Ueber

die Grundbedingungen der activen Locomotion.

Von

Dr. H. Strasser,
Privatdocent und Assistent der Anatomie zu Breslau.

I.

Active und passive Locomotion. — Locomotorische Thätigkeit, l. Kraft und l. Leistung. Der organische Körper in mechanischer Hinsicht ein System materieller Partikel mit inneren Kräften. Verschiedenheit der inneren Kräfte. Differenzirung und Gliederung des Körpers in mechanischer Hinsicht.

Die Ortsbewegung der organisirten Geschöpfe, ob sie nun auf diesem oder jenem Wege zu Stande komme, ist ein Gegenstand des höchsten Interesses, — für den Naturfreund, der mit Staunen bemerkt, wie gerade sie hunderterlei innige Wechselbeziehungen der belebten Wesen untereinander ermöglicht, für den Biologen, welcher die Bedingungen zur Erhaltung der Individuen und Arten studirt, für den Statistiker, welcher die allmähligen Veränderungen in dem Bestande und in den Grenzen der Faunen und Floren misst, und für denjenigen, welcher als Historiker die Geschichte dieser Veränderungen bis in dunkle Zeiten zurückverfolgt. Welches aber auch der Gesichtspunkt sei, von dem aus wir die Ortsbewegung betrachten, stets wird die Frage an uns herantreten, ob und wie der Organismus zu seiner Fortbewegung selber beitragen kann.

Nachdenken über den Gegenstand muss uns dann belehren, dass die Locomotion von zweierlei Art ist:

1) Im einen Falle verhält sich der Organismus passiv; er unterliegt der Einwirkung äusserer Einflüsse, der Bewegung seiner Unterlage und Umgebung, der Gewalt der Strömungen des Wasser und der Luft, dem Anprall von äusseren Körpern, die mit ihm in Oberflächenberührung gerathen, ihrem Zuge, ihrem Andrängen, oder er folgt dem Einflusse sogenannter Fernkräfte, z. B. der Schwere. Höchstens wird eine kleine einleitende Aktion seitens des Organismus ausgeführt, wird irgend ein Hinderniss aus dem Wege geräumt, welches bisher der bewegenden Einwirkung des äusseren Einflusses im Wege stand. Luftfahrende Spinnen werfen ihre Fäden aus, damit der Herbstwind sie ergreife und durch die Luft führe, Flugbeutler und Flugeichhörnchen, die fliegenden Drachen und die Flugmakis der Sundainseln springen vom Zweige ab und breiten ihre Flughