Über die Drehbewegung des Körpers, Virchows Arch. 56, 467, 1872.

auf ein Modell beziehen, das aus einer größeren starren Masse (dem Rumpf) besteht, an der eine kleinere längliche Masse (der Arm) in einem genau gearbeiteten Scharnier beweglich befestigt ist.

Um zu möglichst einfachen und bestimmten Vorstellungen zu gelangen, sei neben diesen Annahmen nun auch noch die gemacht, daß der Arm als eine einzige, um den Gelenkpunkt in der angenommenen (sagittalen) Ebene bewegliche gerade Linie gedacht werde, auf der der Schwerpunkt des Armes, der Angriffspunkt der bewegenden Muskelkraft und der Gelenkpunkt selbst gelegen sind. Diese Annahmen pflegt man bei den meisten Betrachtungen über die Bewegung der natürlichen Gliedmaßen vorauszusetzen, indem man von der „Längsachse“ des betreffenden Gliedes spricht.

Es verdient erwähnt zu werden, daß O. Fischer, indem er die Längsachse als die Verbindungslinie zwischen den wirklichen Bewegungsmittelpunkten der Endgelenke jedes Gliedabschnittes definierte und die Lage der Gliedschwerpunkte zu diesen Linien bestimmte, so geringe Abweichungen fand, daß die obige Annahme für die Schwerpunkte als tatsächlich zutreffend bezeichnet werden darf.

Wenn nun der Körper aufrecht steht und das mit ihm gelenkig verbundene Glied senkrecht herabhängt, so wirkt die Schwere des Gliedes als eine in dessen Schwerpunkt angreifende lotrecht nach unten gerichtete Kraft. Diese Kraft findet in der Befestigung des Gliedes am Gelenk einen Widerstand, den man sich als eine genau ebenso stark wie die Schwere in entgegengesetzter Richtung wirkende Gegenkraft vorstellen kann. Diese beiden Kräfte heben einander auf, so daß das Glied in Ruhe verharret. Der Widerstand oder die Gegenkraft wird unmittelbar von dem Körper geleistet, der wiederum einen Rückhalt an der Unterlage findet, auf der er steht, so daß die Schwere des Gliedes sich durch den Körper auf die Unterlage überträgt, oder, wie man es gewöhnlich ausdrückt, sich zur Schwere des Körpers addiert.

Denkt man sich das Glied nun nicht senkrecht hängend, sondern in einer schrägen Lage, so bleibt die Wirkung der Schwere dieselbe, und es besteht infolgedessen wie vorhin eine auf das Glied im Schwerpunkt senkrecht nach unten wirkende Kraft, und eine gleich große im Gelenkpunkt senkrecht nach oben wirkende Kraft. Nur heben die beiden Kräfte einander in diesem Falle nicht auf, sondern sie bilden ein sogenanntes Kräftepaar, dessen Wirkung darin besteht, in dem Gliede ein Drehungsbestreben hervorzubringen.

Unter Drehung ist hier Bewegung des Gliedes um eine Querachse zu verstehen. Der Unterarm dreht sich, wenn er gebeugt und gestreckt wird, um die Ellenbogengelenkachse. Drehung um die Längsachse wird als „Rollung“ unterschieden.

Die Größe dieser drehenden Einwirkung heißt das Drehungsmoment des Kräftepaares und wird gemessen durch die Größe der einen Kraft multipliziert mit dem Abstand der Angriffspunkte der Kräfte, senkrecht zur Richtung der Kräfte gemessen.

Infolge dieses Drehungsmomentes hat das Glied in der gedachten schrägen Lage das Bestreben, durch Drehung um den Gelenkpunkt in die senkrechte Lage überzugehen. Je mehr sich die schräge Lage der senkrechten nähert, desto kleiner wird das Drehungsmoment, weil der Abstand der beiden Kräfte (senkrecht zu ihrer Richtung, d. h. in diesem Falle waagrecht, gemessen) immer kleiner wird.

2. Drehungsmoment eines Muskels.

Im lebenden Körper sieht man bekanntlich die Gliedmaßen häufig in beliebiger schräger Stellung annähernd in Ruhe verharren. In diesen Fällen muß durch innere Kräfte dem Drehungsmoment der Schwere Widerstand geleistet werden. Dies geschieht, indem durch die Anspannung der Muskeln Zugkräfte ausgeübt werden, die ein dem Drehungsmoment der Schwere gleiches aber entgegengesetztes Drehungsmoment hervorbringen. Dann heben die beiden Drehungsmomente einander gegenseitig auf, und das Glied verharrt in Ruhe. Einfacher pflegt man zu sagen, der Zug des Muskels hält dem Zug der Schwere das Gleichgewicht.

Um die Wirkungsweise eines Muskels ganz im allgemeinen zu untersuchen, empfiehlt es sich, eine Reihe vereinfachender Annahmen zu machen¹⁾. Ebenso wie oben das Glied als ein starrer Körper, das Gelenk als eine einzige scharf bestimmte Achse betrachtet wurde, soll die Muskelwirkung als eine auf einer einzigen Linie wirkende Zugkraft aufgefaßt werden, die an einem einzigen Punkte des Gliedes angreift. In Wirklichkeit bestehen zwar ganz andere Verhältnisse, doch darf man sagen, daß in jedem Augenblicke die Wirkung selbst größerer Muskelgruppen durch eine einzige solche ideale lineare Kraft ersetzt gedacht werden kann.

Bei der Auffassung des zu bewegenden Teiles als Linie und des bewegenden Muskels als lineare Zugkraft kann eine vollkommene Übereinstimmung zwischen Zugrichtung und Richtung des Knochens vorkommen. Dieser Fall ist in Wirklichkeit unmöglich, weil die Dicke der Knochen und der Muskeln nur eine seitliche Anlagerung, keine absolute Übereinstimmung der Lage erlaubt. Die Annahme hat aber trotzdem nichts unnatürliches, sie stellt nur eine Über-treibung der Verhältnisse dar, die in etwas geringerem Grade auch bei möglichst großer Annäherung des ziehenden Muskels an den Knochen eintreten.

Denkt man sich den Muskelzug im Schwerpunkt des Gliedes angreifend, so ist es klar, daß er, wenn er ebenso stark wie die Schwere senkrecht nach

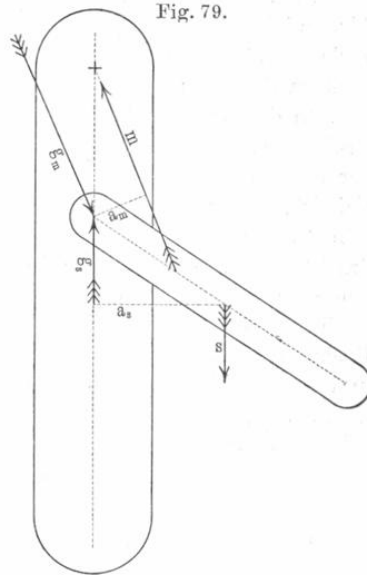


Fig. 79.

Gleichgewicht zwischen Schwere und Muskelzug.

Der Muskelzug m ruft im Gelenkpunkt eine ihm gleiche parallele entgegengesetzte Kraft g_m hervor, mit der er ein Kräftepaar bildet, dessen Moment $m \cdot a_m$ das Glied nach oben zu drehen strebt. Die Schwere s , die im Schwerpunkt des Gliedes wirkt, ruft im Gelenkpunkt eine ihr gleiche entgegengesetzte parallele Gegenkraft g_s hervor, mit der sie ein Kräftepaar bildet, dessen Moment $s \cdot a_s$ das Glied abwärts zu drehen strebt.

¹⁾ Es könnte auffallen, daß in der vorliegenden Darstellung fast ausschließlich von schematisch vereinfachten Verhältnissen die Rede ist. Um Mißverständnisse zu vermeiden, sei hierzu bemerkt, daß die Gesetze der Muskelmechanik, wie sie an anderen Stellen etwa geradezu am Fall der Muskeln und Knochen erläutert werden, eben dieselben sind, die, streng genommen, nur unter den hier ausdrücklich aufgeführten Vereinfachungen gültig sind. Die Abweichungen, die in jedem praktischen Falle eintreten, sind verhältnismäßig leicht für den einzelnen Fall in Anschlag zu bringen.

oben sieht, der Schwere das Gleichgewicht halten wird. Ist er stärker als die Schwere, so wird nur ein Teil des Muskelzuges durch die Schwerkraft aufgehoben, ein anderer Teil bleibt wirksam. Dieser strebt das Glied nach oben zu ziehen, und ruft, ganz wie vorhin die Schwere, in dem Gelenk eine ihm gleiche und entgegengesetzte Druckkraft hervor, mit der er ein Kräftepaar bildet, dessen Drehungsmoment gemessen wird durch das Produkt: Größe der Muskelkraft vermindert um die der Schwere multipliziert mit dem Abstände (wagerecht gemessen) des Gelenkes von dem Muskel. In diesem Falle strebt also das Glied unter dem Einfluß des Muskelzuges sich nach oben zu drehen und die Lage senkrecht nach oben einzunehmen.

In diesem Falle hat der Muskelzug, der stärker ist als die Schwere, ein Drehungsmoment erzeugt, das der Schwere entgegengesetzt ist. Wenn nun der Muskelzug nicht im Schwerpunkte des Gliedes, sondern wie es meist der Fall ist, näher am Gelenkpunkte angreift, so wird dadurch im allgemeinen sein Drehungsmoment vermindert, weil der wagerecht gemessene Abstand des Muskels vom Gelenkpunkte geringer wird. Auf diese Weise kann die angenommene größere Kraft des Muskelzuges gegenüber der Schwere ausgeglichen werden, so daß Gleichgewicht besteht. Es ist dann eben das Drehungsmoment der Schwere, also das Produkt der Größe der Schwerkraft und ihres Abstandes von dem Gelenkpunkte gleich dem des Muskelzuges, nämlich dem Produkt der (größeren) Kraft des Muskelzuges und ihres (kleineren) Abstandes vom Gelenkpunkt.

3. Schräger Zug des Muskels.

Bis hierher ist der Muskelzug als senkrecht nach oben wirkend angenommen worden. In Wirklichkeit pflegt der Muskel, der ein Glied in Bewegung setzt, vom Rumpf oder einem fixierten oberen Gliede zu kommen, und schräg an das Glied anzugreifen.

Es soll nun dieser Fall besprochen werden, daß der Muskel zwar in der senkrechten Ebene, in der das Glied bewegt gedacht wird, verläuft, aber nicht senkrecht, sondern schräg, etwa von einem Punkte über dem Gelenk zu einem Punkte des schräg nach unten hängenden Armes verläuft. Die obige Betrachtung läßt sich ohne weiteres auch auf diesen Fall übertragen, wenn man nur beachtet, daß der eine Faktor bei Berechnung des Drehungsmomentes, nämlich der Abstand des Muskels vom Gelenkpunkt, senkrecht auf die Richtung des Muskels gemessen werden muß. Daraus ergibt sich für die schräge Richtung des Muskels ein kleinerer Abstand als für die lotrechte. Es muß also, damit das Drehungsmoment des Muskelzuges bei schräger Zugrichtung ebenso groß wird wie bei senkrechter, die Kraft des Muskels größer sein. Mit anderen Worten, die Kraft des Muskelzuges wirkt bei schrägem Zuge weniger stark drehend auf das Glied als bei senkrechtem Zuge¹⁾.

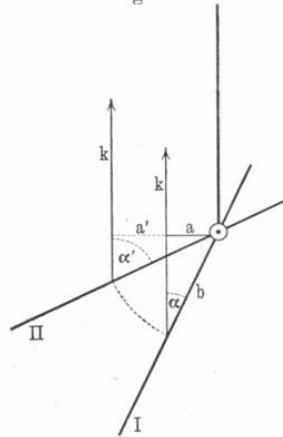
¹⁾ In diesem Punkte zeigt sich der Vorzug derjenigen Betrachtungsweise, die die Lehre vom Drehungsmoment zugrunde legt, gegenüber der, die von der Anschauung der Hebel ausgeht. Im ersten Falle ist das Drehungsmoment bei schrägem Zuge ohne weiteres auf dieselbe Weise bestimmt wie bei senkrechtem Zuge, im anderen Falle muß die Wirkung des schrägen Zuges erst nach dem Parallelogramm der Kräfte zerlegt werden, um die wirksame Größe des Muskelzuges zu finden.

Geht man nacheinander von der Stellung lotrecht nach unten bis zur Stellung lotrecht nach oben die verschiedenen Stellungen durch, die das Glied unter dem Einfluß senkrechten Muskelzuges annehmen kann, so findet man, daß für gleichbleibende Kraft und Richtung des Muskelzuges die Größe des Drehungsmomentes sich mit dem Abstände des Muskels vom Gelenkpunkt ändert. Dieser Abstand ist aber gleich dem Abstände des Muskelansatzes vom Gelenkpunkt, multipliziert mit dem Sinus des Winkels, den der Muskelzug mit deren Richtung des Gliedes macht. Wenn die Richtung des Muskelzuges und die des Gliedes zusammenfallen, wie bei lotrechter Stellung des Gliedes, ist der Winkel $= 0$ oder $= 180^\circ$, der Sinus mithin $= 0$, also auch das Drehungsmoment gleich Null, bei den dazwischen liegenden Stellungen nimmt der Winkel die dazwischen liegenden Werte an, und das Drehungsmoment verändert sich in demselben Maße wie der Sinus des Winkels, oder wie man kurz zu sagen pflegt, nach der Sinuskurve.

Diese Betrachtung zeigt, daß unter der Annahme, die für viele Fälle annähernd zutrifft, daß der Muskel mit unveränderter Richtung und gleichbleibender Kraft zöge, die Kraft, mit der der Muskel bewegend auf das Glied einwirkt, sich mit fortschreitender Bewegung nach einem bestimmten Gesetz (eben dem der Sinuskurve) ändern würde.

Es mag nun gleich hier eine Übersicht über die verschiedenen Umstände eingeschaltet werden, durch die sich die in Wirklichkeit vorhandenen Verhältnisse von den hier angenommenen unterscheiden: 1. In den wirklichen Gelenken ist die Drehachse nicht genau bestimmt, sondern ändert während der Bewegung ihre Lage. 2. Der Muskelansatz liegt wegen der Dicke des Knochens und der häufig vorhandenen Vorsprünge nicht auf der Längsachse des Gliedes, und daher ist auch der Winkel zwischen Zugrichtung des Muskels und Längsachse des Gliedes nicht ohne weiteres gegeben. 3. Die Lage des Ansatzes ist nicht genau anzugeben, weil dieser eine größere Fläche am Knochen darstellt. 4. Die Zugrichtung der verschiedenen Teile des Muskels kann erheblich verschieden sein. 5. Die Richtung des Zuges kann durch Knochenvorsprünge abgelenkt sein, so daß sie mit der des Muskels nicht übereinstimmt. Es gilt dann der allgemeine Grundsatz, daß der letzte Teil der Zugrichtung, zwischen dem bewegten Ansatzpunkt und dem ablenkenden Vorsprung, die maßgebende Richtung darstellt. Aber es kann der Fall eintreten, wie z. B. bei der Schwanzsehne des Biceps, daß die Sehne nur bei gewissen Stellungen (beim Biceps die Streckstellung des Unterarmes) auf dem Knochenvorsprung ruht, und in anderen Stellungen frei zum Ansatzpunkt verläuft. Dann ist für die ersteren Fälle die veränderte Richtung, für die zweiten die Richtung des Muskels selbst maßgebend, und der Ansatzwinkel, mithin dessen Sinus, ändert sich nicht nach der einfachen Sinuskurve, sondern

Fig. 80.



Das Drehungsmoment des Muskelzuges k ist in der Stellung I $= k \cdot a$, in der Stellung II $= k \cdot a'$. a und a' sind aber $= b \sin \alpha$ und $b \sin \alpha'$. Das Drehungsmoment verhält sich also wie der Sinus des Winkels α .

nach einer Kurve die aus zwei verschiedenen Sinuskurven zusammengesetzt ist. 6. Die Kraft des Muskelzuges selbst ist nicht gleichförmig, sondern nimmt, wie Versuche aus der allgemeinen Muskelpysiologie lehren, mit zunehmender Verkürzung sehr rasch ab.

Durch alle diese Umstände wird die Einwirkung der Muskeln im allgemeinen in der Weise verändert, daß das Drehungsmoment sich verhältnismäßig wenig ändert. Während beispielsweise nach dem oben dargestellten theoretischen Schema der Muskel bei lotrechter Stellung des Gliedes überhaupt kein Drehungsmoment ausübt, ist im praktischen Falle, beim Biceps, die Wirkung bei gestrecktem Arm nur etwa um die Hälfte schwächer als bei der günstigsten Stellung¹⁾.

4. Seitlicher Zug des Muskels.

Ebenso wie sich bei der vorhergehenden Betrachtung das Drehungsmoment des Muskels am größten zeigte, wenn der Muskelzug senkrecht auf die Längsachse des Gliedes gerichtet war, und desto kleiner, je schräger der Muskelzug gerichtet ist, ebenso fällt auch das Drehungsmoment kleiner aus, wenn der bisher außer Betracht gelassene Fall eintritt, daß die Richtung des Muskelzuges aus der Ebene, in der sich das Glied bewegt, abweicht. Bisher ist angenommen worden, daß sich das Glied in einer Sagittalebene bewege, und daß der Muskel ebenfalls seinen Ursprung und Ansatz in dieser selben Ebene habe. Nun kann aber ein Muskel auch von einer beliebig seitlich gelegenen Stelle aus an die Längsachse des Gliedes herantreten, und auf diese Weise einen im Raum schrägen Zug ausüben. Dieser schräge Zug wird ebenso wie in der obigen Betrachtung des Muskelzuges in der Bewegungsebene eine gleiche und entgegengesetzte Druckkraft im Gelenk hervorbringen, die mit ihm ein Kräftepaar bildet. Aber die Ebene, in der dies Kräftepaar liegt, wird nicht, wie oben die Sagittalebene sein, in der die Bewegung stattfindet, sondern eine schräge Ebene. Die Wirkung des schrägen Zuges wird also die sein, ein Bestreben zur Drehung des Gliedes in schräger Ebene hervorzubringen. Der ursprünglichen Annahme gemäß kann sich aber das Glied nur in sagittaler Ebene bewegen, weil es durch den Bau des Gelenkes an seitlicher Abweichung gehindert ist. Die Folge davon ist, das von der drehenden Wirkung des schrägen Zuges nur ein Teil zur Geltung kommt, und zwar der Teil, der in die Sagittalebene fällt. Man findet daher in diesem Falle das wirksame Drehungsmoment des schrägen Muskels, indem man diejenige Strecke, die Größe und Richtung seines Zuges darstellt, auf die sagittale Ebene projiziert, und das Drehungsmoment der Projektion in Rechnung bringt.

Die gleichzeitige Einwirkung mehrerer in der Bewegungsebene oder schräg zu ihr angreifender Muskeln wird einfach durch Addition ihrer einzelnen Drehungsmomente gefunden.

¹⁾ W. Braune und O. Fischer, Die Rotationsmomente der Beugemuskeln am Ellenbogengelenk des Menschen, Abhandl. d. math.-phys. Kl. d. k. sächs. Ges. d. Wissensch. 15 (3), 245, Taf. V.

III. Bewegung eines Einzelgliedes, das mit dem Körper durch ein mehrachsiges Gelenk verbunden ist.

1. Zug eines einzigen Muskels.

Alles Vorhergehende bezog sich auf die Bewegung eines Gliedes, das mit dem Körper durch ein einachsiges Gelenk verbunden gedacht war, und sich infolgedessen nur in einer (sagittalen) Ebene um die feste Achse des Gelenkes bewegen konnte. Dieser Fall tritt annähernd für die Gewerbegelenke ein, gilt also für die meisten der großen Gelenke des Körpers, nämlich Ellenbogengelenk, Kniegelenk und Fußgelenk. Außerdem aber ist die Bewegung der anderen Gelenke in sehr vielen Fällen auch auf eine Ebene beschränkt, wie z. B. die gewöhnlichen Bewegungen des Beines fast ausschließlich in der Sagittalebene vor sich gehen. Daher können die Betrachtungen über die Bewegung in der Ebene in viel ausgedehnterem Maße auf praktische Fälle angewendet werden, als die nachfolgenden über Bewegung im Raume.

Ist das Glied durch ein Gelenk vom zweiten oder dritten Grade der Freiheit mit dem Körper verbunden, so ist es im Raume beweglich, d. h. es kann nicht bloß in einer Ebene gebeugt und gestreckt, sondern auch in den auf die erste senkrechte Ebene adduziert und abduziert, und durch alle dazwischen liegenden Ebenen hindurch und darin umhergeführt werden. Diese vermehrte Bewegungsfreiheit macht aber in der Form der Bewegung, die unter der Einwirkung einer einzelnen Zugkraft (Muskel) entsteht, keinen Unterschied. Es möge, wie oben, das Modell des Körpers aufrecht stehen, das Glied wagerecht in der Sagittalebene ausgestreckt sein, und es möge ein Muskelzug in der Sagittalebene von oben her an das Glied angreifen. Der Zug des Muskels strebt den Ansatzpunkt dem Ursprungspunkt zu nähern, wenn also der Ursprungspunkt in der Sagittalebene gelegen ist, wie eben angenommen wurde, bewegt sich der Ansatzpunkt, und mit ihm die Längsachse des Gliedes in der Sagittalebene, auch ohne daß von seiten des Gelenkes ein Zwang besteht.

Wirkt aber der Muskelzug in einer beliebigen anderen Ebene, so findet vermöge der allseitigen Bewegungsfreiheit des Gliedes die Bewegung in dieser Ebene statt. Die Bewegung innerhalb dieser, durch die Richtung des Muskelzuges bestimmten Ebene geht gerade so vor sich, als sei das Gelenk ein einachsiges, das Bewegung nur in dieser Ebene gestattete.

Die umgekehrte Aufgabe, für einen gegebenen Muskelzug die Momente zu finden, die er auf drei gegebene Achsen eines dreiachsigen Gelenkes ausübt, hat A. Fick¹⁾ ausführlich bearbeitet.

2. Zug mehrerer Muskeln.

Ein wesentlicher Unterschied in der Bewegungsform eines Gelenkes von höherem Grade der Bewegungsfreiheit tritt erst ein, wenn die gleichzeitige Wirkung mehrerer Muskeln in Betracht gezogen wird. Während beim einachsigen Gelenk die Bewegung auf eine bestimmte Ebene beschränkt ist, so

¹⁾ A. Fick, Spezielle Bewegungslehre in Hermanns Handb. d. Physiol. 1, 299, Leipzig 1879.

daß die Wirkung mehrerer, in verschiedenen schrägen Ebenen liegender Muskeln sich nur zu einer Wirkung in der durch das Gelenk vorgeschriebenen (in obiger Darstellung der sagittalen) Ebene summieren kann, wird bei dem freieren Gelenk, wie eben ausgeführt, die Ebene der Bewegung durch die Zugrichtung der Muskeln selbst bestimmt. Sind nun mehrere Muskeln vorhanden, so entsteht die Frage, in welcher Ebene das Glied sich bewegen wird. Die Auflösung ist gefunden, sobald man erst für zwei Zugkräfte in verschiedenen Ebenen die gemeinsame Wirkung bestimmen kann, denn man hat es dann in der Hand, diese gemeinsame Wirkung mit der einer dritten gegebenen Zugkraft zu vereinigen, und so bis zur gemeinschaftlichen Wirkung beliebig vieler einzelner Zugkräfte zu gelangen.

Die Vereinigung zweier in beliebigen verschiedenen Ebenen unter beliebiger Richtung auf das bewegliche Glied wirkenden Zugkräfte ist nun in der Weise zu bewerkstelligen, daß man erst die beiden gegebenen Zugkräfte durch zwei Zugkräfte ersetzt, die in einem und demselben Punkt der Längsachse des Gliedes angreifen und auf diesem senkrecht stehen. Diese Umformung der gegebenen Kräfte ist in allen Fällen möglich, weil das Drehungsmoment der Kräfte in ihren Ebenen aus dem Produkt zweier Größen, der Größen der Kräfte und ihres Abstandes vom Drehpunkt besteht. Wenn man also in dem Drehungsmomente derjenigen der beiden gegebenen Kräfte, die den kleineren Abstand vom Drehpunkt hat, die Größe der Kraft in demselben Maße verkleinert, in dem der Abstand vergrößert werden muß, um dem der anderen gegebenen Kraft gleich zu sein, so hat man nun eine Ersatzkraft berechnet, die dasselbe Drehungsmoment besitzt wie die eine gegebene Kraft und dabei den gleichen Abstand vom dem Drehpunkt hat, wie die andere gegebene Kraft. Die Größe der Drehungsmomente ändert sich nun nicht, wenn man bei gleichbleibendem Abstand vom Drehpunkt die Richtung der Kräfte ändert, und folglich ist man imstande, die beiden Kräfte in ihren Ebenen so zu drehen, bis die Strecken, die den Abstand messen, in die Längsachse des Gliedes fallen. Dann hat man zwei Kräfte, die an demselben Punkte der Längsachse des Gliedes senkrecht auf dessen Richtung angreifen, und deren Wirkung der den beiden gegebenen Kräften gleich ist. Die Richtung und Größe der Gemeinwirkung beider Kräfte ist dann nach dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte als die Diagonale eines Parallelogramms zu finden, das die beiden Kräfte zu Seiten hat.

Ist so die gemeinsame Wirkung zweier auf das frei bewegliche Glied von beliebigen Stellen aus gleichzeitig wirkender Zugkräfte bestimmt, so gilt das Ergebnis nur für diejenige Stellung, in der sich das Glied in dem gegebenen Augenblick befindet. Denn indem sich das Glied unter dem Einfluß der gefundenen Gemeinkraft bewegt, wird sich die Lage der Muskeln und somit auch ihr Abstand vom Drehpunkt im allgemeinen auf ganz verschiedene Weise verändern, so daß auch die gemeinsame Wirkung andere Richtung und Größe annehmen kann. Es ist also schon unter den hier angenommenen Voraussetzungen linearer Gliedachsen und gleichartiger Zugkräfte die Bestimmung der Bewegung eines einzigen starren Gliedes in einem Gelenke von mehreren Graden der Freiheit eine verwickelte Aufgabe. Es sei nun noch ein Punkt erwähnt, der in gewissen Fällen in der Wirklichkeit besondere Beachtung verdient.

Tatsächlich setzen sich die Muskeln nicht als lineare Zugkräfte an die Längsachse des Knochens an, sondern durch Sehnen von beträchtlicher Dicke und Breite an die Oberfläche des Knochens, dessen Durchmesser nicht selten von gleicher Größenordnung ist wie beispielsweise der Abstand des Muskels vom Drehpunkt. Diese Verhältnisse können für die allgemeine Betrachtung

meist außer acht gelassen werden, besonders dann, wenn wenigstens der Ansatzpunkt des Muskels in derselben Ebene liegt wie die Längsachse des Knochens und der Ursprungspunkt. Gewisse Muskeln aber verlaufen streng genommen gar nicht auf die Längsachse des Knochens zu, sondern vielmehr seitlich an ihr vorbei, schlingen sich um den Knochen, und sind erst dann in ihrem weiteren Verlauf an einer beliebigen Stelle des Knochenumfangs befestigt. Dadurch üben sie auf den Knochen, sofern er Bewegungsfreiheit vom dritten Grade besitzt, und sich also um sich selbst zu drehen imstande ist, keine unmittelbar bewegende, sondern vermöge ihrer seitlichen (tangentialen) Anlagerung eine um die Längsachse drehende, rotierende, torquierende, „rollende“ Wirkung aus. Das vornehmste Beispiel dieser Wirkungsweise bietet die Schwanzsehne des Biceps in ihrer Anheftung an den Radius. Andere Beispiele sind insbesondere unter den Muskeln zu finden, die vom Rumpf zum Oberarm ziehen und dessen Rotation bewirken. Damit indessen durch den seitlichen Zug eine Abwicklung der Sehne, also eine Rollung des Knochens erfolgt, muß eine Gegenkraft vorhanden sein, die mit der Zugkraft des Muskels ein Kräftepaar bildet. Vermag der Knochen dem seitlichen Zuge ganz widerstandslos nachzugeben, so entsteht keine Drehung, der Muskel würde dann wirken, als griffe er an der Längsachse selbst an.

Dies kann man sich an einem Beispiel aus dem täglichen Leben vergegenwärtigen: Liegt ein leichtes Garnknäuel auf einer glatten Tischplatte, so kann man durch Anziehen des Fadens das Knäuel umherziehen, ohne daß sich der Faden abwickelt. Ist dagegen der Faden um einen schweren Gegenstand, sei es auch nur eine hölzerne Wickelrolle, gewunden, so wickelt er sich beim Anziehen ab. Das Gewicht der Rolle wirkt als eine in dem Schwerpunkte der Achse angreifende Kraft, die dem Zuge des Fadens entgegenwirkt und mit ihr ein drehendes Kräftepaar bildet.

Die Gegenkraft bei der Rollung der Gliedmaßen durch die Muskeln wird zum Teil durch die Festigkeit der Gelenke, zum Teil auch durch die Schwere der Glieder selbst gegeben. Zieht man z. B. am pronierten wagerecht ausgestreckten Arm einer Leiche die Bicepssehne an, so könnte, wenn der Unterarm gewichtlos wäre, eine einfache Bewegung des pronierten Unterarmes im Ellenbogengelenk stattfinden. In Wirklichkeit dreht sich zunächst der Radius, weil die Schwere ihn in der wagerechten Lage zurückhält, und die Beugung beginnt erst, wenn in äußerster Supinationsstellung die Drehungsmöglichkeit erschöpft ist.

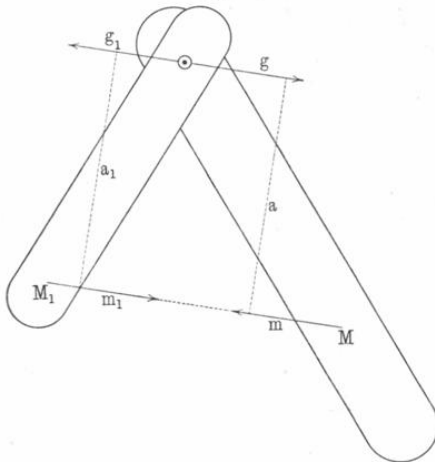
IV. Dynamische Betrachtung der Bewegung eines Einzelgliedes gegen den Körper.

Wird ein einzelnes bewegliches Glied durch vom Körper ausgehende Muskeln in Bewegung gesetzt, so entsteht durch die Bewegung selbst eine Rückwirkung auf den Körper, der daher, genau genommen, nicht vollkommen unbewegt bleiben kann. Man kann sich dies leicht veranschaulichen, wenn man bedenkt, daß der Muskelzug Ursprung und Ansatz einander zu nähern strebt, und somit am Ursprung gerade ebenso stark zieht wie am Ansatz. Für die theoretische Betrachtung kann man geradezu die Wirkung des Muskels auflösen in zwei von einander unabhängige gleiche Zugkräfte, die einander in der Richtung des Muskels entgegenstreben. Die eine greift am Ursprung,

die andere am Ansatz an. Jede ruft durch ihre Einwirkung in dem Gelenk eine ihr gleiche entgegengesetzte Druckkraft hervor, mit der sie ein Kräftepaar bildet. Diese beiden Kräftepaare streben, jedes mit gleichem aber entgegengesetztem Drehungsmoment, das eine den Körper, das andere das Glied zu drehen.

Von diesem Verhalten kann man sich anschaulicher als am Körper selbst an einem Modell überzeugen, das aus zwei gleichen, durch ein Gelenk verbundenen länglichen Massen besteht, und das man sich frei beweglich, etwa auf einer glatten Unterlage ruhend oder im Wasser schwimmend, vorstellt. Zwischen den beiden Massen sei eine starke Feder ausgespannt, und das Gelenk vorläufig auf irgend eine Weise festgestellt, so daß die Feder in gespanntem Zustande verharret. Es werde nun plötzlich das Gelenk frei gelassen, so wird die Feder zusammenfahren, und beide gelenkig verbundenen Teile, „wie ein Taschenmesser klappt“, gegen ein-

Fig. 81.



Muskelzug zwischen zwei gelenkig verbundenen freibeweglichen Gliedern.

Der Muskelzug MM_1 kann in zwei gleiche entgegengesetzte Zugkräfte m und m_1 zerlegt werden, die jede mit einer entsprechenden Gegenkraft g und g_1 ein Kräftepaar bilden, so daß der Muskelzug beide Glieder gleichmäßig zu drehen strebt, mit dem Momente $m \cdot a$ oder $g \cdot a = m_1 a_1$ oder $g_1 a_1$.

ander gezogen werden. Waren beide Teile gleich groß und gleich schwer, also mechanisch gleichwertig, so wird auch die Bewegung beider gleich sein, da vollkommene Symmetrie der Bewegungsbedingungen vorliegt. Ganz ebenso verhalten sich Körper und Glied, wenn sie durch einen dazwischen ausgespannten Muskel in Bewegung gesetzt werden.

Bei der überwiegenden Masse des Körpers fällt aber dessen Bewegung im Verhältnis zu der des Gliedes sehr klein aus. Noch kleiner wird sie, wenn der Körper durch äußere Widerstände unterstützt ist, z. B. indem er sich an eine Säule lehnt oder auch nur fest auf beide Füße stellt. Daher wird auch für gewöhnlich diese Wirkung des Muskelzuges ganz außer acht gelassen. Es kommen aber Fälle vor, wo diese Wirkung durchaus nicht bedeutungslos ist.

Wenn beispielsweise der Körper auf einer schmalen Unterlage steht, oder sich fortbewegt, kann die Verschiebung infolge der Bewegung eines Gliedes ausreichen, den Schwerpunkt über die Grenze der Unterstützungsfläche, und den ganzen Körper ins Fallen zu bringen. Zwar der Gesamtschwerpunkt kann, wie im ersten Teil ausgeführt worden ist, allein durch die Bewegung eines Teiles nicht verschoben werden, doch bringt die Bewegung eines Gliedes zusammen mit den äußeren Widerständen, die der stehende Körper an der Unterstützungsfläche findet, auch den Gesamtschwerpunkt in Bewegung. Umgekehrt kann man öfter, etwa beim Gehen auf der Kante des Straßenbordes, wahrnehmen, daß eine settliche Bewegung des steif gehaltenen Armes den Körper, der schon über die Kante hinaus kippen wollte, wieder zurückschiebt. Diese Fälle unterscheiden sich aber nur dadurch, daß der Einfluß der Bewegung besonders bemerkbar wird, von den unzähligen Fällen, bei denen trotz der Bewegung keine merkliche Störung

des Gleichgewichts eintritt. In allen diesen Fällen muß die Einwirkung der Bewegungen jedes einzelnen Gliedes auf den Gesamtkörper durch entsprechende Regulierung der Muskelspannungen kompensiert werden.

Endlich sei noch ein praktischer Fall erwähnt, der in neuester Zeit durch die Erörterung einer pathologischen Erscheinung, des sogenannten Kernigschen Symptoms, besondere Wichtigkeit erlangt hat¹⁾. Die beiden Beine, gemeinsam im Hüftgelenk gegen den Körper bewegt, stellen ein „Glieder“ dar, dessen Masse dem „Körper“ gegenüber keineswegs verschwindet. Liegt ein Mensch flach auf dem Rücken, und strebt beide Hüftgelenke zu beugen, so streben die Beugemuskeln ebenso sehr den Rumpf zu heben wie die Beine zu heben, und es hängt nur von dem größeren oder geringeren Einfluß der Schwere auf die beiden Teile des Körpers ab, ob eine oder die andere Bewegung eintritt. In der gestreckten Rückenlage überwiegt die Schwere des Rumpfes. Soll dieser aufgerichtet werden, so muß sein Drehungsmoment durch Vorwärtsbeugen vermindert, oder das der Beine durch äußere Hilfskräfte vermehrt werden.

3. Bewegung eines aus zwei oder mehr gelenkig verbundenen Abschnitten zusammengesetzten Gliedes.

I. Bewegung eines Gliedes mit zwei beweglichen Abschnitten.

1. Wirkung der Schwere.

Der Fall, daß ein einzelnes starres Glied durch ein einziges Gelenk mit dem gleichfalls starr gedachten Körper verbunden ist, kommt in Wirklichkeit nur selten vor, weil die Gliedmaßen aus mehreren Abschnitten bestehen, die meist gegeneinander beweglich sind. Um die mechanische Bedingung der Bewegung der Gliedmaßen darzustellen, empfiehlt es sich, wegen der sehr mannigfaltigen Bewegungsformen, deren die Extremitäten an sich fähig sind, vorläufig wiederum von vereinfachenden Bedingungen auszugehen, und die Mechanik eines Modells zu untersuchen, dessen Bau dem der oberen Extremität angenähert ist. Mit einer sehr großen Masse, dem Körper, sei in einem festen, einachsigen Gelenk, dem „Schultergelenk“, eine längliche Masse, der Oberarm, verbunden, an dessen Ende wiederum mit einem einachsigen Gelenk, dessen Achse der des „Schultergelenkes“ parallel sein soll, eine zweite längliche Masse, „Unterarm nebst Hand“, befestigt sein soll. Beide Achsen mögen in transversaler Richtung liegen, so daß die Kette der zwei Glieder nur in der Sagittalebene beweglich ist.

Die Mechanik eines derartigen Systems ist unverhältnismäßig verwickelter als die eines einzelnen beweglichen Gliedes. Denn außer der mannigfaltigeren Beweglichkeit können auch die einwirkenden Kräfte, die beim eingelenkigen Gliede immer auf gleiche Weise wirken, hier mannigfach verschieden sein.

Es ist in dieser Beziehung zu unterscheiden zwischen solchen Muskelzugkräften, die zwischen Körper und erstem Glied, zwischen erstem und zweitem Glied, und endlich zwischen Körper und zweitem Glied, mit Überspringung des ersten Gliedes, wirken. Die Wirkungsweise der letzteren Muskeln, die als zweigelenkige bezeichnet werden, bietet an sich eine Reihe verschiedener Bewegungsmöglichkeiten.

¹⁾ J. Grasset, Les nerfs articulomoteurs des membres etc., Revue de Médecins No. 2, 1903, p. 86.

Denkt man sich fürs erste den „Unterarm“ im „Ellenbogengelenk“ abgelöst, so stellt der Oberarm ein einziges Glied dar, auf das die Schwere in der Weise wirkt, wie oben bei Betrachtung des Einzelgliedes beschrieben worden ist, d. h. die im Schwerpunkt des Gliedes angreifende Schwerkraft bildet mit der ihr im Schultergelenk entgegenwirkenden Druckkraft des festen Gelenkes ein Kräftepaar, das den Oberarm abwärts dreht, bis sein Schwerpunkt lotrecht unter der Schultergelenkachse liegt. Um den Oberarm aus dieser Lage zu heben, bedarf es einer Kraft, die der Schwere entgegen arbeitet. Hängt nun an dem Oberarm im Ellenbogengelenk noch das zweite Glied, Unterarm nebst Hand, so ist es klar, daß bei der Hebung des Oberarms aus der lotrechten Stellung auch der Unterarm gehoben werden muß. Folglich summiert sich zu der Schwerkraft auf den Schwerpunkt des Oberarms auch noch die des gesamten „Unterarm- nebst Hand“-Gewichts, und zwar als eine im Ellenbogengelenk, also in den Verbindungspunkt der beiden Massen, angreifende Kraft. Daraus ergibt sich, daß auf den Oberarm, wenn er in Verbindung mit dem Unterarm ist, die Schwere so wirkt, als sei außer der eigenen Masse des Oberarmes, die im Schwerpunkt vereinigt zu denken ist, außerdem die ganze Masse des Unterarmes in ihm vorhanden, und im Ellenbogengelenkpunkt vereinigt. Um nun diese doppelte Schwerkraft auf eine einfachere Form zurückzuführen, denke man sich an Stelle des Oberarms einen Körper, dessen Gewichtsverteilung tatsächlich den angegebenen Bedingungen entspräche, und suche dessen Schwerpunkt auf. Dieser muß auf der Verbindungslinie vom Schwerpunkt des Oberarms und Mitte des Ellenbogengelenkes liegen und diese Linie nach dem umgekehrten Verhältnis von Masse des Oberarmes und Masse des Unterarmes nebst Hand teilen. Diesen Punkt bezeichnet O. Fischer, der zuerst die hier zu besprechenden Verhältnisse untersucht hat, als den Hauptpunkt des Oberarmes¹⁾. Die Schwere wirkt also auf den in gelenkigem Zusammenhang mit dem Unterarm befindlichen Oberarm so, als ob sie in dem Hauptpunkt mit der Kraft angriffe, die dem Gewichte des ganzen Armes entspricht.

Ähnlich liegt die Sache für den Unterarm. Denkt man sich den Arm in wagerechter Stellung, so ist es klar, daß die Schwere, auf alle Teile des Unterarmes gleichzeitig wirkend, diesen parallel mit sich selbst, also in wagerechter Lage zu Boden fallen machen würde. Diese Wirkung läßt sich als Wirkung einer einzigen, im Schwerpunkt angreifenden Kraft darstellen. Nun soll aber der Unterarm außerdem mit dem Oberarm im Ellenbogengelenk verbunden sein, und auf den Oberarm, wenn er in wagerechter Lage ist, wirkt die Schwere nach unten drehend ein. Folglich lastet die Schwere des Oberarmes auf dem Ellenbogengelenk, und gerade so wie vorhin für den Oberarm, besteht auch hier eine doppelte Wirkung der Schwere. Die Schwere wirkt auch auf den Unterarm so, als sei außer der Masse des Unterarms im Ellenbogengelenkpunkt die gesamte Masse des Oberarms vereinigt. Zur Vereinfachung dieser Anschauung kann man wiederum für den Unterarm den „Hauptpunkt“ berechnen, der den gemeinsamen Angriffspunkt einer die beiden Schwerkraftwirkungen vereinigenden Kraft darstellt.

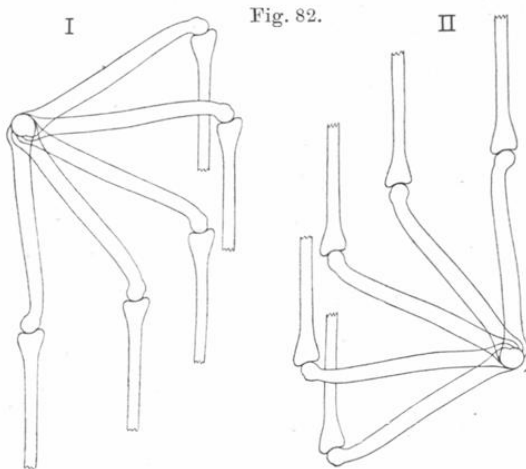
¹⁾ O. Fischer, Die Arbeit der Muskeln und die lebendige Kraft der Muskeln (Habilitationsschrift), Abhandl. d. math.-phys. Kl. d. k. sächs. Gesellsch. d. Wiss. Nr. 1, 20, 5, 22.

Diese Betrachtung gilt nun auch für solche Fälle, in denen die Masse eines der beiden Glieder durch äußere Widerstände vermehrt ist. Wird beispielsweise in der Hand eine Hantel geführt, so wird dadurch die Einwirkung der Schwere auf den Unterarm verändert, der Hauptpunkt des belasteten Unterarmes hat eine andere Stelle als der des unbelasteten.

2. Wirkung eingelenkiger Muskeln.

Wenn man an dem beweglichen Modell, auf das die Schwere in der angegebenen Weise wirkt, nun die Wirkungen bestimmter Muskelgruppen betrachten will, so sind mehrere Einzelfälle möglich, die im folgenden nacheinander besprochen werden sollen.

a) Ein Muskel, der vom Rumpf zum Oberarm zieht, wirkt auf diesen in der Weise, wie es oben für das Einzelglied besprochen ist. Da wir für das Ellenbogengelenk hier keine Muskeltätigkeit annehmen, es also als frei beweglich ansehen, wird Unterarm nebst Hand lotrecht herabhängen (ein Fall, der am Modell in jeder Stellung möglich ist, in Wirklichkeit wegen der Hemmungen der Gelenke nur unter bestimmten Bedingungen) oder er kann auch lotrecht über dem Ellenbogengelenk im Gleichgewicht stehen. In beiden Fällen wird der Muskel, um eine bestimmte Stellung gegenüber der Einwirkung der Schwere zu erzwingen, ein Drehungsmoment ausüben müssen, das demjenigen gleich ist, das die im Hauptpunkte des Oberarmes einwirkende Schwere des ganzen Armes hervorbringt.



Stellungen, in denen ein eingelenkiger Muskel der Schulter der Schwere Gleichgewicht halten kann, I wenn es ein Beugemuskel, II wenn es ein Streckemuskel ist.

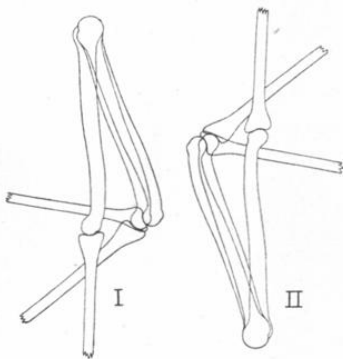
Es sind je fünf Stellungen angedeutet, zwischen denen unendlich viele Zwischenstufen eingeschaltet werden können. — Nach O. Fischer.

b) Ein Muskel, der vom Oberarm zum Unterarm zieht, läßt das Schultergelenk frei. Durch größere oder geringere Verkürzung erteilt er dem Ellenbogengelenk eine mehr oder minder gebeugte oder gestreckte Lage. In der dadurch hervorgebrachten Stellung ist aber der Arm im Schultergelenk frei beweglich. Hieraus folgt, daß der Muskel in diesem Falle nicht unter allen Umständen die gleiche Bewegungsform hervorbringt, sondern je nach den äußeren Umständen dem ganzen Arm eine verschiedene Stellung gibt.

Wirkt beispielsweise auf den Arm, der in der oben angenommenen Weise in der Sagittalebene beweglich gedacht werden soll, die Schwere ein, so wird er infolge der freien Beweglichkeit des Schultergelenks nur solche Stellungen einnehmen können, in denen sein Gesamtschwerpunkt lotrecht über oder unter dem Schultergelenk steht. Der Muskel beeinflusst dann

unmittelbar nur die Stellung des Unterarmes gegen den Oberarm, indem er je nach seiner Verkürzung das Ellenbogengelenk mehr oder minder stark beugt oder streckt. Im übrigen stellt sich der ganze Arm unter dem Einfluß der Schwere so ein, daß sein Gesamtschwerpunkt unter dem Schultergelenk liegt, oder er kann auch bei lotrecht über dem Schultergelenk befindlichem Gesamtschwerpunkt ins Gleichgewicht gebracht werden. Hieraus folgt, daß der vom Oberarm zum Unterarm ziehende Muskel nicht imstande ist, dem Unterarm innerhalb des Bewegungsumfanges eine beliebige Stellung zu geben, sondern er kann ihm nur eine ganz bestimmte Reihe von Lagen erteilen. Fischer hat gefunden, daß in diesen Lagen nicht nur der Gesamtschwerpunkt, sondern auch ein bestimmter unveränderlicher Punkt auf der Längsachse des Unterarmes, der als „Richtpunkt“¹⁾ bezeichnet wird, senkrecht unter oder über dem Schultergelenk steht. Die Lage dieses Richtpunktes hängt ab von der Lage der Einzelschwerpunkte vom Oberarm und Unterarm, sie ändert sich daher auch, wenn die Gewichtsverteilung eine andere wird. Trägt man z. B. ein Gewicht von 25 kg in der Hand, so wird der Gesamtschwerpunkt von Arm und Gewicht nahezu in die Mitte des Gewichtes fallen. Es werden dann, wie leicht verständlich, bei freiem Schultergelenk, also unter alleiniger Wirkung der Ellenbogenmuskulatur, nur solche Stellungen des Armes möglich sein, bei denen das Gewicht genau über oder unter der Schulter liegt. Richtpunkt und Gesamtschwerpunkt werden in diesem Falle nahe zusammengerückt sein.

Fig. 83.



Stellungen, in denen ein eingelenkiger Muskel des Ellbogens der Schwere das Gleichgewicht halten kann, I wenn es ein Beugemuskel, II wenn es ein Streckmuskel ist.

Es sind je drei Stellungen angedeutet, zwischen denen unendlich viele Zwischenstellungen eingeschaltet werden können. Nach O. Fischer.

Man kann gegen diese Ausführungen zwei Bedenken geltend machen, auf die einzugehen der Mühe wert scheint. Erstens, wozu die umständliche Erörterung, die schließlich lehrt, daß der Schwerpunkt des frei drehbaren Systems über oder unter den Unterstützungspunkt fallen muß? Hierauf ist zu antworten, daß sehr häufig die Bewegung des Unterarmes im Ellenbogengelenk unter dem Einfluß eines eingelenkigen, also vom Oberarm zum Unterarm ziehenden Muskels als Beispiel der Muskelbewegung überhaupt besprochen wird, und daß dabei immer nur die Beugung des Ellenbogens bei unbewegtem Oberarm beschrieben wird, ohne daß die Fixierung des Oberarmes als besondere Bedingung vorausgesetzt worden ist. Daher dürfte die Auffassung ziemlich allgemein sein, daß ein eingelenkiger Muskel des Ellenbogengelenks auch in Wirklichkeit die Fähigkeit habe, den Unterarm gegen den Einfluß der Schwere aus der lotrecht hängenden Lage in eine nahezu lotrecht aufgerichtete Lage zu heben. Nach den obigen Ausführungen ist dies aber nicht möglich, sondern in dem Maße, in dem der Ellenbogen gebeugt wird, dreht sich der Oberarm im Schultergelenk rückwärts, so daß wenn der Arm seine höchste Beugung erreicht hat, der Unterarm nicht einmal wagerecht steht.

¹⁾ O. Fischer, Beiträge zur Muskelstatik. Erste Abhandlung. Über das Gleichgewicht zwischen Schwere und Muskeln am zweigliedrigen System. Abh. d. math.-phys. Kl. d. k. sächs. Gesellsch. d. Wiss. 23 (4), 322.

Der zweite Einwand würde lauten: wozu eine so ausführliche Betrachtung der eingelenkigen Ellenbogenmuskeln, da es doch nur verhältnismäßig wenige gibt, die obendrein wohl nie für sich allein in Tätigkeit treten? Hierauf ist zu antworten, daß die Betrachtung streng genommen und in vollem Maße zwar nur für eingelenkige Muskeln gilt, daß aber auch die zweigelenkigen Muskeln an dem Ergebnis nichts wesentliches ändern. Der Biceps z. B. hat ohne Zweifel eine gewisse Wirkung auf das Schultergelenk, sie ist aber unverhältnismäßig schwächer als das Drehungsmoment, das er auf den Ellenbogen ausübt, oder kurz gesagt, obschon eigentlich ein zweigelenkiger, wirkt er ungefähr wie ein eingelenkiger Muskel. Daher sind auch die obigen Ausführungen tatsächlich für den praktischen Gebrauch des Armes maßgebend.

3. Zweigelenkige Muskeln.

Dies führt auf die Betrachtung der Wirkungsweise der zweigelenkigen Muskeln überhaupt. Als solche bezeichnet man Muskeln, die über zwei Gelenke hinweg, beispielsweise vom Rumpf unmittelbar zum Unterarm ziehen.

Diese Art Muskeln sind vor O. Fischer fast ausschließlich in der Weise untersucht worden, daß man je eines der beiden Gelenke als festgestellt ansah, und dann die Wirkung des Muskels auf das andere allein wie die eines eingelenkigen Muskels untersuchte. Aus dieser Betrachtungsweise ergab sich eine wichtige Lehre, nämlich die von der „relativen Längeninsuffizienz“ der zweigelenkigen Muskeln¹⁾. Da das Verkürzungsvermögen aller Muskeln eine bestimmte Grenze hat, und die Kraft, mit der sie sich verkürzen, mit fortschreitender Verkürzung schnell abnimmt (Schwannsches Gesetz), so hängt die Leistungsfähigkeit jedes Muskels in gewissem Grade von der Länge ab, die er im Augenblick hat. Bei zweigelenkigen Muskeln wird die Länge durch die Stellung beider Gelenke bestimmt, und folglich kann es kommen, daß, wenn das eine Gelenk eine solche Stellung einnimmt, in der der Muskel schon beträchtlich verkürzt ist, das Verkürzungsvermögen oder wenigstens die Kraft mit der der Muskel sich weiter verkürzt, unzureichend sind, das zweite Gelenk in Bewegung zu setzen.

So z. B. kann die Streckung des Unterschenkels mit großer Kraft ausgeführt werden, wenn der *Rectus femoris* durch Rückwärtsneigen des Beckens gespannt wird, es tritt eine Schwächung seiner Wirkung durch relative Insuffizienz ein, wenn das Becken vorwärts geneigt ist. Diesen Fall machten sich die Chirurgen bei der Reposition der Patellarfraktur zunutze, die deshalb in sitzender Stellung des Patienten ausgeführt werden soll. Die meisten als relative Längeninsuffizienz betrachteten Fälle dürften indessen nicht ausschließlich so einfach zu erklären sein.

Es kann ferner bei den zweigelenkigen Muskeln auch eine absolute Längeninsuffizienz eintreten, die darin besteht, daß der Muskel bei gewissen Stellungen des einen Gelenkes nicht lang genug ist, die Bewegung des anderen Gelenkes in vollem Umfang zuzulassen.

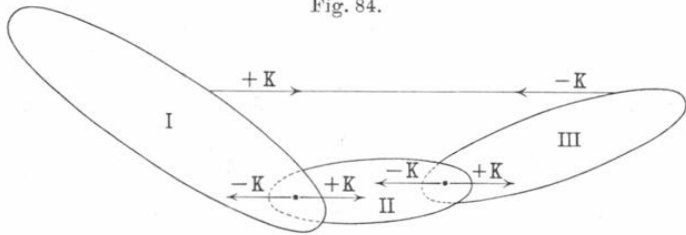
Dies zeigt sich beispielsweise an den Fingerstreckern, die bei stark gebeugtem Handgelenk zu sehr gespannt sind, um auch noch eine völlige Beugung der Finger zuzulassen. Daher kann man einem widerstrebenden Gegner einen Gegenstand leicht aus der geschlossenen Hand herausnehmen, wenn man zuerst sein Handgelenk in gebeugte Stellung gebracht hat.

¹⁾ Th. W. Henke, Zeitschr. f. rat. Med. 33 (3), 141 und C. Hueter, Virchows Arch. 28, 273; 46, 37.

So wichtig diese Betrachtungen über die Längenverhältnisse der zweigelenkigen Muskeln in ihrer Abhängigkeit von der jeweiligen Stellung eines Gelenkes sind, so geben sie doch keinerlei Aufschluß über die eigentliche Wirkung dieser Muskeln, die sie eben nur dann entfalten, wenn sie auf beide Gelenke gleichzeitig wirken.

Die Wirkungsweise der zweigelenkigen Muskeln mag nun wiederum an dem besonderen Fall des Modelles von Rumpf und Arm besprochen werden, an dem ein zweigelenkiger Muskel vom Rumpf aus, über Schulter und Ellenbogengelenk zum Unterarm ziehen möge. Man kann sich dann den Muskelzug, wie schon oben angegeben, in zwei unabhängige gleiche und entgegengesetzte Kräfte zerlegt denken, von denen die eine am Ursprung, die andere am Ansatz, beide in der Richtung des Muskels und in entgegengesetztem Sinne ziehen. Der Zug am Ursprung bringt, da der Körper feststehend gedacht ist, keine in Betracht kommende Wirkung hervor. Der Zug am Ansatzpunkt strebt das untere Glied (den Unterarm) zu bewegen und bringt dadurch im Ellenbogengelenk eine ihm gleiche, parallele und entgegengesetzte

Fig. 84.



Schematische Darstellung der Wirkung eines zweigelenkigen Muskels nach O. Fischer.

Der zwischen den beweglichen Gliedern I und III ausgespannte Muskel übt an seinen Endpunkten gleiche und entgegengesetzte Zugkräfte, $+K$ und $-K$ aus, die in den Gelenkpunkten parallele gleiche und entgegengesetzte Gegenkräfte wecken. Auf jeden der drei Körper I, II, III wirkt infolge des Muskelzuges ein Kräftepaar, dessen Drehungsmoment gegeben wird durch die Größe der Kraft K , multipliziert mit dem Abstände senkrecht zwischen den Richtungen der parallelen Gegenkräfte. Dieser Abstand ist in dem dargestellten Falle am größten für den Körper I, am kleinsten für den Körper II.

Druckkraft hervor, die mit ihm ein Kräftepaar bildet, durch das das Drehungsmoment des Muskels auf den Unterarm gegeben ist. Die Druckkraft selbst aber erfordert eine entsprechende Gegenwirkung des Oberarmes, die ihrerseits in ganz derselben Weise eine Gegenkraft im Schultergelenk erzeugt und gemeinsam mit dieser ein Kräftepaar darstellt, das den Oberarm bewegt. Wenn der Oberarm der Richtung des Muskelzuges genau parallel ist, fallen die ersterwähnte Druckkraft im Ellenbogengelenk und die ihr entsprechende Gegenwirkung auf das Schultergelenk beide genau in die Richtung des Oberarmes, und das Drehungsmoment dieses zweiten Kräftepaares ist mithin gleich Null. In diesem Fall strebt also der zweigelenkige Muskel allein eine Drehung des Unterarmes im Ellenbogengelenk hervorzubringen.

Zu den Fällen, in denen zwei untereinander gelenkig verbundene Glieder an einer größeren dritten Masse beweglich sind, zählen nun nicht allein diejenigen Bewegungen, die etwa der Arm, bestehend gedacht aus Oberarm und Unterarm mit Hand, in der Schulter frei beweglich, oder das Bein, bestehend gedacht aus Oberschenkel und Unterschenkel mit Fuß, in der Hüfte frei beweglich, ausführt — sondern man kann unter den gleichen Gesichtspunkten auch diejenigen Bewegungen betrachten, in denen der Gesamtkörper in zwei in sich starre, untereinander bewegliche Abschnitte zu zerlegen ist, und in einem bestimmten festen

Punkte beweglich befestigt ist. Eine solche Bewegung ist z. B. die Erhebung des Körpers auf die Zehenspitzen beim Stehen. Die beiden Fußgelenke können hierbei als ein einziges Gelenk mit transversaler Achse angesehen werden, durch das zwei in sich starre Massen, nämlich einerseits die beiden Füße bis zu den Ballen, andererseits die Beine mit Rumpf, Kopf und Armen, beweglich verbunden sind. Von diesem zweigliedrigen System, das den ganzen Körper umfaßt, bleibt während der Bewegung eine Stelle, nämlich die Berührungsstelle der Fußballen mit der Erde in Ruhe, man kann also diese Stelle als eine gelenkige Verbindung mit einem festen Punkte der Unterstützungsfläche ansehen. Auf diese Weise ergibt sich eine vollkommene Analogie zwischen dem Fall, daß der Körper, auf dem Fußballen durch Wirkung der Wadenmuskulatur auf das Fußgelenk im Gleichgewicht gehalten und gehoben wird, und dem oben besprochenen Fall, daß der Arm oberhalb der Schulter durch Wirkung eines eingelenkigen Streckmuskels auf das Ellenbogengelenk im Gleichgewicht gehalten und emporgestreckt wird.

Gleichgewicht besteht in beiden Fällen nur, solange der gemeinsame Schwerpunkt über dem Unterstützungspunkt liegt. Im Falle des Erhebens auf die Zehen ist der gemeinsame Schwerpunkt der beiden beweglichen Glieder des Systems, also der beiden Füße einerseits, des übrigen Körpers andererseits, nicht wesentlich von dem des Körpers ohne die Füße verschieden. Daher kann die oben gegebene Bedingung für Gleichgewicht einfach dadurch ausgedrückt werden, daß gesagt wird: Der Schwerpunkt muß über den Fußballen verlegt werden.

Es ist leicht einzusehen, daß in genau derselben Weise eine Reihe von anderen Bewegungen, wie z. B. Beugen und Strecken des Oberkörpers um die Hüftachse beim Stehen, oder Heben und Senken beider geschlossener und gestreckter Beine aus dem gestreckten Hange an beiden Armen unter den Gesichtspunkt der Bewegung eines frei hängenden Systems von zwei untereinander beweglichen Gliedern gebracht werden können.

II. Betrachtung der dynamischen Verhältnisse.

Eingelenkige Muskeln.

a) Die Wirkung der Muskelzüge an einer Kette von zwei beweglich verbundenen Gliedern (Oberarm und Unterarm) sind noch beträchtlich verwickelter, sobald man die durch die Bewegung selbst entstehenden Widerstandskräfte in Betracht zieht. Hierbei ist die Bewegung am besten in einer wagerechten Ebene darzustellen, damit die Anschauung nicht durch die Erdanziehung gestört werde, die mit den in Rede stehenden Vorgängen nichts zu tun hat. Die beiden nur durch ein Gelenk (Schultergelenk) fixierten, gegeneinander beweglichen Massen stellen im gewissen Sinne ein freies Massensystem mit durch innere Kräfte unveränderlichem Schwerpunkt vor. Als innere Kräfte dieses Systems sind offenbar solche Muskelzüge anzusehen, die vom Oberarm zum Unterarm ziehen. Diese vermögen also den Schwerpunkt des Systems nicht zu verlegen. Nun gilt aber der Satz von der Unveränderlichkeit des Schwerpunktes nur für ganz freie Systeme, und das hier behandelte ist im „Schultergelenk“ fixiert. Diese Fixierung wirkt, sobald sie beansprucht wird, wie eine äußere Kraft, die eben die beanspruchende Kraft aufhebt, und diese äußere Kraft kann als solche auf den Schwerpunkt des Systems einwirken. Da aber diese Einwirkung stets vom Schultergelenk ausgeht, kann auch der Schwerpunkt des Systems nur in der Richtung auf das Schultergelenk zu und von ihm fort bewegt werden. Dieser Betrachtung entspricht dann auch der Befund bei Bewegungen des Armes durch innere Kräfte, d. h. durch Muskeln, die zwischen Oberarm

und Unterarm ausgespannt sind. Ein solcher Muskel kann unmittelbar nur Beugung oder Streckung des Ellenbogens hervorbringen. Blicke der Oberarm in Ruhe und der Unterarm allein führte etwa die Beugung aus, so würde der Gesamtschwerpunkt des Armes an eine ganz andere Stelle, und zwar weiter nach vorn verlegt werden. Dies würde den oben angegebenen allgemeinen Grundsätzen widersprechen, und tatsächlich findet daher die Bewegung in der Weise statt, daß der Oberarm gleichzeitig mit der Bewegung des Unterarmes eine Rückwärtsdrehung in der Schulter ausführt, so daß der Gesamtschwerpunkt seine Lage im Raume annähernd beibehält. Nur annähernd, weil er allerdings bei der Beugung dem Schultergelenk beträchtlich näher rückt, aber dies Näherrücken geschieht auf gerader Linie, so daß man sagen kann, der Schwerpunkt bleibt auf demselben Radius eines um das Schultergelenk beschriebenen Kreises. Um den ganzen Vorgang handgreiflich auszudrücken, kann man sagen: die Beugebewegung des Unterarmes übt auf den Oberarm einen Rückstoß aus, der den Oberarm in bestimmtem Verhältnis zur Bewegung des Unterarmes rückwärts treibt.

Umgekehrt liegt die Sache bei der Streckbewegung.

Aus der obigen Betrachtung geht hervor, daß diese Bewegung des Oberarmes durch eingelenkige Ellenbogengelenkbeuger oder -Strecker von der Masse der Glieder selbst abhängt. Aus diesem Grunde ist auch die Kraft, mit der die Bewegung des Oberarmes stattfindet, von der Größe der bewegten Massen abhängig, und man könnte deshalb geneigt sein, da die Masse des ganzen Armes keine sehr große ist, die ganze Bewegung für unwichtig zu halten. Dagegen ist geltend zu machen, daß bei Bewegungen gegen Widerstände diese eine entsprechende Vermehrung der Masse darstellen, und wenn z. B. durch eingelenkige Ellenbogenbeuger ein mit der Hand gehaltener wagerechter Strick, der an einer starken Feder befestigt ist, angezogen wird, dreht sich der Oberarm, obschon der Annahme nach keine Muskeln vom Rumpf aus auf ihn wirken, mit einer ebenso großen Kraft rückwärts wie die ist, mit der der Unterarm seine Beugebewegung ausführt.

b) Zieht man ebenso die Widerstände, die die Massen der Glieder der Bewegung entgegensetzen, bei der Betrachtung derjenigen Muskeln in Rechnung, die vom Körper an das erste Glied (Oberarm) gehen, so ergibt sich ebenfalls eine Wirkung auf das anscheinend frei gelassene Ellenbogengelenk. Stellt man sich den Arm in gebeugter Haltung vor und denkt sich den Oberarm durch einen Schultermuskel im Sinne einer Rückwärtsdrehung bewegt, so wird er den Unterarm nach sich ziehen müssen. Dieser passiven Bewegung setzt das Beharrungsvermögen des Unterarmes einen Widerstand entgegen, der als eine im Schwerpunkt des Unterarmes angreifende, dem im Ellenbogengelenk erfolgenden Zuge entgegengesetzt gleiche Kraft betrachtet werden kann. Dadurch entsteht ein Kräftepaar, das den Unterarm dreht, und zwar je nach der Anfangsstellung entweder im Sinne der Beugung oder der Streckung. War der Arm spitzwinklig gebeugt, so wird sich beim Zurückziehen des Oberarmes der Beugungswinkel öffnen, war der Arm stumpfwinklig gebeugt, so wird er stärker gebeugt werden. Ebenso wie vorhin Muskeln zwischen Oberarm und Unterarm Bewegungen im Schultergelenk hervorriefen, rufen hier Muskeln der Schulter Bewegungen im Ellenbogengelenk hervor.

Auf diese Weise erklärt sich ein Paradoxon, das am Froschschenkel leicht anschaulich gemacht werden kann, daß nämlich ein Streckmuskel unter Umständen zum Beuger werden kann. Der *Quadriceps cruris* ist im allgemeinen Strecker des Unterschenkels, er ist aber zugleich Beuger des Oberschenkels. Ist das Knie nahezu gestreckt, der Oberschenkel in mittlerer Beugung, und der Quadriceps wird plötzlich innerviert, so überwiegt die beugende Wirkung auf den Oberschenkel, der sich stark bewegt und den Unterschenkel so stark mitzieht, daß eine Beugung im Knie eintritt.

Es kann wohl hier wiederum das Bedenken auftreten, ob solche geringfügige Kräfte, wie die des Beharrungsvermögens des Unterarmes, die wohl ein ganz frei gedrehtes Glied in Bewegung setzen können, im Vergleich zu der Leistung der Muskeln aber verschwindend sind, überhaupt der Erwähnung wert seien. Und ebenso kann hier wiederum gefragt werden, was es für einen Sinn hat, Bewegung des Ellenbogengelenks durch Schultermuskeln zu erörtern, während doch das Ellenbogengelenk seine eigenen starken Beuger und Strecker besitzt. Gerade hier kann dieser Einwand am kräftigsten zurückgewiesen werden, weil die Kraft der Schultermuskeln die der Armmuskeln um soviel übertrifft, daß die erwähnte passive Bewegung des Ellenbogengelenkes für die Leistungen des Körpers von allergrößter Bedeutung ist. Viele Verrichtungen beruhen auf anhaltendem starken Ziehen mit den Händen, das durch Beugung im Ellenbogen und, wie dies gezeigt worden ist, ebensowohl durch Beugung in der Schulter zustande kommt. In allen diesen Fällen wird gewöhnlich nur die Leistung der Ellenbogenbeuger gewürdigt und die Bewegung daher als eine Leistung der Armmuskeln angesehen. In allen diesen Fällen verrichten aber in Wirklichkeit die Schultermuskeln einen sehr großen, vielleicht den größten Teil der Arbeit.

Für das Verständnis für die gemeinschaftliche Wirkung dieser beiden Muskelgruppen ist es jedenfalls von Bedeutung, festzuhalten, daß ebensowohl aktive Bewegung der Schulter passive Bewegung im Ellenbogengelenk, als aktive Bewegung im Ellenbogengelenk passive Bewegung des Schultergelenks hervorbringt.

III. Bewegung eines aus drei oder mehr gelenkig verbundenen Abschnitten bestehenden Gliedes.

1. Die Einwirkung der gelenkig verbundenen Glieder aufeinander.

Die Lehre von der Mechanik gelenkig verbundener Gliederketten, die bis hierher auf die von zwei gelenkig verbundenen und in einem Endpunkt gelenkig befestigten Gliedern eingeschränkt worden ist, braucht nun bloß auf drei, vier oder mehr Glieder ausgedehnt zu werden, um sämtliche Bewegungen des Körpers zu umfassen. Steht z. B. der Körper auf dem Ballen eines Fußes, so werden die mechanischen Bedingungen des Rumpfes die des vierten Gliedes einer solchen Kette darstellen, die aus den Einzelgliedern Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel, Rumpf besteht. Würden in derselben Stellung Bewegungen des Kopfes oder der Arme in Betracht gezogen, so würde noch ein fünftes, allenfalls ein sechstes oder siebentes Glied hinzukommen.

Die Betrachtungsweise, die alle diese Aufgaben allgemein zu lösen gestattet, ist folgende: Jedes einzelne Glied einer Kette aneinandergehänger

Massen kann als ein frei im Raum beweglicher Körper angesehen werden, auf den eine Anzahl verschiedener äußerer Kräfte einwirken. Unter diese Kräfte sind die Druckwirkungen einbegriffen, die von den benachbarten Gliedern der Kette auf das zu untersuchende Glied in dessen Gelenkpunkten ausgeübt werden. In derselben Weise wie oben für die Einwirkung der Schwere oder des Muskelzuges auf den mit dem „Unterarm“ verbundenen Oberarm das Gewicht oder das Beharrungsvermögen des Unterarmes als eine im Ellenbogengelenk einwirkende Kraft in Betracht gezogen werden mußte, müssen zu den auf ein mittleres Glied in einem mehrgliedrigen System wirkenden Kräften die Massenkkräfte der an den Endpunkten mit ihm verbundenen übrigen Glieder gerechnet werden. Dies gilt natürlich nicht nur für den Fall, daß es sich um ein Endglied handelt, vielmehr muß die Wirkung des Endgliedes zu der des vorletzten, und wiederum die entstehende Wirkung zu der des vorvorletzten und so fort hinzugenommen werden, bis man an das zu untersuchende Glied herankommt. Diese umständliche Betrachtung wird nun dadurch sehr abgekürzt, daß sich dabei die Massenwirkungen einfach summieren. Mithin kann man die ganzen auf ein beliebiges Glied wirkenden Druckkräfte der übrigen Glieder bis zum Ende der Kette einfach so ausdrücken, daß man sich die gesamte Masse der betreffenden Glieder im Endpunkte des zu untersuchenden Gliedes vereinigt denkt. Ebenso ist oben die Masse von Unterarm und Hand im Ellenbogengelenk konzentriert gedacht worden. Dies gilt natürlich ganz allgemein für jede beliebige Kette gelenkig verbundener Massen und bezieht sich daher ebensowohl auf die peripheriewärts gelegenen Teile der menschlichen Gliedmaßen als auch auf den Rumpf und die von da aus weiter zu zählenden anderen Gliedmaßen. Um beispielsweise die Bewegungsbedingungen für den rechten Oberschenkel als frei im Raum beweglichen Körper zu finden, muß man sich im Kniegelenksmittelpunkt die Masse von rechtem Unterschenkel und Fuß vereinigt denken, im Hüftgelenksmittelpunkt die Masse von Rumpf, Kopf, Armen und linkem Bein. Es ist dann für die mechanische Betrachtung gleichsam der ganze Körper auf den Oberschenkel reduziert, und daher bezeichnet O. Fischer¹⁾, der diese Anschauung eingeführt hat, das so entstehende theoretische Gebilde als das „reduzierte System“ des Oberschenkels. Diesem reduzierten System kommt natürlich wie jedem Massensystem ein einziger Schwerpunkt zu, der „Hauptpunkt“ des Oberschenkels, der sich ergibt, wenn man den gemeinsamen Schwerpunkt des Oberschenkels selbst, des auf die angegebene Art belasteten Kniegelenkes und des auf die angegebene Art belasteten Hüftgelenkes aufsucht. Alle auf den Oberschenkel in Wirklichkeit, das heißt, bei seiner natürlichen Verbindung mit dem Körper einwirkenden Kräfte wirken auf ihn so, wie sie auf das reduzierte System des Oberschenkels wirken würden. Auf das reduzierte System als auf einen einfachen starren Körper können aber alle beliebigen Kräfte nur zwei Wirkungen ausüben, nämlich entweder seinem Schwerpunkt, also dem Hauptpunkt, eine geradlinige Bewegung zu erteilen, oder aber das System um den Hauptpunkt zu drehen.

¹⁾ O. Fischer, Die Arbeit der Muskeln und die lebendige Kraft des menschlichen Körpers (Habilitationsschrift). (Abhandl. d. math.-physik. Kl. d. Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. 21, 22).

In umgekehrter Reihenfolge dient nun diese ganze Lehre dazu, aus den bei irgendwelcher Bewegungsform, die man beobachtet hat, tatsächlich stattfindenden Lageveränderungen eines beliebigen Gliedes die Richtung und Größe der Kräfte zu bestimmen, die diese Bewegungsform hervorbringen. Sämtliche auf jedes Glied wirkenden Kräfte müssen sich zu zwei Posten summieren, deren einer gerade genügt, dem Hauptpunkte des betreffenden Gliedes diejenige geradlinige Bewegung zu erteilen, die aus der Beobachtung bekannt ist, und deren andere ein Kräftepaar darstellt, dessen Drehungsmoment gerade ausreicht, dem reduzierten System eine Drehung von der beobachteten Größe zu erteilen.

2. Untersuchung der Muskeltätigkeit bei der Bewegung.

Wenn auf diese Weise die im Körper wirkenden Kräfte erkannt worden sind, so bleibt die weitere Frage zu beantworten, wie sich die betreffende Leistung auf die einzelnen Muskeln verteilt.

Hierbei ergibt sich sogleich, daß die Muskeln nicht nach der morphologischen Einteilung der Anatomie, sondern nach physiologisch-mechanischen Gruppen zusammengefaßt werden müssen ¹⁾.

Die einzeln benannten Muskeln stellen nur morphologische Einheiten dar, physiologisch betrachtet bilden sie eine gemeinschaftliche Masse, die für jeden besonderen Fall beliebig einzuteilen ist. Dabei ist es gleich, ob ein anatomisch bestimmter Muskel in mehrere physiologische Muskeln geteilt wird, oder ob mehrere anatomisch bestimmte Muskeln und Teile solcher Muskeln zu einem physiologischen Muskel zusammengefaßt werden. Diese physiologische Gruppierung der Muskeln ist aber immer nur für eine ganz bestimmte Bewegung, ja nur für eine bestimmte Stellung im Laufe der Bewegung gültig. Jede dauernde, allgemein gültige Einteilung der Muskeln nach ihrer Funktion ist ein Schema, das den Tatsachen Gewalt antut.

Diese Lehre hat Duchenne ²⁾ wiederholt mit seinem Satze ausgesprochen: „L'action musculaire isolé n'est pas dans la nature“, und mit der Beobachtung bestätigt, daß die Reizung anatomisch bestimmter einzelner Muskeln ganz unnatürliche Bewegungen hervorruft.

Die neueren Versuche, bestimmte Gesichtspunkte für die physiologische Gruppierung der Muskeln zu gewinnen, sind ebenso einseitig schematisierend wie die ältere Vorstellung. Wenn beispielsweise die Verteilung der Muskeln um die einzelnen Gelenke mit der Lage der Bogengangsebenen in Beziehung gebracht wird, so müßte dieser Zusammenhang offenbar ebensowohl für die Tiere wie für den Menschen gelten. Es müßte demnach die Gruppierung der Muskeln um die Gelenke bei allen Tieren, deren Bogengangsebenen gleichartig sind, die gleiche sein, obschon Verwendung und Bewegungsumfang der Gliedmaßen bei den verschiedenen Tieren völlig verschieden sind. Aus dem Gesagten geht insbesondere auch hervor, daß die Begriffe Synergisten und Antagonisten immer nur für einzelne bestimmte Fälle gelten können ³⁾.

¹⁾ R. du Bois-Reymond, Spezielle Muskelphysiologie. Berlin 1903, S. 245. —

²⁾ G. B. Duchenne (de Boulogne), Physiologie des Mouvements. Paris 1867, p. 818. — ³⁾ R. du Bois-Reymond, Über das angebliche Gesetz der reziproken Innervation antagonistischer Muskeln. Arch. f. Physiol. 1902, Supplbd. S. 43.

Es ist weiter oben gezeigt worden, wie Schultermuskeln und Ellenbogenmuskeln gemeinsam tätig sind, um den Arm zu beugen. Es hängt aber von der jeweiligen Stellung des Oberarmes in der Schulter ab, welche Gruppe der Schultermuskeln die Beugung des Ellenbogens zu unterstützen vermag.

Wenn auch nicht von solchen allgemeinen Gesichtspunkten aus, kann man im einzelnen Falle doch aus der Kenntnis der Kräfte, die die Körperbewegungen hervorbringen, auf die Leistung der Muskeln oder Muskelgruppen im physiologischen Sinne im einzelnen schließen.

Dazu bedarf es aber der Kenntnis der Drehungsmomente, die jeder einzelne Muskel bei jeder bestimmten Stellung auf jedes Gelenk auszuüben vermag. Dies Drehungsmoment hängt erstens ab von der Stärke des Zuges, also der Kraft des Muskels. Die allgemeine Muskelphysiologie lehrt, daß die Kraft im allgemeinen vom Querschnitt des Muskels abhängt, weiter vom Verkürzungsgrade, und gibt die Methoden an, sie zu messen. Bei gegebener Kraft ist dann das Drehungsmoment weiter abhängig von der Entfernung der Zugrichtung vom Gelenkpunkt, oder, um es anders auszudrücken, von den Hebelverhältnissen, unter denen der Muskel arbeitet. Diese können durch unmittelbare Messungen am Präparat bestimmt werden.

Die relative Größe des Drehungsmomentes verschiedener Muskeln von gleicher Zugkraft kann am besten durch Vergleichung der Verkürzungsgrößen¹⁾ bestimmt werden, die sie für eine gegebene Winkelbewegung des Gelenkes erfahren.

Wenn durch diese Bestimmungen die Drehungsmomente bekannt sind, die sämtliche überhaupt in der betreffenden Stellung wirksamen Muskeln auf die bewegten Gliedmaßen ausüben können, und man außerdem, wie oben vorausgesetzt, die Größe der zur Bewegung erforderlichen Arbeit kennt, so wird man annehmen können, daß auf jeden der betreffenden Muskeln ein der Größe seines Drehungsmomentes entsprechender Teil der Gesamtarbeit entfällt. Damit ist dann die Aufgabe gelöst, für eine bestimmte Bewegung genau die Arbeitsleistung jedes einzelnen beteiligten Muskels anzugeben.

Dies gilt allerdings nur von der physikalischen Arbeit. Wenn eine bestimmte Bewegung eine bestimmte physikalische Arbeitsgröße erfordert, so weiß man sicher, daß die Muskeln mindestens diese Arbeit bei der Bewegung leisten. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß sie genau die gleiche Bewegung mit viel größerem physiologischen Arbeitsaufwand ausführen, wenn z. B. andere Muskeln stark entgegenwirken. Diese statische oder passive Muskeltätigkeit würde der oben dargestellten Untersuchungsweise entgehen, aber sie könnte durch Gaswechseluntersuchung nachgewiesen und dann in Rechnung gebracht werden.

Die praktische Ausführung der geschilderten Methoden ist bis jetzt erst in ihren Anfängen vorhanden, indem O. Fischer die Messungen ausgeführt hat, die nötig sind, um die Tätigkeit der einzelnen Beinhmuskeln beim Gehen zu bestimmen.

¹⁾ W. Braune und O. Fischer, Die Rotationsmomente der Beugemuskeln am Ellbogengelenk des Menschen. Abhandl. d. math.-phys. Kl. d. Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. 15 (3), 247.

4. Die Lehre vom Stehen.

I. Gegenüberstellung der älteren und neueren Anschauung.

1. Alte und neue Lehre.

Die Lehre vom Stehen des menschlichen Körpers bildete nach früheren, jetzt als irrtümlich erkannten Anschauungen ein in sich abgegrenztes Kapitel der reinen physiologischen Statik. Man ging nämlich davon aus, daß das Stehen eine Ruhelage des Körpers sei, die ohne oder wenigstens mit minimaler Muskelanstrengung innegehalten werde. Es galt demnach, nur diejenige Stellung des Körpers anzugeben, in der seine sämtlichen Teile passiv in statischem Gleichgewicht aufeinander ruhten. Von diesem rein spekulativen Standpunkt ausgehend nahm man an, daß ein Teil der Gelenke bei der der aufrechten Haltung festgestellt sein müßte, und strebte dies durch spitzfindige Untersuchungen und einseitige Beobachtungen nachzuweisen.

Indem die neuere Forschung sich auf unmittelbare Untersuchung am Lebenden gründet, ist sie von vornherein gezwungen, anzuerkennen, daß das Stehen keine Ruhelage darstellt. Denn erstens läßt sich zeigen, daß der Körper beim Stehen dauernd viel größere Schwankungen macht, als mit der Vorstellung passiven Gleichgewichts vereinbar sind, zweitens bricht der Körper, sobald die Muskeltätigkeit aufgehoben ist, zusammen, und es ist unmöglich, einen Kadaver in aufrechter Haltung ins Gleichgewicht zu bringen; drittens läßt sich eine erhebliche Steigerung des Stoffwechsels als Folge der beim Stehen geleisteten Muskularbeit nachweisen. Damit ist die Lehre vom Stehen eigentlich über das Gebiet der rein mechanischen Betrachtung hinausgewachsen, und eine erschöpfende Behandlung ist nur durchzuführen, wenn man auf die Physiologie der Muskeln, der Sinne und des Zentralnervensystems bezugnahme.

Indessen kann auch die rein mechanische Seite der Frage für sich in Angriff genommen werden, indem man die durch das Nervensystem regulierte Muskeltätigkeit als gegeben hinnimmt und allein deren mechanische Bedingungen untersucht.

2. Der Gleichgewichtszustand des Körpers beim Stehen.

Es entsteht zunächst die Frage, ob der Körper im Stehen als in Ruhe befindlich oder als bewegt anzusehen ist. Hier sind zwei Arten der Betrachtung möglich, je nachdem man die Bedingungen untersuchen will, die den Körper als Ganzes betreffen, oder den Körper als aus einzelnen gegeneinander beweglichen Abschnitten aufgebaut ansieht. Die erste grob verallgemeinernde Anschauung kann ohne weiteres davon ausgehen, den Körper als ein starres, also unbewegtes Ganzes anzusehen. Will man aber die mechanischen Bedingungen der einzelnen Abschnitte betrachten, aus denen sich der Körper aufbaut, so entstehen gewisse Schwierigkeiten, die denen analog sind, mit denen die allgemeine Muskelphysiologie bei der Aufstellung des Begriffes der Arbeit zu kämpfen hat. Die Physik kennt nur zwei Zustände eines Körpers, den der Ruhe, gleichviel ob im Gleichgewicht befindliche Kräfte auf ihn wirken

oder nicht, und den der Bewegung. Die Teile des stehenden menschlichen Körpers machen nun dauernd geringfügige Bewegungen, die durch Muskelzug verursacht sind. Im allgemeinen aber heben einander diese Bewegungen auf, so daß eine relative Ruhelage beibehalten wird, und es ist daher die Tätigkeit der Muskeln im großen und ganzen nicht anders anzusehen, als etwa die Wirkung gespannter Federn, deren Zugkräfte einander gegenseitig das Gleichgewicht halten. Für die rein mechanische Betrachtung des Stehens soll diese Auffassung im folgenden angenommen werden.

Für die allgemein physiologische Betrachtung ist aber wohl zu merken, daß zwischen der Wirkungsweise der Muskeln und der gespannter Federn wesentliche Unterschiede bestehen. Zwei Federn, die einander das Gleichgewicht halten, können noch so stark gespannt sein, sie leisten absolut keine Arbeit in physikalischem Sinne. Zwei Muskeln, die gegeneinander gespannt sind, leisten erstens immer Arbeit in physikalischem Sinne, weil sie in keinem Augenblicke wirklich genau im Gleichgewicht sind und folglich dem Körperteil, an dem sie befestigt sind, immerfort unmerkliche Bewegungen erteilen, zweitens aber leisten gespannte Muskeln, auch abgesehen von wirklicher merklicher oder unmerklicher Bewegung, dauernd Arbeit im physiologischen Sinne, wie sich aus dem gesteigerten Stoffwechsel ergibt. Diese Art der physiologischen Arbeit nennt man „statische Arbeit der Muskeln“.

Wenn man die Muskeln des stehenden Körpers wie gespannte Federn ansieht, so ergibt sich für die einzelnen Abschnitte des Körpers unter dem Einfluß der Schwere und des Muskelzuges stabiles Gleichgewicht. Stellt man das Maß des Muskelzuges fest, so ergibt dies ein Maß für die von den Muskeln beim Stehen zu leistende physiologische oder statische Arbeit.

II. Die Statik des stehenden Körpers als einer einheitlichen Masse.

Unterstützungsfläche und Schwerpunkt.

Es soll nun zuerst der Teil der Lehre vom Stehen besprochen werden, der den Körper als Ganzes betrifft. Der ganze aufrecht oder in beliebiger anderer Stellung stehende Körper kann nach den eben gegebenen Gesichtspunkten als durch die Muskeln vollkommen starr festgestellt angesehen werden. Dann unterscheiden sich die mechanischen Bedingungen des Stehens des lebenden Menschen von denen des Stehens einer entsprechenden Figur etwa aus Holz oder Marmor nur dadurch, daß die Massenverteilung im lebenden Körper nicht gleichmäßig ist, das heißt, daß beispielsweise die Knochen schwerer sind als das Fett- oder das Lungengewebe, und daß dadurch die Lage des Schwerpunktes des lebenden Körpers eine andere ist, als sie für die aus gleichförmigem Stoff geformte Figur sein würde. Die Lage des Schwerpunktes kann daher nicht auf rein geometrischem Wege gefunden werden, sondern muß für den betreffenden oder einen möglichst gleichen Körper selbst besonders bestimmt werden. Dies kann auch auf die oben besprochene Weise geschehen. Siehe S. 565. Wenn dadurch die Lage des Schwerpunktes im starr gedachten Körper bekannt ist, so gelten für das Stehen des menschlichen oder tierischen Körpers genau dieselben Anschauungen wie für das Stehen eines beliebigen anderen Körpers mit bekannter Schwerpunktslage.

Ein solcher Körper beharrt in seiner aufrechten stehenden Lage, solange das Lot durch den Schwerpunkt, die Schwerlinie innerhalb der Unterstützungs-

fläche fällt, das heißt derjenigen Fläche, die entsteht, wenn man die äußersten durch die Unterlage unterstützten Punkte gradlinig untereinander verbindet.

Ein solcher Körper steht ferner um so fester, je weiter nach innen von der Grenze der Unterstützungsfläche die Schwerlinie fällt. Denn wenn die Schwerlinie ganz außen, also gerade auf der Grenze der Unterstützungsfläche liegt, so liegt der Schwerpunkt ebenfalls genau über dieser Grenzlinie, und folglich wird der leiseste Anstoß von der einen Seite her, der eben genügt, dem Schwerpunkt eine minimale Beschleunigung über die Grenzlinie hinaus zu erteilen, eine Lage hervorrufen, in der der Schwerpunkt nicht mehr unterstützt ist und der Körper umkippen muß.

Es ist leicht einzusehen, daß bei gegebener Unterstützungsfläche diejenige Lage des Schwerpunktes, die für Stöße in der einen Richtung die unsicherste Stellung ergibt, gleichzeitig für Stöße in der entgegengesetzten Richtung die sicherste Stellung gewährt.

Bei gegebener Unterstützungsfläche und gegebener Lage der Schwerlinie hängt die Sicherheit des Stehens ferner ab von der Höhe, in der der Schwerpunkt über der Unterstützungsfläche liegt. Diese Bedingung kann man mit den vorigen zusammenfassen, indem man sagt: Der Körper steht um so sicherer, je größerer Winkel die Verbindungslinien vom Schwerpunkt zu den Grenzen der Unterstützungsfläche mit der Senkrechten einschließen. Dieser Satz läßt sich dann auch auf solche Fälle anwenden, in denen die Unterstützungspunkte in verschiedener Höhe liegen. Zugleich deutet diese Fassung auf den ursächlichen Zusammenhang der Festigkeit des Stehens und der gegenseitigen Lage von Schwerpunkt und Unterstützungsfläche hin. Der Widerstand gegen das Umkippen beruht darauf, daß, absolute Starrheit des Körpers und der Unterlage vorausgesetzt, der Schwerpunkt dabei einen Kreisbogen um die Grenze der Unterstützungsfläche ausführen muß. Diese Kreisbewegung bedingt zuerst eine Hebung des Schwerpunktes, die um so größer ausfällt, je größer der angegebene Winkel ist. Der Widerstand gegen diese Hebung, mithin die Festigkeit des Stehens, ist endlich also auch um so größer, je schwerer der betreffende Körper ist.

Diese ganze Lehre gilt vom Stehen starrer Körper. Um sie auf den Körper des Menschen übertragen zu können, müssen vornehmlich zwei Punkte in Betracht gezogen werden: Der menschliche Körper ist als starr angesehen worden, weil er durch die Muskeln tatsächlich annähernd starr gemacht werden kann. In Wirklichkeit wird aber dieser Fall kaum eintreten, und das Umfallen eines stehenden Menschen infolge eines seitlichen Stoßes wird fast nie als reines Umkippen, sondern meist als eine Veränderung der Haltung, also der Form des Körpers aufzufassen sein, die eine Verschiebung des Schwerpunktes bedingt. Die Betrachtung des menschlichen Körpers als einer starren Masse gilt nur theoretisch für die Beurteilung der Festigkeit des Stehens gegenüber Kräften, die keine wesentliche Lageänderung hervorbringen. Von größerer Bedeutung ist der zweite Punkt: Bei einem absolut starren Körper ist die Unterstützungsfläche genau bestimmbar, unter den wirklichen Verhältnissen beim lebenden Menschen nicht¹⁾. Beispielsweise beim aufrechten

¹⁾ R. du Bois-Reymond, Über die Grenzen der Unterstützungsfläche beim Stehen. Verh. d. Physiol. Ges. zu Berlin 8, 53, 1899/1900.

Stehen mit geschlossenen Füßen ist die Unterstützungsfläche durch die gemeinsame Fläche beider Sohlen gegeben. Die Ränder der Sohlen sind aber rund und nachgiebig und es entsteht also die Frage, welcher Teil der von den Sohlen bedeckten Fläche wirklich zur Unterstützung des Körpers in Betracht kommt. Diese Frage läßt sich experimentell entscheiden, indem man eine Versuchsperson sich soweit nach verschiedenen Richtungen neigen läßt, bis sie eben ins Kippen kommt, und feststellt, wie nahe an die Grenze der Sohlenfläche die Schwerlinie herangerückt ist.

Man kann diese Untersuchung sehr einfach ausführen, indem man die Versuchsperson auf ein Brett von bekannter Länge stellt, dessen eines Ende durch eine scharfe Kante und dessen anderes Ende durch eine Federwage unterstützt ist. Das Gewicht der Versuchsperson muß bekannt sein. Die Lage der Schwerlinie ist dann leicht zu berechnen, da die Wage im Verhältnis des Abstandes der Wage von der unterstützenden Kante zu dem Abstände der Schwerlinie von der unterstützenden Kante belastet ist. Es messe das Brett zwischen Kante und Wage 1 m, die Versuchsperson wiege 70 kg, die Wage zeige 7 kg, so muß die Schwerlinie 10 cm von der Kante entfernt sein. Seien dies die Verhältnisse bei geradem Stehen, und die Versuchsperson neige sich vornüber, so wird, wenn der Schwerpunkt 1 cm nach vorn rückt, die Wage um 700 g mehr anzeigen.

Auf diese Weise läßt sich erkennen, daß ein Umkippen des Körpers schon eintritt, wenn die Schwerlinie noch etwa 1,5 cm innerhalb der Grenzen der Sohlen liegt. Die Festigkeit des Stehens kann namentlich gegenüber einer Beanspruchung in einer bestimmten Richtung dadurch sehr vermehrt werden, daß die Füße in der betreffenden Richtung weit auseinander gestellt werden.

In dieser Beziehung ist zu bemerken, daß beim Stehen mit geschlossenen Füßen oder auch mit geschlossenen Fersen und auswärts gestellten Fußspitzen die Ausdehnung der Unterstützungsfläche in sagittaler Richtung die in transversaler überwiegt, so daß der Körper verhältnismäßig unsicher steht. Diese Haltung ist daher unbequem, und es wird sie kaum jemand von Natur annehmen, sie dürfte also eigentlich nicht als Grundstellung, normale Stellung oder natürliche Stellung bezeichnet werden. Man hat dies auch offenbar bloß deswegen getan, weil diese Stellung am einfachsten beiden Füßen eine bestimmte Lage anweist. Daß die breitbeinige Stellung naturgemäßer ist, dürfte daraus hervorgehen, daß sie auch für die militärische Grundstellung erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit durch die Stellung mit geschlossenen Fersen verdrängt worden ist.

Daß die Form der Unterstützungsfläche nicht bloß gegenüber groben äußeren Gewalten, sondern auch für die kleinen Gleichgewichtsstörungen beim gewöhnlichen Stehen von Bedeutung ist, zeigen die Versuche Leiterstorfers, der die Form der Vierordtschen Schwankungsfiguren, die er an Soldaten als „Helmspitzenzeichnungen“ aufnahm, von der Stellung der Füße abhängig fand¹⁾.

Außer durch die Veränderung der Unterstützungsfläche kann die Sicherheit des Stehens auch auf die Weise erhöht werden, daß durch geeignete Haltung des Körpers der Schwerpunkt niedrig gelegt wird.

¹⁾ Leiterstorfer, Das militärische Training usw. Mit 49 Helmspitzenzeichnungen (Kephalogrammen) in der Beilage. Stuttgart 1897.

III. Die Statik des stehenden Körpers als eines in sich beweglichen Gerüsts.

1. Überblick.

Nach der für die obigen Betrachtungen angenommenen Auffassung befindet sich der ganze Körper beim Stehen als starre Masse im stabilen Gleichgewicht. Ganz anders muß sich die Anschauung stellen, sobald man die tatsächlich vorhandene Beweglichkeit sämtlicher einzelner Körperteile gegeneinander in Betracht zieht. Man könnte dabei an ein labiles Gleichgewicht denken, in dem die einzelnen Abschnitte aufeinander aufgebaut wären, doch sind, wie schon oben bemerkt, die physikalischen Begriffe hier überhaupt unzureichend, da das Stehen nur durch fortdauernd korrigierte Muskeltätigkeit unterhalten wird. Es gilt nun, für die einzelnen Abschnitte des Körpers die mechanischen Bedingungen zu untersuchen, um Art und Größe der Muskeltätigkeit kennen zu lernen.

Man hat früher, solange man an einer stabilen, von der Muskeltätigkeit unabhängigen Aufstellung des Körpergerüsts festhielt, diese Aufstellung von unten an beschrieben¹⁾, wie man etwa den Bau eines gezimmerten Turmes beschreiben würde. Um die Bedingungen des Stehens unabhängig von einer vorgefaßten Meinung zu untersuchen, muß man aber mit dem obersten Abschnitt anfangen, da die Bedingungen für die unteren Abschnitte von denen der oberen abhängig sein können.

Das einzig zuverlässige Beobachtungsmaterial für die Untersuchung des Stehens ist durch die Arbeiten von Braune und Fischer²⁾ über die Lage des Schwerpunktes gegeben. Hier sind die Teilschwerpunkte der einzelnen Körperabschnitte genau bestimmt und ihre Lage bei verschiedenen Arten des Stehens durch photographische Aufnahmen festgestellt worden. Diese Aufnahmen sind zwar nur an einem einzelnen Individuum gemacht worden, doch ist es leicht, nachdem die Beobachtungen einmal gemacht sind, sich von ihrer allgemeinen Gültigkeit zu überzeugen.

2. Die Stellung des Kopfes.

Beginnt man mit dem obersten Abschnitte des Körpers, dem Kopfe, so tritt allerdings zunächst eine nicht ganz aufgeklärte Frage hervor. Die Gebrüder Weber³⁾ hatten angenommen, daß der Kopf auf den Condylen des Atlas in labilem Gleichgewicht ruhe. Braune und Fischer verzichteten mit Recht darauf, eine bestimmte Haltung des Kopfes als normale oder gerade Haltung anzunehmen, da gerade in diesem Punkte sicherlich sehr wesentliche individuelle Unterschiede bestehen. Der Schwerpunkt des Kopfes liegt nach Braune und Fischer⁴⁾ 7 mm hinter der Lehne des Türkensattels, was auf der Seitenansicht etwa $\frac{1}{2}$ cm über dem Eingange des äußeren Gehörganges entsprechen würde. Dieser Punkt soll bei der „bequemen Haltung“ des Lebenden 5 mm vor dem Atlantooccipitalgelenke liegen. Da aber die Kopfhaltung von der Stellung der Halswirbelsäule ebenso sehr wie von der des

¹⁾ H. v. Meyer, Statik und Mechanik des menschlichen Knochengerüsts. Leipzig 1873. — ²⁾ W. Braune und O. Fischer, Über den Schwerpunkt usw., Abh. d. math.-physik. Kl. d. k. Sächs. Ges. d. Wiss. XV, VII. — ³⁾ W. und E. Weber, Mechanik der menschlichen Gewerkezeuge, Göttingen 1836. I, § 43. — ⁴⁾ W. Braune u. O. Fischer, Über den Schwerpunkt usw. Abh. d. math.-phys. Kl. d. k. Sächs. Ges. d. Wiss. XV, VII, S. 635.

genannten Gelenkes abhängt, und die beweglichsten Stellen der Halswirbelsäule weiter vorn liegen, so kann man aus diesem Befunde nicht mit Sicherheit schließen, daß der Kopf Übergewicht nach vorn hat. Es ist aber doch sehr wahrscheinlich, daß, wenn nicht labiles Gleichgewicht besteht, das Übergewicht auf der vorderen Seite liegt, so daß der Kopf durch den Zug der Nackenmuskeln im Gleichgewicht gehalten wird.

Auf alle Fälle wird die Last des Kopfes vom Rumpfe getragen und addiert sich zu ihr in der Weise, daß für jede Haltung des Kopfes die Lage des gemeinsamen Schwerpunktes von Rumpf und Kopf eine verschiedene sein wird. Da aber die Masse des Rumpfes, zu dem noch die der beiden Arme hinzukommt, die des Kopfes bedeutend übersteigt, sind diese Unterschiede verhältnismäßig unbedeutend, und es kann die Lage des gemeinsamen Schwerpunktes des ganzen Oberkörpers als nahezu unabhängig von der Haltung des Kopfes mit großer Genauigkeit bestimmt werden.

3. Der Aufbau des Rumpfes.

Es fragt sich nun zweitens, wie der Oberkörper beim Stehen im Gleichgewicht gehalten wird. Der Rumpf ist, wie man aus der Beobachtung an Leichen sehen kann, durch die elastische Festigkeit der Wirbelsäule an sich annähernd starr. Beim Lebenden kann die Wirbelsäule durch Muskelzug in sehr verschiedenen Stellungen fixiert werden, doch ist offenbar zur Steifung des Rumpfes an sich nur eine geringe Anspannung der Rücken- und Bauchmuskeln erforderlich. Daß letztere einen merklichen Einfluß auf die Aufrechterhaltung der Wirbelsäule ausüben, hat Parow¹⁾ durch Versuche an exenterierten Kadavern nachgewiesen. Der Rumpf kann also unter Voraussetzung dieser geringen Muskelspannung als ein in sich starrer Gerüstteil angesehen werden. Dieser Gerüstteil ist durch die Oberschenkel in den Hüftgelenken unterstützt, und folglich um die gemeinsame Querachse beider Hüftgelenke frei beweglich. Es fragt sich, durch welche mechanischen Bedingungen der Rumpf über dieser Achse in der aufrechten Stellung festgehalten wird. Zur Entscheidung dieser Frage genügt es nicht, den Rumpf für sich allein zu betrachten. Denn auf dem Rumpfe ruht der Kopf, und außerdem sind die Arme an ihm aufgehängt.

Das Gewicht der beiden Arme wird offenbar so wirken, als sei es im Aufhängungspunkte, also in den Schultergelenkmittelpunkten, konzentriert. Es tritt hier der Unterschied deutlich hervor zwischen der Betrachtung des Körpers als starre Masse, wo die Arme unbeweglich sind, und der Untersuchung des Gleichgewichtes der einzelnen beweglich gedachten Abschnitte. Man kann dies sehr deutlich zur Anschauung bringen, indem man sich den Körper mit zwei Hanteln von je 50 kg Gewicht an den Händen belastet denkt. Der Schwerpunkt des Systems, Oberkörper nebst Belastung, würde dann, wenn das System starr gedacht wird, unter die Hüftgelenkachse fallen, und der Oberkörper müßte sich in stabilem Gleichgewicht befinden, genau wie die Nürnberger Holzpüppchen, die um eine quere Achse in der Hüftgegend beweglich aufgestellt und an den Armen mit Bleigewichten versehen sind, so daß sie, einmal angestoßen, um ihre stabile Gleichgewichtslage pendeln und so fortwährend Rumpfbeugungen auszuführen scheinen. In Wirklichkeit würde aber der so belastete Oberkörper viel labiler sein als der unbelastete,

¹⁾ W. Parow, Studien über die physikalischen Bedingungen der aufrechten Stellung usw. *Virchows Arch.* 31, 74 u. 109, 1864.

weil die schwere Belastung, vermittelt der in Wirklichkeit beweglichen Arme an den Schultern hängend, einer am oberen Ende des Rumpfes angebrachten Belastung gleichkommt.

Für die Beurteilung des Gleichgewichtes in bezug auf die Hüftachse macht es allerdings zunächst nichts aus, ob ein Teil der Last höher oder niedriger liegt, denn die Schwere sämtlicher einzelnen Teile wirkt senkrecht nach unten, und der Gegendruck der unterstützenden Gelenke wirkt senkrecht nach oben. Die Summe dieser Wirkungen ist ein Kräftepaar, das den Oberkörper zu drehen, d. h. umzukippen strebt. Die Größe der Kräfte ist gleich der Schwere der betreffenden Körperteile, für die Stärke des Drehungsmomentes kommt also nur noch der Abstand der Kräfte, da sie senkrecht gerichtet sind, ihr horizontaler Abstand, in Rechnung. Da die Arme natürlich senkrecht unter ihrem Unterstützungspunkte hängen, ist der horizontale Abstand ihrer Schwerlinie von der Hüftgelenkachse derselbe, gleichviel, ob man ihren Schwerpunkt an seiner eigentlichen Stelle annimmt, oder ihr Gewicht im Aufhängungspunkte angebracht denkt.

Für die Beurteilung der Muskularbeit zur Wiederherstellung des Gleichgewichtes im Falle stattgefundener Abweichungen ist es aber notwendig, die zweite Anschauung anzunehmen.

Aus Braune und Fischer sind nun folgende Zahlen zu entnehmen:

	g
Gewicht des Kopfes . . .	4 140
„ Rumpfes . .	25 060
„ Oberarmes	1 980
„ Unterarmes	1 340
„ der Hand	490

— = nach hinten gerechnet:

	cm
Horizontalabstand der Schwerlinie { des Kopfes	— 1,0
von der Hüftgelenkachse { des Rumpfes	— 0,6
Horizontalabstand des Schultergelenkes von der Frontalebene der Hüftgelenke	— 1,0
Höhe über der Hüftgelenkachse { Kopfschwerpunkt	67,5
{ Schultergelenk	46,0
{ Schwerpunkt des Rumpfes	24,8

Der gemeinsame Schwerpunkt des Kopfes und der in den Schultergelenken vereinigten Masse beider Arme liegt also in — 1,0 cm Abstand von der Frontalebene der Hüftgelenke, in einer Höhe, die die Differenz der Höhen 67,5 cm und 46 cm im umgekehrten Verhältnis der Gewichte 4140 g und $2 \cdot (1980 + 1340 + 490)$ g teilt. Dies Verhältnis 4140 : 7620 ist annähernd 1 : 2, die Differenz der Höhen = 21,5, also fällt der gemeinsame Schwerpunkt etwa 15 cm unter den des Kopfes, nämlich in 52,5 cm Höhe über dem Hüftgelenk. Der Schwerpunkt des ganzen Oberkörpers liegt auf der Verbindungslinie dieses Punktes und des Rumpfschwerpunktes, und teilt sie nach dem umgekehrten Verhältnis der Massen 25,060 kg und 11,800 kg. Dies Verhältnis ist nahezu 2 : 1; die Differenz der Höhen ist 52,5 — 24,8 = 27,7 cm.

Der Schwerpunkt des Oberkörpers ist also in 18 cm Höhe über der Hüftgelenkachse und in — 0,86 cm Abstand von der Frontalebene der Hüftgelenke anzunehmen. Dieser Abstand ist, wie das Minuszeichen andeutet, nach dorsalwärts von der Hüftgelenkebene zu zählen. Die Last des gesamten Oberkörpers, 36,860 kg, strebt also, wie an einem Hebelarm von fast 9 mm Länge angebracht, den Oberkörper um die Hüftgelenkachse nach hinten überkippen

zu machen. Um das Hintenüberfallen des Oberkörpers zu verhindern, muß eine Zugkraft vor dem Hüftgelenke vorhanden sein, die genau die entgegengesetzte Wirkung ausübt und das Drehungsmoment der Schwere aufhebt.

4. Das Gleichgewicht der Kräfte am Oberschenkel.

Hieraus geht für die Betrachtung des nächstunteren Gerüstteiles, der beiden Oberschenkel, die zusammen als eine gemeinsame Stütze aufgefaßt werden können, hervor, daß von ihnen aus ein Muskelzug stattfinden muß, der den Rumpf am Hintenüberfallen hindert, der also den Oberschenkel nach vorn oben zu ziehen strebt. Dieser Zug ruft einen entsprechenden Gegen- druck des Rumpfes im Hüftgelenk hervor, mit dem zusammen er das oben verlangte Kräftepaar bildet. Unter dem Einflusse dieses Kräftepaares würden die Oberschenkel in den Knien nach hinten einknicken. Mit anderen Worten, die nach hinten überhängende Last des Oberkörpers würde den Oberschenkel mit sich hintenüberreißen, wenn dem nicht andere Kräfte entgegen stünden. Nach Braune und Fischer liegt nämlich das Kniegelenk 1 cm hinter dem Hüftgelenk, d. h. der Oberschenkel steht schräg, er hängt nach vorn über. Da nun im Hüftgelenk das Gewicht des Oberkörpers als senkrechter Druck von oben nach unten einwirkt, im Kniegelenk aber ein gleicher entgegen- gesetzter Druck von unten nach oben stattfindet, so ist hier ein Kräftepaar gegeben, das den Oberschenkel mit seinem oberen Ende nach vorn unten, mit seinem unteren nach hinten oben zu drücken strebt, also das Kniegelenk zu überstrecken sucht, und somit dem zuerst erwähnten Kräftepaar entgegen- wirkt. In gleichem Sinne wirkt auch, wie sogleich einleuchtet, die Schwere des Oberschenkels selbst, da er ja vornüber geneigt steht. Es ist auch an der Hand der gegebenen Zahlen leicht nachzuweisen, daß das letzterwähnte Kräfte- paar das erste überwiegt, daß also der Oberschenkel auf dem Knie nach vorn- über zu kippen strebt, und zwar gleichviel, ob das Knie gestreckt oder gebeugt ist, vorausgesetzt nur, daß der Schwerpunkt von Oberkörper nebst Ober- schenkeln vor die Frontalebene des Kniegelenks falle.

Es ist nicht ganz leicht, sich diese Abhängigkeit des Oberschenkels von der Lage des Oberkörperschwerpunktes richtig vorzustellen. Bei oberflächlicher Betrach- tung drängt sich stets die Anschauung auf, als müßte das Bein, sobald das Knie gebeugt ist, im Knie einknicken. Gewöhnt man sich aber, den Oberschenkel mit dem auf ihm im Hüftgelenk festgestellten Rumpf als ein Stück zu betrachten, so wird sogleich anschaulich, daß, sobald die Schwerlinie dieses Stückes vor den Knie- gelenken vorbeigeht, das Stück die Neigung haben wird, vornüber zu kippen, also das Knie nicht einzuknicken, sondern vielmehr zu überstrecken.

Durch die schräge Stellung des Oberschenkels ist es nun möglich, daß selbst bei einem gewissen geringen Beugungsgrade des Knies die Schwerlinie von Oberkörper nebst Oberschenkeln noch vor dem Kniegelenke vorbeigeht. Das läßt sich einfach dadurch beweisen, daß man bei einer in bequemer Haltung stehenden Versuchsperson die Kniescheibe betastet, und fühlt, daß sie lose ist. Dies ist ein Beweis, daß das Knie nicht durch Muskelkraft gestreckt gehalten wird, sondern daß die Gewichtsverteilung an sich ausreicht, ein Ein- knicken zu verhüten. Man kann nun die Versuchsperson die Knie beugen lassen, und zwar um ein ganz merkliches Stück, ehe sie so weit vorrücken, daß Oberkörper nebst Oberschenkeln nach hinten zu kippen beginnen. In

diesem Augenblicke ist die Versuchsperson gezwungen, wenn sie nicht fallen will, die *Extensores cruris* zusammenzuziehen, und sogleich fühlt man die starre Fixierung der Kniescheibe auf ihrer Fossa.

Die eben gegebene Darstellung von der Rolle des Kniegelenkes beim Stehen stimmt in gewisser Beziehung mit den älteren Auffassungen überein, steht aber in anderer Hinsicht dazu im schroffsten Gegensatz. Die älteren Autoren waren bemüht nachzuweisen, daß das Bein beim Stehen als starre Stütze diene, daß also das Kniegelenk nicht durch Muskeltätigkeit gestreckt gehalten zu werden brauche. Hiervon ausgehend nahmen sie an, daß das Bein beim Stehen stets im Zustande der „Überstreckung“ sei, d. h. daß das Knie, genau gesprochen, die Verbindungslinien des Kniegelenkes mit den Mittelpunkten des Fußgelenkes und des Hüftgelenkes, einen nach vorn offenen Winkel bilde. In dieser Stellung würde natürlich selbst bei senkrecht stehendem Beine die Belastung der Hüftgelenke durch den Oberkörper stets nur im Sinne weiterer Überstreckung, also der Einknickung nach vorn, wirken. Diesem würden die Bänder des Knies widerstehen, und das Bein würde so eine starre Stütze bilden. Diese Auffassung ist, wie aus dem oben Gesagten hervorgeht, insofern richtig, als tatsächlich das Bein auf Überstreckung beansprucht wird. Sie ist aber falsch, insofern als Bedingung hierfür die beginnende Überstreckung gefordert wird. Denn abgesehen davon, daß eine eigentliche Überstreckung im Kniegelenk zu den Abnormitäten gezählt werden muß, da die meisten Menschen über die einfache Streckung nicht hinauskommen, läßt sich nachweisen, daß beim gewöhnlichen Stehen keine Überstreckung stattfindet. Braune und Fischer geben an, daß beim bequemen Stehen das Kniegelenk 1 cm hinter dem Hüftgelenk, das Fußgelenk 5 cm hinter dem Hüftgelenk gelegen ist. Da die Längen von Ober- und Unterschenkel nahezu gleich sind, berechnet sich daraus, daß das Kniegelenk 2 cm vor der geraden Linie zwischen Fußgelenk und Hüftgelenk gelegen ist. Daß auch bei anderen Individuen das Knie keineswegs einen nach vorn offenen Winkel bildet, ergibt sich daraus, daß keinerlei Hebung, kein „Überschnappen“ beim Beugen der Knie eintritt, was doch der Fall sein müßte, wenn sie überstreckt gewesen wären. Man kann das wirkliche Verhalten dadurch bezeichnen, daß man es eine „relative Überstreckung“ nennt. Das Knie ist soweit gestreckt, daß der Oberschenkel mit dem daraufstehenden Oberkörper so weit nach vorn gerückt ist, daß er weiter nach vorn zu fallen strebt. Dabei braucht, wie eben nachgewiesen, der Winkel, den Ober- und Unterschenkel bilden, 180° noch nicht erreicht zu haben.

Hiermit ist die Erörterung der mechanischen Bedingungen, denen der Oberschenkel beim Aufbau des stehenden Körpers genügen muß, noch nicht abgeschlossen. Es ist gezeigt worden, daß die Einwirkung der Schwere eine Drehung des oberen Endes nach vorn, also ein Umkippen nach vorn hervorzurufen strebt. Es müssen nun die Kräfte angegeben werden, die dieser Einwirkung widerstreben und so das Gleichgewicht in der natürlichen Haltung erzeugen. Unter diesen Kräften wird die Bänderspannung im Knie zu nennen sein, die mit der Streckung eintritt. Im allgemeinen pflegt aber noch vor der Beanspruchung der Hemmungsbänder eine Muskelhemmung einzutreten, und diese wird durch die Anspannung des Gastrocnemius und der übrigen Kniebeuger gegeben. Sie ziehen den Oberschenkel gegen den Unterschenkel und bilden mit dem dadurch hervorgerufenen Gegendruck im Kniegelenk ein Kräftepaar, das den Oberschenkel nach hintenüber zu werfen strebt, also dem oben besprochenen Drehungsmoment der Schwere das Gleichgewicht halten kann.

5. Die Aufrechterhaltung des Unterschenkels.

Damit ist das Gleichgewicht des Körperabschnittes Oberkörper nebst Oberschenkeln auf den Knien gegeben, und es fragt sich jetzt, wie die Unterschenkel gegenüber dieser Belastung der Knie aufrecht gehalten werden. In

diesem Punkte haben sich die Spekulationen der älteren Untersucher, die den Unterschenkel ohne Muskeltätigkeit auf dem Fuße festgestellt finden wollten, bis zur offenbarsten Unnatur verstiegen. Passive Feststellung der Fußgelenke ist absolut ausgeschlossen. Es handelt sich bei der aufrechten Stellung der Unterschenkel genau wie bei den anderen Körperteilen um Gleichgewichte zwischen Schwerkraftwirkung und Muskelkraft. Die Schwere des ganzen Körpers wirkt auf das Knie als senkrechter Druck, der den Unterschenkel abwärts treiben würde, wenn nicht der Gegendruck des Fußes im Fußgelenk ihn unterstützte. Daraus ergibt sich ein Kräftepaar, das den Unterschenkel nach vornüber zu werfen strebt. Ebenso wirkt, bei der etwas vornüber geneigten Stellung des Unterschenkels, seine eigene Schwere gemeinsam mit dem entsprechenden Gegendruck im Fußgelenk. Von hinten her aber greift der Soleus am Unterschenkel an und zieht ihn zurück, indem er zugleich vermöge seines Ansatzes am Fuße einen Gegendruck im Fußgelenk hervorruft und so ein Kräftepaar schafft, das ein dem erstgenannten entgegengesetztes Drehungsmoment hat.

Die Verhältnisse sind hier, wie man sieht, ziemlich einfach, und der Grund, daß man sich so lange gegen diese einfache Anschauung gesträubt hat, ist wohl darin zu suchen, daß an die Muskeltätigkeit gerade an dieser Stelle eine sehr erhebliche Anforderung gestellt wird. Das Drehungsmoment der Schwere und ihres Gegendruckes wird gemessen durch Produkte des Gewichtes von Oberkörper samt Oberschenkel in den Horizontalabstand von Kniegelenk und Fußgelenk. Das Gewicht beträgt nach Braune und Fischer rund 50 kg, der Abstand 4 cm.

Der Abstand der Richtung des Muskelzuges vom Drehpunkte des Fußgelenkes ist nicht genau bestimmbar, ist aber jedenfalls nicht wesentlich größer als 4 cm, somit müssen die Wadenmuskeln beim gewöhnlichen Stehen eine Spannung von gegen 50 kg aushalten.

6. Die Statik des Fußes.

Endlich die mechanischen Verhältnisse des Fußes stellen sich folgendermaßen dar. Am Fersenfortsatz zieht aufwärts die Achillessehne und ruft einen entsprechenden Gegendruck im Fußgelenk hervor. Dadurch würde der Fuß mit der Spitze in den Erdboden gedrückt werden, wenn nicht der Widerstand, den er an der Erde findet, sich als nach oben wirkende Kraft entgegenstemmt. Die Schwere des Fußes selbst wird natürlich ebenfalls durch die Gegenkraft des Bodenwiderstandes ausgeglichen. Endlich wirkt die Schwere des ganzen Körpers auf dem Fußgelenk, der ebenfalls eine entsprechende Gegenwirkung von seiten der Unterlage das Gleichgewicht hält.

7. Die anatomischen Bedingungen.

Diese Betrachtungen geben nur die mechanischen Bedingungen für die aufrechte Haltung an und bedürfen der weiteren Ausarbeitung in bezug auf die anatomischen Verhältnisse im einzelnen. Diese eingehendere Untersuchung ist aber nur für wenige Punkte in Angriff genommen. Welche Muskeln es sind, die bei der Feststellung des Rumpfes auf den Hüftgelenken tätig sind, welche Rolle den Muskeln des Halses, Rückens usw. zufällt, ist noch nicht ermittelt.

Die Art und Weise, in der der Fuß beim Stehen auf dem Boden ruht, ist dagegen vielfach untersucht worden. Oben ist nur im allgemeinen vom

Gegendruck des Bodens die Rede, es ist aber klar, daß einem Gebilde wie dem Fuß gegenüber von einem einheitlichen Flächendruck nicht die Rede sein kann. Im Gegensatz dazu nahm man früher an, daß das Fußgerüst eine Art Gewölbekonstruktion mit drei Hauptstützpunkten darstelle, die durch Ferse, großen und kleinen Fußballen gegeben würden. Demgegenüber haben Beely, H. Virchow und andere¹⁾ die einfachere und den Tatsachen besser entsprechende Ansicht verfochten, daß die Druckverteilung nicht ohne Berücksichtigung des Weichteilpolsters untersucht werden könne, und daß tatsächlich der ganze äußere Fußrand und der ganze Ballen, insbesondere sein mittlerer Teil, die wirksame Sohlenfläche bildeten.

8. Besondere Haltungstypen.

Außer der gewöhnlichen Haltung beim Stehen sind auch einige andere Haltungen genauer untersucht worden, und zwar zum Teil künstliche, zum Teil mehr oder weniger natürliche Haltungstypen.

Von ersteren sind zu erwähnen die militärische Grundstellung, die von der natürlichen hauptsächlich darin abweicht, daß der Körper noch viel weiter nach vorn überhängt. Dadurch sowie durch die vorschrittsmäßige Anspannung aller Muskeln, auch solcher, die mechanisch gar nicht beansprucht sind, wird diese Stellung zu einer sehr anstrengenden. Die militärische Feuerstellung ist von Braune und Fischer und von Leiterstorfer untersucht worden. Sie zeichnet sich dadurch aus, daß die Beine breit auseinander gespreizt sind, um eine in der Feuerrichtung möglichst ausgedehnte Unterstüßungsfläche zu erhalten, und daß der Körper vornüber gebeugt ist, um dem Rückstoß beim Abfeuern des Gewehres entgegen zu wirken. Bei dieser Stellung wie bei anderen militärischen Stellungen ist zugleich der Einfluß der Belastung durch das Gewehr und die anderen Ausrüstungsstücke berücksichtigt worden.

Einseitige Belastung verschiebt den Gesamtschwerpunkt des Körpers, da die Masse der Last sich zu der des Körpers addiert. Damit der Schwerpunkt über der Mitte der Unterstüßungsfläche bleibe, muß, wenn vorn, hinten oder seitlich eine Last angehängt wird, der Körper nach der anderen Seite ausbiegen. Die Belastung des Unterleibes durch den Uterus wird im Zustande der Schwangerschaft durch eine stärkere Rückwärtsbiegung des Kreuzes ausgeglichen.

Die natürliche Haltung ist, wie schon oben erwähnt, individuell einigermaßen verschieden. Die mannigfaltigen Gleichgewichtsbedingungen, die oben beschrieben worden sind, werden durch die individuellen Unterschiede des Körperbaues merklich beeinflusst. Auch bei ein und demselben Individuum bedingen anscheinend nebensächliche Änderungen an einer Stelle mitunter merkliche Veränderungen der ganzen Haltung. So hat es auf die Stellung des Rumpfes und damit auf die Beanspruchung der Beine wesentlichen Einfluß, ob die Arme frei herabhängend oder etwa auf der Brust oder dem Rücken verschränkt gehalten werden.

Auch abgesehen davon kann sich die Krümmung der Wirbelsäule bei dem gleichen Individuum ändern und dadurch verschiedene Haltungen beim Stehen

¹⁾ F. Beely, Über die Bedeutung des Fußgewölbes beim Stehen. Arch. f. Chir. 27, 2; G. Muskat, Beitrag zur Lehre vom menschlichen Stehen. Arch. f. Physiol. 1900, S. 285; H. Virchow, Entgegnung. Verh. d. Physiol. Ges. zu Berlin, 1900—1901. I, S. 1.

erzeugen. Die bekannte Angabe, daß die Körperlänge nach anhaltendem Stehen geringer gefunden wird ist durch Dickenabnahme der Zwischenwirbelscheiben zu erklären, da sie nur zum allerkleinsten Teil auf veränderter Krümmung beruht. Die dauernden Verschiedenheiten in der Haltung der Wirbelsäule bei verschiedenen Individuen, die zur Aufstellung bestimmter Typen geführt haben, bilden den Übergang zu pathologischen Formänderungen.

Es ist nun noch derjenigen Abarten des Stehens zu gedenken, die als „asymmetrische“ Stellungen unterschieden werden, weil der Körper dabei ausschließlich oder doch vorwiegend von einem Beine unterstützt wird. Diese Stellungen werden häufig als Ruhestellungen eingenommen und dürfen vielleicht mit größerem Rechte als die sogenannte „natürliche“ oder „bequeme“ symmetrische Haltung, als die eigentlich natürliche Ruhestellung im Stehen betrachtet werden. Vierordt¹⁾ hat darauf aufmerksam gemacht, daß die Schwankungen beim Stehen auf einem Fuße mit lose vorgesetztem anderen Beine geringer sind als beim symmetrischen Stehen. Man empfindet unmittelbar bei dieser Stellung, daß der Arbeitsaufwand geringer ist. Dies ist zum Teil durch die genauere Einhaltung des Gleichgewichts zu erklären, die wiederum auf Eigentümlichkeiten des Muskelsinnes und Drucksinnes zurückgeführt werden kann. Zum anderen Teile aber erklärt sich die Verminderung der Arbeit rein mechanisch. Es ist oben gesagt worden, daß die größte Muskularbeit beim Stehen den Wadenmuskeln zufällt, die das Drehungsmoment der gesamten Last des vornüber geneigten Körpers, bezogen auf die gemeinsame Achse der beiden Fußgelenke, aufwiegen müssen. Beim asymmetrischen Stehen würde, wenn keine andere Änderung einträte, diese statische Arbeit dem einen Wadenmuskel allein zufallen, und statt des Gefühls verminderter Anstrengung müßte im Gegenteil rasche Ermüdung eintreten. Es läßt sich aber zeigen, daß beim Einnehmen der asymmetrischen Ruhestellung zugleich der ganze Körper erheblich zurückgenommen wird, so daß sein Schwerpunkt nahezu über dem Fußgelenk steht und die Wade fast vollkommen entlastet wird. Bei der symmetrischen Stellung würde daraus eine große Unsicherheit hervorgehen, da der Körper bei einer geringen Schwankung nach rückwärts leicht völlig hintenüber kippen könnte. Da aber in der asymmetrischen Stellung das unbelastete Bein vorgeschoben ist, dient dessen Gewicht dem Körper gleichsam zur Verankerung, und er kann daher ohne Gefahr bis an die Grenze des Hintenüberfallens aufgerichtet werden. Für längeres Stehen kommt außerdem als Vorteil der asymmetrischen Stellung in Betracht, daß man die beiden Körperhälften abwechseln lassen kann, und auf diese Weise für die ermüdeten Muskelgruppen Ablösung vorhanden ist.

Da die Unterstützung bei der asymmetrischen Stellung einseitig ist, muß der Schwerpunkt des ganzen Körpers, um über die Unterstützungsfläche zu kommen, seitlich verschoben werden. Das Becken ruht nicht mehr auf beiden Hüftgelenken, wobei es nur um die gemeinsame Querachse kippen kann, sondern nur auf dem einen Hüftgelenk, und muß deshalb auch gegen das seitliche Umkippen um die sagittale Achse dieses Gelenkes festgestellt werden. Dadurch entsteht eine beträchtliche Beanspruchung der Muskeln, die seitliche Bewegung des Beckens gegen den Oberschenkel oder umgekehrt bewirken,

¹⁾ K. Vierordt, Grundriß der Physiologie des Menschen. 2. Aufl. Tübingen 1862, S. 364.

also der Abduktoren und Adduktoren. Die Anstrengung dieser Muskeln ist allerdings merklich, sie wird aber sehr vermindert, wenn man das Becken bis an die Grenze des Umfanges der Adduktionsbewegung herabsinken läßt. Diese Schiefstellung des Beckens muß durch eine entsprechende entgegengesetzte seitliche Auswärtsbiegung der Wirbelsäule ausgeglichen werden, durch die der Oberkörper seine aufrechte Lage beibehält. Dadurch tritt die belastete Hüfte stark gegen den Rippenrand hinauf, den sie geradezu unterstützt. Von diesem Verhalten der Hüfte hat die gesamte Haltung im Französischen den Namen „Position hanchée“.

5. Die Lehre vom Gehen.

I. Die Tätigkeit der Beine beim Gehen.

1. Es gibt eine typische Form des Ganges.

Die Lehre vom Gehen, als von der gewöhnlichsten Art der Fortbewegung des Menschen, bildet den wichtigsten Gegenstand der speziellen Bewegungslehre.

Obgleich jeder normale Mensch sich dieser Bewegungsweise fortwährend bedient, also selbst jederzeit die betreffenden Bewegungen ausführt, ist aus dieser subjektiven Erfahrung so gut wie gar kein Aufschluß über ihre Einzelheiten zu gewinnen, weil die koordinierte Bewegung beim Gehen ohne Zutun der Großhirnrinde, also unbewußt erfolgt. Es ist tatsächlich möglich, während des Gehens fest zu schlafen, ohne daß die automatische Tätigkeit des Körpers unterbrochen wird.

Um die Mechanik der Gangbewegung zu ergründen, muß man also objektive Beobachtung an anderen Menschen anstellen¹⁾. Die Schnelligkeit, mit der die Bewegungen erfolgen, bildet hierbei die erste große Schwierigkeit, die nur mit Hilfe der Momentphotographie hat überwunden werden können. Weitere Schwierigkeiten treten der mechanischen Erklärung entgegen. Man kann nicht allein aus der statischen Betrachtung des Körpers in den einzelnen Stellungen die Mechanik des Gehens ableiten, sondern man muß die durch die Bewegung selbst erzeugten dynamischen Verhältnisse berücksichtigen. Auf diese Weise ist mehr oder weniger jede Einzelheit vom Ganzen abhängig, wodurch die Anschauung ungemein erschwert wird. An sich handelt es sich um verwickelte Vorgänge, wie gleich einleuchtet, wenn man erwägt, daß die Fortbewegung auf der abwechselnden Tätigkeit der Beine beruht, auf denen zugleich der Rumpf vollkommen frei im Gleichgewicht gehalten werden muß.

Den Gebrüdern Weber ist es auch ohne Momentphotographie gelungen, die Bewegungen, aus denen sich das Gehen zusammensetzt, annähernd richtig im einzelnen zu erkennen und zu beschreiben. Bei der Erklärung der beobachteten Bewegungsform waren sie aber zum Teil auf theoretische Erwägungen angewiesen, denn um die wirkenden Kräfte aus der Bewegungsform ableiten zu können, waren ihre Beobachtungen viel zu unbestimmt, abgesehen davon, daß die Methoden noch nicht ausgebildet waren. Der theoretischen Untersuchung legten sie eine Reihe von Bedingungen zugrunde, die mit dem damaligen Stande der Erfahrung übereinstimmten, mit den neueren Beobachtungen aber im Widerspruch sind. Hauptsächlich durch

¹⁾ W. u. E. Weber, Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. I. Teil, § 4. Göttingen 1836.

die genaue Analyse O. Fischers sind diese Irrtümer aufgedeckt worden, es mag aber ausdrücklich bemerkt werden, daß Fischer selbst sich in vielen wesentlichen Punkten auf die Übereinstimmung seiner Beobachtungen mit denen anderer Forscher, insbesondere Mareys beruft.

Ebenso hat Fischer¹⁾ sich angelegen sein lassen, eine Hauptfrage zu erledigen, ohne deren Beantwortung die ganze Lehre vom Gehen ihre Grundlage verlieren und jederzeit allerhand Einwänden offen stehen würde. Es ist dies die Frage, ob es überhaupt eine typische Art des Ganges gibt, die für verschiedene Individuen ein und dieselbe bleibt. Mit Rücksicht auf die Übereinstimmung der anatomischen Verhältnisse bei allen normalen Individuen, sowie auf die längst anerkannte, verhältnismäßig große Regelmäßigkeit der Gangbewegung ist diese Frage mit großer Wahrscheinlichkeit zu bejahen. Fischer weist aber durch Messungen an über 100 Soldaten und Vergleichung mit entsprechenden Bestimmungen an acht Studierenden nach, daß tatsächlich Schrittlänge, Schrittdauer und Ganggeschwindigkeit annähernd gleicher Individuen sehr geringe Verschiedenheiten zeigen. Es gilt dies selbstverständlich nur für die natürliche Gangart, die bei der erwähnten Untersuchung dadurch außer Frage gestellt wurde, daß sich der Versuch auf einen Weg von 1000 m hin und ebensoviel zurück erstreckte, der „wie auf einer Fußwanderung“ gegangen werden sollte. Der auf einer so langen Strecke im Freien angeschlagene Schritt weicht natürlich von der Gangart, die etwa beim Umhergehen im Zimmer eingehalten wird, beträchtlich ab. Es ist aber gerade der „Wanderschritt“, der als die natürliche Bewegungsweise des Menschen vor allem untersucht werden sollte. Es zeigt sich, daß die von Fischer für seine Aufnahmen der Gangbewegung im Laboratorium angestellte Versuchsperson es verstanden hat, den „Wanderschritt“ auch auf der kurzen Versuchsstrecke anzuschlagen.

2. Die Tätigkeit der Beine.

Die typischen Bewegungen beim Gehen sollen nun, vom Gröberen zum Feineren fortschreitend, zugleich mit Rücksicht auf ihre mechanische Bedeutung beschrieben werden, indem die Verhältnisse, wie sie Fischer²⁾ bei seiner Versuchsperson bestimmt hat, zugrunde gelegt werden. Die Versuchsperson war 167 cm groß und hatte eine Beinlänge von 87 cm. Der einfache Schritt maß in den drei Aufnahmen³⁾ 77,9, 76,8 und 71,9 cm, die Schrittdauer betrug 0,495, 0,485 und 0,494 Sekunden, woraus sich gegen 121 Schritte in der Minute berechnen.

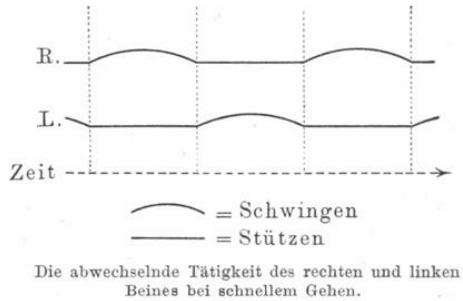
Das Gehen geschieht bekanntlich in der Weise, daß der Körper auf einem Bein unterstützt nach vorn bewegt wird, während das andere Bein sich an dem ersten vorüber nach vorn bewegt, auf dem Boden wieder Fuß faßt und nun die Rolle der Unterstützung übernimmt, während das erste Bein dieselbe Bewegung durchläuft, wie vorher das zweite. Die beiden eben unterschiedenen Hauptperioden des Stützens und Vorschwingens sind aber nicht ganz scharf

¹⁾ O. Fischer, Der Gang des Menschen. V. Teil. Die Kinematik des Beinschwings. Abh. d. math.-physik. Kl. d. Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. 28, 5. —

²⁾ Derselbe, Der Gang des Menschen. I. bis VI. Teil. Ebenda 21, III; 25, I; 26, III u. VII; 28, V u. VII. — ³⁾ Die dritte Aufnahme ist bei Belastung mit dem vollen militärischen Gepäck ausgeführt.

getrennt, sondern während das eine Bein den Körper stützt, steht auch das andere anfänglich noch auf dem Boden, und es schiebt oder stemmt den Körper vorwärts. Man kann daher drei Tätigkeiten jedes Beines im Laufe eines Doppelschrittes unterscheiden, erstens die des Stemmens, zweitens die des Vorschwunges, drittens die des Stützens. Hiermit soll nicht gesagt sein, daß während der drei so bezeichneten Perioden das Bein dauernd und ausschließlich die angedeuteten Funktionen ausübt. Andererseits kann man nach diesen Angaben in der Weise zwei Perioden unterscheiden, daß man die Zeiträume, während deren beide Füße den Boden berühren, von denen unterscheidet, während deren nur das eine Bein auf dem Boden ruht, das andere frei schwingt. Man gelangt dadurch zu folgender anschaulichen Darstellung der Tätigkeit der Beine beim Gehen, die für die Vergleichung von Gehen und Laufen, die Vergleichung der Gangarten verschiedener Tiere und andere Zwecke sehr nützlich ist.

Fig. 85.



3. Die Periode des Schwingens.

Die drei soeben unterschiedenen Tätigkeiten jedes Beines folgen einander in ununterbrochener Reihe, stehen zu denen des anderen Beines in Wechselbeziehung und gehen dadurch gewissermaßen ineinander über. Es ist mithin kein bestimmter Punkt gegeben, von dem aus man mit der näheren Beschreibung der Bewegungen beginnen kann, ohne auf die vorhergegangenen Verhältnisse Rücksicht zu nehmen. Am günstigsten ist hierfür vielleicht der Augenblick, in dem der eine Fuß den Boden verläßt. Es möge der Anschaulichkeit halber der bestimmte Fall des rechten Beines gewählt werden. In dem Augenblick also, wo das rechte Bein den Halt am Boden verläßt und frei zu schwingen beginnt, steht der linke Fuß, um eine Schrittlänge vorgesetzt, schon auf dem Boden. Die Hüftgelenke und der Oberkörper befinden sich etwas über die Mitte zwischen beiden Füßen hinaus vorgeschoben, das linke Bein ist also noch merklich nach rückwärts geneigt.

Da das Bein in dieser Stellung den Körper nicht eigentlich tragen kann, ist die Bezeichnung „Periode der Unterstützung“, wie oben gesagt, eine bloß formelle. Um die Bewegung des rechten Beines darzustellen, braucht vorläufig die Frage der Unterstützung durch das linke nicht erörtert zu werden.

Das Hüftgelenk bewegt sich, indem die Gangbewegung ihren Fortlauf nimmt, in einer flach konkav aufsteigenden Kurve, die alsbald in eine konvexe übergeht, bei ungefähr senkrechter Stellung des linken Beines ein Maximum erreicht und dann wieder absinkt. Das rechte Bein ist im Augenblick, wo es den Boden verläßt, im Knie leicht gebeugt (150°) und diese Beugung nimmt zu, indem das Bein vorschwingt, bis der Oberschenkel die Senkrechte überschritten hat, dann tritt, während der Oberschenkel 25° nach

vorn schwingt, völlige Streckung im Kniegelenk ein. Das Fußgelenk macht währenddessen eine Dorsalflexion von 10^0 und kehrt wieder fast zur Anfangsstellung zurück. Ehe das Bein auf dem Punkte ankommt, an dem es wieder auf den Boden gesetzt wird, findet schnell noch eine leichte Beugung des Knies und des Fußes statt.

Diese ganze Bewegung des freischwingenden Beines wurde von den Gebrüdern Weber im wesentlichen für eine einfache Pendelbewegung erklärt. Sie stützten diese Annahme unter anderem auf die Tatsache, daß die Schrittdauer auffallend konstant und von der Länge des Beines abhängig ist, und auf die Übereinstimmung zwischen dem betreffenden Teile der Schrittdauer und der Schwingungsdauer eines Beines an der Leiche. Daraufhin wurde die „Pendeltheorie“ allgemein angenommen, obschon hin und wieder Einwände dagegen erhoben wurden.

So bemerkte Duchenne, daß das Vorschwingen des Beines bei Lähmung gewisser Muskeln gestört sei, und folglich keine rein passive Schwingung sein könne. Dieser Einwand ist nicht ganz stichhaltig, weil durch die Lähmung die Bedingungen der Schwingung überhaupt andere geworden sein können. Eine Entscheidung war wegen der Mannigfaltigkeit der einwirkenden Nebenbedingungen äußerst schwer zu erbringen. Das Bein stellt ein Doppelpendel dar, das als durch den Muskelzug mehr oder weniger gedämpft angesehen werden muß und das infolge der Gestalt des Kniegelenks nur nach einer Seite frei einknicken kann. Außerdem sind die Bedingungen für die Schwingung, wie Fischer hervorhebt, dadurch verändert, daß sich der Aufhängungspunkt während der Schwingung in Bewegung befindet. Was unter solchen Bedingungen die Form der reinen Pendelschwingung sein müßte, war weder theoretisch noch experimentell leicht zu bestimmen.

Es ist Fischer vorbehalten geblieben, durch Bestimmung sämtlicher auf die einzelnen Teile der unteren Extremität während der Schwingung einwirkender Kräfte zu ermitteln, daß den Muskeln größerer Einfluß zukommt als der Schwere. Auf die beteiligten Muskeln kann aus ihrer berechneten Wirkung mit einiger Wahrscheinlichkeit geschlossen werden. Im ersten Teile der Schwingung wirken die vorderen Muskeln, *Psoas*, *Rectus femoris*, *Tibialis anticus*. Dann erschlaffen sie allmählich und es tritt eine Periode ein, während der nur der Fuß durch den *Tibialis anticus* leicht angezogen wird, das übrige Bein aber ohne wesentliche Muskeltätigkeit schwingt. Als bald beginnt aber wieder Anspannung, diesmal der hinteren Muskeln des Oberschenkels. Im letzten Augenblick muß eine starke Kontraktion des *Tibialis anticus* eintreten, denn wie angegeben, findet eine plötzliche Dorsalflexion des Fußes statt. Diese dient wahrscheinlich, ebenso wie die erwähnte Bewegung des Knies, dazu, den Stoß beim Aufsetzen des Beines zu mildern.

4. Die Periode des Stützens.

Von dem Augenblicke, wenn das Bein den Boden berührt, beginnt die sogenannte Periode des Stützens, obschon, wie gesagt, das Bein zunächst durchaus noch nicht in einer Stellung ist, in der es den Körper wirklich tragen kann. Das ganze, im Knie nahezu gestreckte Bein bildet nämlich in diesem Augenblicke einen Winkel von etwa 25^0 mit der Senkrechten.

In diesem Punkte entfernte sich die Lehre der Gebrüder Weber wohl am weitesten von der Wahrheit, denn sie glaubten annehmen zu müssen, daß das Bein nach dem Vorschwingen in senkrechter Stellung auf dem Boden zu stehen komme.

Der Fuß wird mit dem Hacken zuerst aufgesetzt, nicht wie es der Parade-marsch und die Tanzmeister vorschreiben, mit dem Ballen, und schlägt dann mit der Sohle auf den Boden, auf dem er verharret, bis das Bein etwas über die senkrechte Stellung hinaus vorgerückt ist. Nach Ausweis der Fischer-schen Aufnahmen ruht die Sohle nicht absolut fest auf dem Boden, sondern die Bewegung des Hinunterklappens der Sohle setzt sich in Form einer ganz leisen Neigung des Fußes fort, die in ein ebenso geringfügiges Kippen nach vorn übergeht. Man erhält unmittelbar den Eindruck, daß die Körperlast auf dem nachgiebigen Polster der Fußsohle gleichsam hinüberschaukelt.

Schematisiert man das vorn aufgesetzte Bein als eine steife Stütze von unveränderlicher Länge, so ist es klar, daß, wenn der untere Endpunkt auf dem Boden feststeht und der obere sich mit dem Körper vorwärts bewegt, dieser obere Punkt einen Kreisbogen um den unteren Endpunkt beschreiben und senkrecht über diesem seine höchste Stellung erreichen muß. Tatsächlich findet eine derartige Bewegung des Hüftgelenkes statt, die aber verschiedener Nebenumstände wegen von der reinen Kreisbewegung stark abweicht. Das Bein ist ja in Wirklichkeit keine starre Stütze, und es erfährt, wiederum im Gegen-satz zur Annahme der Gebrüder Weber vom Augenblick des Aufsetzens des Fußes an bis zum Einnehmen der senkrechten Stellung eine zunehmende Streckung im Kniegelenk. Hieraus ergibt sich die oben schon erwähnte, erst konkav, dann konvex aufsteigende Bahn des Hüftgelenkes während des ersten Teiles der Periode des Stützens. Der Anstieg ist hier erheblich steiler als die Kreiskurve sein würde, weil ja der Radius durch die Streckung des Knies vergrößert wird.

Von der mechanischen Wirkung des Beines in dieser Periode kann man aus den mitgeteilten Angaben eine ziemlich deutliche Vorstellung gewinnen, obschon genauere Untersuchungen noch nicht vorliegen. Die Streckung im Kniegelenk ist offenbar aktiv und muß durch die Hüft- und Oberschenkel-muskeln bewirkt werden. Einen Begriff von der Größe der Leistungen kann man sich machen, indem man die von Fischer bestimmte Kurve der verti-kalen und horizontalen Komponenten des Bodendruckes betrachtet. Zwar beziehen sich die Angaben auf den Gesamtdruck, aber für die Zeiträume, während der nur ein Fuß auf dem Boden ruht, ist natürlich der Gesamtdruck mit dem Druck auf den einen Fuß identisch. Selbstverständlich ist der Druck des Bodens gegen den Fuß ganz dasselbe, wie der Druck des Fußes oder Beines gegen den Boden, und es bringt nur die Form der Rechnung diese Ausdrucks-weise mit sich. In dem Augenblick, wenn der rechte Fuß den Boden berührt, also zu Beginn der Periode des Stützens, ändert sich der Gesamtdruck nicht, sondern bleibt konstant. Hieraus ist zu schließen, daß ein ganz gleichmäßiger Übergang der Last von dem hinten stehenden Fuße auf den vorwärts gestellten stattfindet. Der senkrechte Druck auf den Boden betrug zu dieser Zeit für die Versuchsperson von 58,4 kg fast genau 70 kg, also etwa 15 Proz. mehr als das Körpergewicht. Indem das stützende Bein bis zur Senkrechten vor-schreitet, übt es anfangs noch steigenden, dann schnell absinkenden Druck aus, und zwar betrug das Maximum fast 77 kg. Sehr bemerkenswert sind die gleichzeitigen Werte der horizontalen, in die Richtung des Ganges fallenden Komponente des Bodenwiderstandes. Sie beträgt für die Zeit, unmittelbar nachdem der linke Fuß den Boden verlassen hat — 7 kg und gleich darauf

sogar — 16 kg und bleibt während der Periode des Stützens negativ, d. h. es ist ein erheblicher Widerstand der Bodenreibung in der Gangrichtung zu überwinden. Dieser Widerstand ebenso wie die Vermehrung des Druckes über das Körpergewicht hinaus rührt natürlich davon her, daß die Last des Rumpfes der Hebung widerstrebt, zu der sie durch das schräg nach vorn gesetzte und obendrein sich streckende Stützbein gezwungen wird.

5. Die Periode des Stemmens.

Die Periode des Stützens geht, noch während das andere Bein schwingt, in die des Schiebens oder Stemmens über, sobald das Bein die senkrechte Lage überschreitet. Schon als bloße Stütze würde von diesem Augenblicke an das Bein eine Vorwärtsbewegung des Rumpfes verursachen, indem die Last auf dem oben erwähnten Kreisbogen nach vornüber zu fallen streben würde. Diese vorwärtsschiebende Wirkung erhält dadurch Kraft und Nachdruck, daß das Bein erst vollends im Knie und alsdann auch im Fußgelenk gestreckt wird, wobei Fußballen und Fußspitze allein auf dem Boden bleiben. Durch diese Verlängerung des Beines erhält die Bahn des Hüftgelenkes eine flachere Krümmung, als dem Kreise von der Länge des senkrecht stützenden Beines entsprechen würde. Immerhin aber bewegt sich das Hüftgelenk und mit ihm der ganze Oberkörper in einer absteigenden Kurve. Wenn das Bein allmählich aus seiner senkrechten Stellung um etwa 25° nach vorn geneigt ist und die Streckung des Fußgelenkes etwa halb vollendet ist, beginnt wieder Beugung des Knies. Dadurch und durch die für die Periode des Schwingens schon angegebene Streckung des Knies im linken schwingenden Beine kommt dessen Ferse zum Aufschlagen auf den Boden und es beginnt für das linke Bein die Periode des Stützens. Infolge der starken Streckung des rechten Fußgelenkes und der beginnenden Streckung des linken Kniegelenkes wird in diesem Augenblicke die absteigende Kurve der Hüftgelenksbahn in die aufsteigende übergeführt. Gleich darauf ist die Streckung des Fußgelenkes vollendet, es tritt Beugung im Fuß- und Kniegelenk ein und das dadurch verkürzte, durch die Streckung und Vorwärtsbewegung des Stützbeines angehobene Bein löst sich vom Boden und geht in die Periode des Schwingens über.

Die Bewegung des Fußes, während er auf dem Boden ruht, ist von den Gebrüdern Weber als das „Abwickeln“ der Sohle am Boden bezeichnet und mit dem Abrollen der Felge eines Rades verglichen worden. Da der Fuß mit der Ferse aufgesetzt wird, dann mit der ganzen Sohle aufliegt, dann hinten gehoben wird und zuletzt mit der Spitze den Boden verläßt, so ist allerdings eine äußere Ähnlichkeit mit der Rollbewegung vorhanden. Der Sache nach aber ist die Bewegung des Fußes etwas von der eines rollenden Rades nicht nur verschiedenes, sondern von Grund aus entgegengesetztes. Die Fortbewegung beim Gehen beruht wesentlich auf der Verlängerung des stemmenden Beines durch die Streckung im Fußgelenk. Für die Rollbewegung ist im Gegenteil bezeichnend, daß sie nur bei runden Körpern, die allseitig gleichen Radius haben, in ausgeprägter Form zustande kommt. Daher ist der Vergleich zwischen Gehbewegung und Radrollung von Grund aus verfehlt.

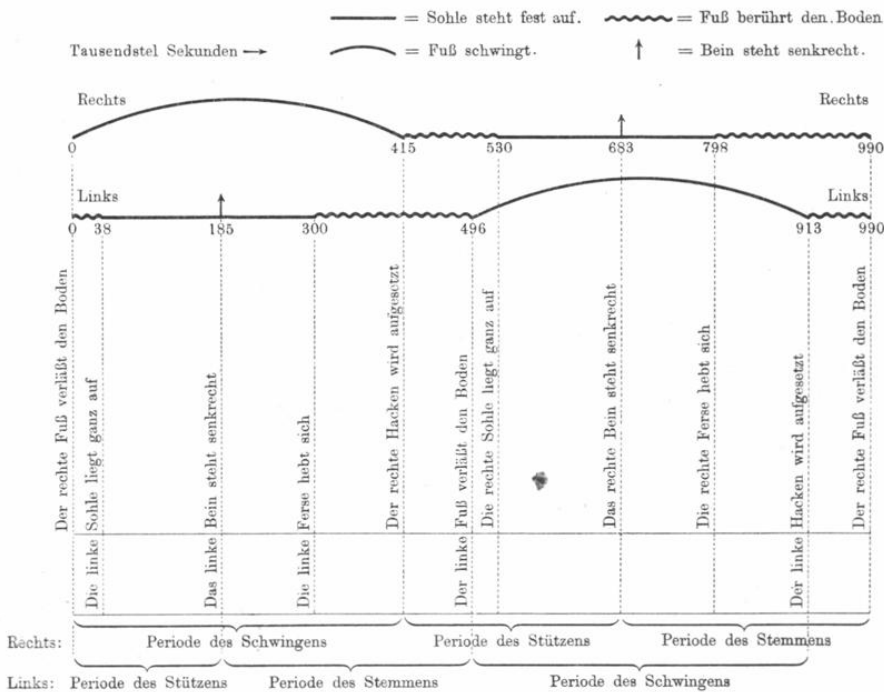
Die Wirkung des stemmenden Beines ist wiederum aus Fischers Untersuchung über die gegen den Boden ausgeübten Kräfte zu erkennen. Im Augenblick, wo die Senkrechte überschritten ist, also das Hüftgelenk eben den Höhepunkt seiner Bahn erreicht hat, besteht offenbar eine Art Schleuderung des Oberkörpers, denn der senkrechte Druck des allein auf dem Boden

ruhenden Fußes beträgt für das Körpergewicht 58,7 kg nur etwa 20 kg, also beträchtlich weniger als die Hälfte. Der Druck nimmt erst schnell, dann langsam wieder zu und erreicht, während die Sohle noch ganz auf dem Boden ruht, den vollen Betrag des Körpergewichts, den er alsbald, während durch die Streckung des Fußgelenks der Oberkörper gehoben wird, bis zu etwa 30 Proz. überschreitet. Während des letzten Teiles des Stemmens, wenn der andere Fuß schon aufgesetzt ist, findet die eigentümliche Übertragung des Gewichtes von einem Fuß auf den anderen ohne Veränderung des Gesamtdruckes statt, von der oben schon die Rede war. Die vorwärtstreibende Wirkung des stemmenden Beines äußert sich in einer rückwärts gerichteten Schubkraft, die von 0 bis gegen 12 kg anwächst.

6. Übersicht über die zeitliche Verteilung der Beintätigkeiten.

Um eine bessere Übersicht über die Wechselbeziehungen zwischen den beschriebenen Tätigkeiten der beiden Beine zu ermöglichen, mögen hier die wichtigsten Punkte nach Raum und Zeit nochmals zusammengestellt werden.

Fig. 86.



Die Dauer des Doppelschrittes von 0,990 Sek. werde in 20 gleiche Teile zerlegt, um ebensoviele Phasen der Gangbewegung bezeichnen zu können. Das Zeitintervall beträgt demnach 0,0495 Sek. Die Länge des Doppelschrittes betrug 155,75 cm, bei der ungleichförmigen Geschwindigkeit sind aber die Raumabstände der einzelnen Phasen untereinander verschieden. Die Stellungen

der Beine im allgemeinen sind aus der Tafel zu ersehen, die zeitlichen Verhältnisse der Anfangs- und Endpunkte der einzelnen Tätigkeiten sind auf der nachfolgenden Übersicht zusammengestellt.

7. Accessorische Bewegungen der Beine.

Außer den bis hierher beschriebenen Bewegungen, die unmittelbar der Fortbewegung dienen, sind nun noch eine ganze Reihe anderer Bewegungen der Beine beim Gehen wahrzunehmen, nämlich Bewegungen in der Richtung quer zur Gangrichtung.

Der Fuß wird nicht genau mit sich selbst parallel nach vorn gebracht, sondern wird im ersten Teile des Schwingens ein wenig einwärts gedreht, schwingt am anderen Beine gerade gerichtet vorbei, wird aber vor dem Aufsetzen wieder ein wenig (10 bis 15°) nach außen, und während des Niederfallens der Sohle wieder zurück gedreht. Die Fußspitze beschreibt demnach, von oben gesehen, eine Wellenlinie, da sie bald mehr, bald weniger von der senkrechten Mittelebene abweicht.

Das Fußgelenk, also das untere Ende des Unterschenkels, macht dieselbe Seitenbewegung mit, aber in geringerem Maße als die Fußspitze, beschreibt also eine flachere Wellenlinie von derselben Art. Das Knie macht während des Schwingens eine Kurve nach lateralwärts, von der es erst kurz vor dem Aufsetzen des Fußes zurückkehrt, so daß um diese Zeit der Unterschenkel senkrecht steht. Während des Aufsetzens erfolgt eine beträchtliche Abweichung des Knies nach lateralwärts, und indem der Unterschenkel sich vorwärts zu neigen beginnt, richtet er sich zugleich nach medialwärts auf, indem das Knie wieder medialwärts rückt. Während des Abwickelns der Sohle beginnt dann wieder die seitliche Abweichung, die während des Schwingens ihren Fortgang nimmt.

Durch diese Bewegung des Knies und die der Hüfte werden die seitlichen Bewegungen des Oberschenkels bestimmt. Das Hüftgelenk beschreibt in der Seitenrichtung eine ziemlich regelmäßige, flache Wellenlinie, indem es während des Schwingens nach medialwärts, während des Auftretens nach lateralwärts bewegt wird. Daraus ergibt sich mit Rücksicht auf die gleichzeitigen Seitenbewegungen des Kniegelenks, daß der Oberschenkel im ersten Teile der Schwingung vom Knie aus gerechnet medialwärts geneigt ist, vor dem Aufsetzen lateralwärts, während des Aufsetzens senkrecht steht und während des Stemmens erst eine Neigung lateralwärts macht, um durch die senkrechte Ebene wieder zur Neigung medialwärts überzugehen.

Für die Bedeutung des Beines als Stütze ist die Beziehung der Lagen des Hüftgelenks zum Fußgelenk wichtiger als die Stellung von Oberschenkel und Unterschenkel für sich. In dieser Beziehung ergibt sich, daß während des Aufstehens eines Fußes das Hüftgelenk um mehr als 5 cm weiter lateralwärts steht als das Fußgelenk, dagegen während des Schwingens der Fuß senkrecht unter der Hüfte getragen wird. Der Übergang geschieht allmählich und annähernd gleichförmig.

Über die Beanspruchung der Muskulatur durch diese schräge Stützung ist nichts bekannt, doch ist anzunehmen, daß die Abduktoren und Adduktoren in ähnlicher Weise, aber in geringerem Maße angespannt werden, wie beim asymmetrischen Stehen.

Diese seitlichen Bewegungen der Beine stehen natürlich im Zusammenhang mit der Erhaltung des Körpergleichgewichts gegenüber der Neigung zum Seitwärtsfallen. Dies gilt nicht nur von denjenigen Zeiträumen, in denen das Bein als Stütze des Körpers auf dem Boden ruht, denn auch die seitlichen Bewegungen während des Schwingens müssen an dem Körper, an dem das Bein hängt, entsprechende Gegenwirkungen hervorrufen. Die letzterwähnten Beziehungen der Lage des Hüftgelenks zum Fußgelenk sind so zu erklären, daß der Körper, während ein Bein aufsteht, nach der Seite dieses Beines hinüber geschoben wird, damit der Schwerpunkt wenigstens annähernd über die Unterstützungsfläche komme.

In dieser Beziehung ist zu bemerken, daß der Fuß auf den Boden, außer dem senkrechten Druck und dem Schub in der Richtung des Ganges, auch seitliche Schubkräfte ausübt.

Während das rechte Bein frei schwingt, drückt die Sohle des linken Fußes nach rechts. Man kann dies beim Gehen auf einer wackeligen oder leicht verschieblichen Unterlage mitunter deutlich wahrnehmen.

Endlich ist noch zu allen diesen Angaben zu bemerken, daß sich rechtes und linkes Bein, wie auch aus den angeführten Zahlen zu erkennen ist, nicht genau gleich verhalten. Aus der Gesamtheit der von Fischer gemachten Beobachtungen läßt sich schließen, daß es sich hierbei nicht um bloße Zufälligkeiten oder Unregelmäßigkeiten in der Gangbewegung, sondern um eine Konstante, auf die Verschiedenheiten im Körperbau der rechten und linken Seite begründete Erscheinungen handelt.

Der Einfluß der Asymmetrie im Bau der Knochen und des gesamten Körpers auf die Bewegungsweise von Menschen und Tieren ist von Guldberg¹⁾ untersucht worden.

II. Die Bewegungen des Oberkörpers.

1. Überblick.

Die Tätigkeit der Beine ist als der wesentlichste Teil der Gehbewegung im obigen ausschließlich besprochen worden. Selbstverständlich ist aber beim Gehen kein einziger Teil des Körpers unbewegt, und in jedem Augenblicke ist die Bewegung jedes Körperteiles von Lage und Bewegung der anderen Körperteile abhängig. Im großen und ganzen kann die Bewegung der Beine als Ursache, die Bewegung des Rumpfes und der Arme als Folge aufgefaßt und dargestellt werden, die Einzelheiten der Beinbewegung sind aber nur aus ihren Beziehungen zur Bewegung des übrigen Körpers zu erklären.

Diese Beziehungen lassen sich nach zwei Hauptgesichtspunkten betrachten: Erstens vermitteln die Beine, die ja allein den Boden berühren, die Bewegungen des Gesamtschwerpunktes gegenüber den Widerstandskräften des Bodens. Die Endglieder in dieser Wirkungsreihe sind einerseits die Beschleunigungen und Verzögerungen, die dem Gesamtschwerpunkt in verschiedenen Richtungen erteilt werden, andererseits die Gegenwirkungen, die der Druck und die Reibung der Füße am Boden hervorruft. Beide Gruppen von Kräften können, wie dies für alle räumlichen Betrachtungen üblich ist, in je drei

¹⁾ G. A. Guldberg, *Etudes sur la dyssymmetrie morphologique et fonctionnelle chez l'homme et les vertébrés supérieurs*. Christiania 1897.

Komponenten nach drei Hauptrichtungen zerlegt werden. Zweitens sind die einzelnen Teile des Körpers gegeneinander beweglich, insbesondere der Rumpf steht auf dem Becken im Gleichgewicht, und die Bewegungen der Beine bringen fortwährende Veränderungen dieses Gleichgewichtes hervor. Die dadurch entstehenden Schwankungen werden durch Muskeltätigkeit ausgeglichen werden müssen.

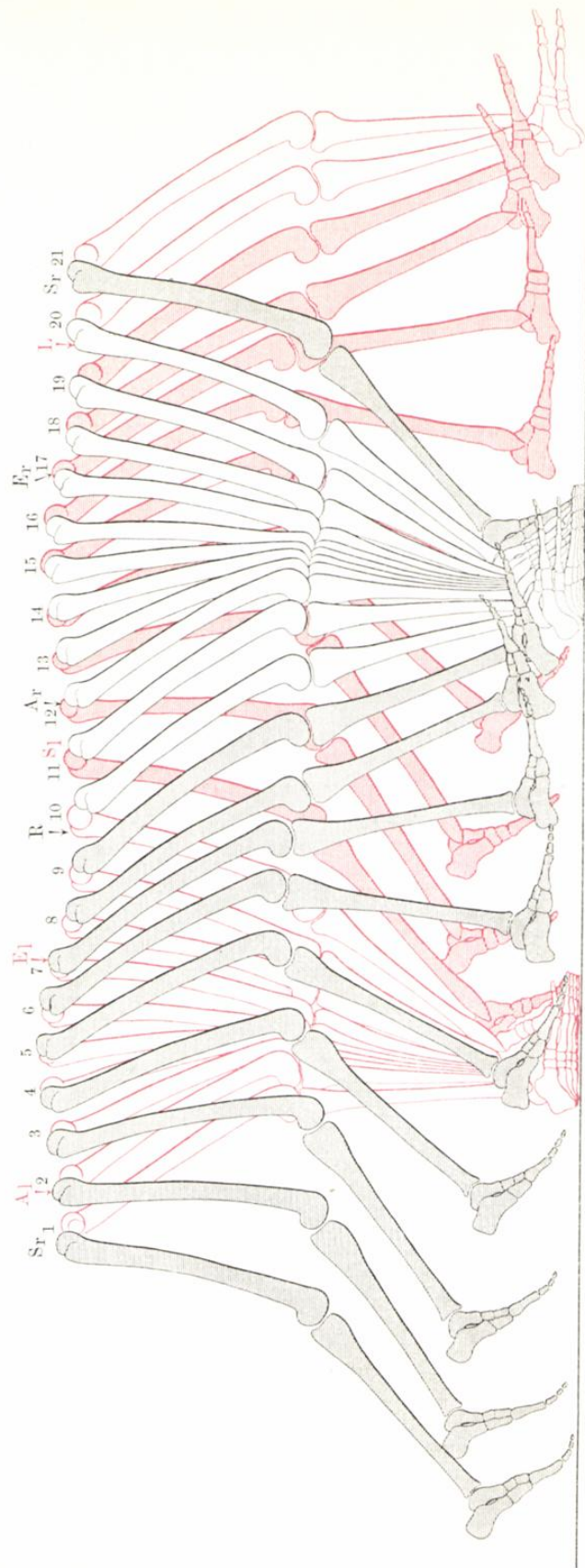
Um die mechanischen Bedingungen zu erkennen, die für jede Phase der Gangbewegung bestehen, und um wenigstens ganz im allgemeinen beurteilen zu können, welcher Art die Muskeltätigkeiten auch am oberen Teile des Körpers sein müssen, bedarf es der genauen Kenntnis der Bewegungen des Rumpfes, der Arme und des Kopfes. Aus den Stellungen dieser Einzelteile ergibt sich für jeden Augenblick die Lage des Gesamtschwerpunktes, aus dessen Lageveränderungen wieder auf die Wirkung des Bodendruckes zu schließen ist.

2. Die Bewegungen des Rumpfes.

Die Bewegungen des Rumpfes sind nach Fischers Vorgang am besten zu beschreiben, indem man die Bewegungen betrachtet, die die Verbindungslinien der beiden Hüftgelenke und der beiden Schultergelenke (kurz als Hüftlinie und Schulterlinie zu bezeichnen) ausführen, und ferner die Bewegung, die die Verbindungslinie der Mittelpunkte dieser beiden Achsen, die Rumpflinie macht.

a) Die Mitte der Hüftlinie schwankt infolge der Bewegungen, die den einzelnen Hüftgelenken von den Beinen erteilt werden, und zwar sowohl nach oben und unten, wie nach beiden Seiten, und wird dabei bald mit größerer, bald mit geringerer Geschwindigkeit vorwärts bewegt. Diese Geschwindigkeitsänderungen in der Gangrichtung lassen sich am anschaulichsten so darstellen, daß man die Geschwindigkeit in jedem Augenblick mit einer gleichförmigen mittleren Geschwindigkeit vergleicht, die der des Ganges gleich ist. Dann erscheinen Beschleunigung und Verlangsamung als Schwankungen vorwärts und rückwärts, bezogen auf eine gleichförmig bewegte Ebene. In der senkrechten Ebene beschreibt die Hüftlinienmitte eine Wellenlinie, deren Wellenlänge gleich der eines einfachen Schrittes ist und deren Höhe etwas über 4 cm beträgt. Der höchste Punkt liegt je an der Stelle, an der ein Bein nach dem Aufsetzen senkrecht steht, der tiefste Punkt zu Anfang der Schwingung des Beines. Die steilste Stelle der Kurve liegt im ersten Teile des absteigenden Astes. Siehe Taf. I. Die seitlichen Schwankungen erzeugen eine Wellenlinie in horizontaler Ebene mit der gleichen Periode, indem jedesmal dem senkrechten Stande eines Beines die größte Abweichung nach der Seite dieses Beines, dem Beginn der Schwingung eines Beines die größte Abweichung nach der Seite des anderen Beines entspricht. Die Schwankungen der Geschwindigkeit haben ebenfalls die gleiche Periode, ihre Minima und Maxima fallen etwas früher als die der anderen Kurven. Die Abweichung von der gleichförmigen Bewegung beträgt etwa $\pm 1,5$ cm.

Aus diesen drei Schwingungen des Hüftlinienmittelpunktes setzt sich seine eigentliche Bahn zusammen, die man nach Carlet annähernd beschreiben kann, indem man sich längs der Unterseite eines in der Gangrichtung horizontal stehenden Zylinders von etwa 2 cm Durchmesser eine Schlangenlinie beschrieben denkt, so daß die Gipfel der Wellen links und rechts bis etwas über den größten Durchmesser hinaufreichen.



Bewegung der Beine beim Gehen nach O. Fischer.

Es bedeutet: *Ar* und *Al* den Anfang, *Er* und *El* den Endpunkt der Zeit, während der die ganze Sohle auf dem Boden ruht, *R* und *L* die Augenblicke, wenn der rechte und linke Fuß den Boden berühren, *Sr* und *Sl* die Augenblicke, wenn sie zu schwingen beginnen.

Nagel, Physiologie des Menschen. IV.

Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Die Bewegungen der Hüftgelenkmittelpunkte sind annähernd dieselben wie die der Hüftlinienmitte, so daß die Hüftlinie annähernd sich selbst parallel bleibt. Die Abweichungen sind anschaulich darzustellen als Schwingungen der Hüftlinie um ihren ruhend gedachten Mittelpunkt.

Für jeden Zeitpunkt läßt sich dann leicht angeben, um wieviel einer der Hüftgelenkmittelpunkte höher oder niedriger, weiter vor- oder rückwärts steht als die Hüftlinienmitte. Der seitliche Abstand kann für die geringen vorkommenden Winkelausschläge der Hüftlinie als gleichbleibend bezeichnet werden. Selbstverständlich muß, wenn für ein Hüftgelenk die Stellung gegeben ist, das andere die entsprechend entgegengesetzte Lage haben.

Die Lage der Hüftlinie, die durch diese Betrachtungen dargestellt werden soll, ist abhängig von der Stellung der beiden Hüftgelenkmittelpunkte gegeneinander. Daher hängt auch die Periode ihrer Bewegungen nicht von der Periode eines Hüftgelenkpunktes allein ab. In dem Augenblick, wenn das linke Bein senkrecht steht, hat der rechte Hüftgelenkmittelpunkt seine höchste Stellung. Er senkt sich seiner tiefsten Stellung relativ zur Hüftlinienmitte zu, die er erreicht, bevor das schwingende Bein aufgesetzt wird. Ungefähr zu Beginn der Schwingung des linken Beines hat er abermals den höchsten Stand relativ zur Hüftlinienmitte erreicht und in der Mitte der Schwingung des linken Beines abermals seinen tiefsten Stand. Das rechte Hüftgelenk hat also relativ zur Hüftlinienmitte seinen höchsten Stand, wenn das rechte Bein schwingt und nachdem das rechte Bein aufgesetzt ist, und seinen tiefsten, ehe das rechte Bein aufgesetzt wird und wenn das linke Bein schwingt. Zwischen dem Augenblick, wenn das linke Bein senkrecht steht und dem, wenn das rechte senkrecht steht, schwankt also die rechte Hälfte der Hüftlinie abwärts, aufwärts und wieder abwärts. Sie macht also während eines einfachen Schrittes drei halbe Schwingungen. Die Ausschläge sind freilich nur klein, indem der Unterschied im Stande der beiden Hüftgelenke gegeneinander nur etwa 1 cm beträgt.

In der Gangrichtung sind die Schwingungen viermal so groß, sie haben aber eine einfache Periode, indem nur mit jedem Vorschwunge des Beines der zugehörige Hüftgelenkmittelpunkt nach vorn voreilt, während der gegenseitige zurückbleibt. Die größte Abweichung fällt auf den Augenblick des Niedersetzens des Fußes.

b) Die Bewegung der Schulterlinienmitte läßt sich nun am einfachsten durch die Bewegungen bezeichnen, die ihre Verbindungslinie mit der Hüftlinienmitte, die Rumpflinie, ausführt. Im Augenblick, wenn das rechte Bein aufgesetzt wird, ist die Rumpflinie am meisten nach rechts geneigt. Nach dem Aufsetzen schwingt sie sogleich zurück und über die Mittelstellung hinaus, macht einige Schwankungen, und ist beim Aufsetzen des linken Beines wieder am meisten nach rechts geneigt. Der Gesamtumfang der seitlichen Schwingungen der Schulterlinienmitte gegen die Hüftlinienmitte bleibt unter 1,5 cm.

Diese Schwingungen sind den seitlichen Bewegungen des Hüftgelenkes entgegengesetzt, führen also gewissermaßen eine Ausgleichung herbei.

Die Vorwärts- und Rückwärtsneigung der Rumpflinie steht in Beziehung zu den vertikalen Schwankungen der Hüftgelenkmitte, in dem die stärkste Rückwärtsneigung jedesmal vor einem Maximum der vertikalen Wellenlinie

des Hüftlinienmittelpunktes, die stärkste Vorwärtsneigung nach diesen Zeitpunkten fällt. Der Rumpf ist demnach rückwärts geneigt, vom Aufsetzen jedes Fußes an bis das Bein senkrecht steht, und vorwärts von diesem Augenblicke an, bis das andere Bein aufgesetzt wird. Die Größe der Schwankungen in dieser Richtung ist nicht unbeträchtlich, denn der Umfang der Ausschläge der Schulterlinienmitte gegenüber der Hüftlinienmitte beträgt im ganzen 2,5 cm.

Es ist besonders interessant, daß auch die Schulterlinienmitte gegen die Hüftlinienmitte eine merkliche Vertikalbewegung ausführt, daß also der Rumpf beim Gehen sich in sich selbst verlängert und verkürzt. Diese Bewegung hat ein deutliches Maximum am Beginn der Stemmperiode jedes Fußes, ein Minimum am Beginn der Schwingungsperiode. Absolut gerechnet beschreibt natürlich die Schulterlinienmitte trotzdem in der vertikalen Ebene eine Wellenlinie, die ungefähr der der Hüftgelenkmitte parallel ist.

Die Bewegungen der Schultergelenkmittelpunkte gegenüber der Schulterlinienmitte haben ganz denselben Verlauf wie die der Hüftgelenkmittelpunkte gegenüber der Hüftgelenkmitte, haben aber entgegengesetzte Richtung. Es tritt also hier dasselbe ein, wie bei der seitlichen Bewegung der beiden Mitten gegeneinander, nämlich die Bewegung der Schultern bewirkt eine Art Ausgleichung der Bewegung in den Hüften. Dies gilt sowohl von den Bewegungen vor- und rückwärts, wie von denen auf- und abwärts.

3. Die Bewegung des Kopfes.

Die Bewegungen des Kopfes auf dem Rumpf lassen dieselbe Erscheinung erkennen. Die Verbindungslinie von Scheitelpunkt und Schultergelenkmitte, die „Kopflinie“, macht seitliche Bewegungen, die denen der Rumpflinie entgegengesetzt sind, aber in der Periode mit ihnen übereinstimmen. Diese Schwingungen sind klein, so daß der Scheitelpunkt gegen die Schulterlinienmitte nur um 0,5 cm nach jeder Seite schwankt.

Die absoluten Schwankungen sind viel größer, sie betragen nach jeder Seite über 1,5 cm und entsprechen denen der Hüftlinienmitte, in dem bei jedem Schritt ein Ausschlag nach der Seite des stehenden Beines stattfindet.

Die Schwankungen des Scheitelpunktes nach vorwärts und rückwärts gegenüber der Schulterlinienmitte können über 1 cm nach jeder Seite betragen, im übrigen entsprechen sie der Bewegung des Rumpfes, d. h. es findet ein Zurückbleiben vor jedem Maximum der vertikalen Wellenlinie und ein Voreilen danach statt.

Die Vertikalschwankungen des Kopfes sind infolge dieser Neigungsveränderungen des Rumpfes von denen der Hüftlinienmitte verschieden, und zwar sind sie größer, indem die Wellenhöhe der Kurve fast 6 cm beträgt.

4. Die Bewegung der Arme.

An den Schwankungen des Rumpfes beteiligen sich die Arme, teils passiv, teils aber auch aktiv, um durch ihre Schwingungen den Oberkörper gegen Drehungen und seitliche Schwankungen zu schützen. Während das rechte Bein vorschwingt, schwingt auch der linke Arm vorwärts, wobei der Unterarm allmählich stärker gebeugt und adduziert wird. Im Augenblick, wenn

der rechte Fuß aufgesetzt wird, schwingt der linke Arm heftig zurück, wobei der Unterarm wieder nahezu gestreckt und stark abduziert wird. Bei dieser Bewegung findet jedenfalls auch eine Rotation im Schultergelenk statt. In der nachfolgenden Periode des Stemmens und Schwingens des rechten Beines schwingt der linke Arm wieder vor. Umgekehrt entsprechend verhält sich der rechte Arm.

III. Die Bewegung des Gesamtschwerpunktes.

1. Die Bewegung des Gesamtschwerpunktes bezogen auf gleichförmige Bewegung.

Indem man für eine große Anzahl aufeinanderfolgender einzelner Stellungen, die der Körper beim Gehen einnimmt, den Gesamtschwerpunkt bestimmt, erhält man ein genaues Bild der Bewegung des Gesamtschwerpunktes. Die Bahn des Gesamtschwerpunktes ist insofern etwas ganz anderes als die bisher besprochenen Punktbahnen, weil sie nicht von einem bestimmten Punkt des Körpers beschrieben wird, sondern von dem nur theoretisch angenommenen Schwerpunkt, der seine Lage im Körper selbst während der Bewegungen verändert.

Die Bahn des Gesamtschwerpunktes hat im allgemeinen dieselbe Form wie die der Hüftlinienmitte, unterscheidet sich von ihr aber im einzelnen doch ganz wesentlich. Insbesondere sind die Abweichungen des Schwerpunktes von einem mit der mittleren Ganggeschwindigkeit in der Gangrichtung gleichförmig bewegt gedachten Punkt kleiner als die irgend eines bestimmten Punktes im Körper. Denkt man sich durch einen solchen gleichförmig bewegten Hilfspunkt, der die Mittellage des Schwerpunktes einnimmt, drei Normalebenen gelegt, die mit ihm bewegt werden, so läßt sich die Bewegung des Gesamtschwerpunktes anschaulich auf diese Ebenen beziehen.

a) Kurz vor dem Aufsetzen eines Fußes, während das andere Bein sich noch vom Boden abwickelt, befindet sich der Schwerpunkt am weitesten nach hinten, 12 mm hinter der frontalen Normalebene. In diesem Augenblicke bewegt er sich genau mit der mittleren Ganggeschwindigkeit. Dabei befindet er sich auf der Seite des stemmenden Beines, und nähert sich der sagittalen Normalebene. Gleichzeitig bewegt er sich von oben nach unten durch die horizontale Normalebene mit dem Maximum seiner vertikalen Geschwindigkeit.

b) Beim Aufsetzen des Fußes hat der Schwerpunkt schon wieder eine beschleunigte Geschwindigkeit angenommen, die ihn der frontalen Normalebene nähert, zugleich oder unmittelbar nachher tritt er mit fast maximaler transversaler Geschwindigkeit durch die sagittale Normalebene hindurch, und setzt seine Bewegung nach unten mit abnehmender Geschwindigkeit fort.

c) In der Mitte der Periode des Aufstehens beider Füße ist er trotz dauernder Beschleunigung noch immer hinter der frontalen Normalebene, dagegen hat seine transversale Geschwindigkeit ihr Maximum erreicht, und beginnt abzunehmen, während die Bewegung nach unten ihre Grenze erreicht hat, bei einem Abstand von 2 cm unter der horizontalen Normalebene.

d) Kurz, ehe das bisher stemmende Bein den Boden verläßt, geht der Schwerpunkt mit maximaler Geschwindigkeit nach vorn durch die frontale

Normalebene, die Bewegung in transversaler Richtung geht mit maximaler und dann abnehmender Geschwindigkeit weiter, die in vertikaler Richtung beginnt von unten nach oben mit steigender Geschwindigkeit.

e) Während das zuletzt aufgesetzte Bein zur senkrechten Stellung übergeht, rückt der Schwerpunkt mit abnehmender Geschwindigkeit vor und erreicht seine vorderste Stellung 12 mm vor der frontalen Normalebene. Auch seitlich kommt er bis an die Grenze seiner Schwingung, nämlich etwa 12 mm von der sagittalen Normalebene, während er zugleich von unten her mit fast seiner maximalen Geschwindigkeit in dieser Richtung die horizontale Normalebene durchbricht.

f) Bevor noch das zuletzt aufgesetzte Bein sich vom Boden abwickelt, tritt der Schwerpunkt wieder hinter die frontale Normalebene, schwingt mit zunehmender Geschwindigkeit auf die Sagittalebene zu und erreicht seinen höchsten Stand, 2 cm über der horizontalen Normalebene. Dies ist der Augenblick, in dem der Schwerpunkt die geringste absolute Geschwindigkeit nach vorn besitzt.

g) Während der Periode des Abwickelns und Schwingens des Beines bleibt nun der Schwerpunkt allmählich hinter der frontalen Normalebene zurück, während seine seitliche Bewegung ihren Fortgang nimmt, und er sich der horizontalen Ebene von oben her mit zunehmender Geschwindigkeit nähert.

h) Mit dem Aufsetzen des schwingenden Fußes beginnt dann dieselbe Folge von neuem.

2. Die Bahn des Schwerpunktes.

Diese verwickelte Bewegungsform stellt sich nach den einzelnen Ebenen zerlegt als aus drei ganz regelmäßigen Schwingungskurven zusammengesetzt dar. Die Kurve der Bewegung in der Gangrichtung hat ein Maximum, kurz ehe der aufgesetzte Fuß senkrecht steht, ein Minimum, ehe der andere Fuß aufgesetzt wird. Der Gesamtunterschied beträgt 2,5 cm. Die Kurve der seitlichen Schwankungen macht während eines einfachen Schrittes nur eine halbe Schwingung, die einen Ausschlag von 1,3 cm nach der Seite des aufstehenden Fußes bedeutet, und ihr Maximum bei der senkrechten Stellung hat. Endlich die Kurve der senkrechten Schwankungen zeigt eine Welle nach oben im Augenblick der Streckung des stützenden Beines und eine Welle nach unten im Augenblick des Aufstehens beider Füße. Der Gesamtunterschied beträgt fast 4 cm.

Aus der solchergestalt bestimmten Bewegung des Gesamtschwerpunktes hat Fischer die Größe der erforderlichen Beschleunigungen und somit die in jedem Augenblick einwirkenden äußeren Kräfte berechnet, die oben bei der Tätigkeit der Beine angeführt worden sind. Die Berechnung der im Oberkörper wirkenden Kräfte steht noch aus.

Zum Schlusse sei erwähnt, daß Anthropologen und Kliniker eine Anzahl typischer Abweichungen vom normalen Gange unterscheiden, deren Untersuchung über das Gebiet der Physiologie hinausreicht.

Auch die Untersuchungen über den Lauf und den Sprung mögen hier unberücksichtigt bleiben, da ihre Darstellung zu weit vom allgemeinen physiologischen Gebiete ins einzelne führen würde.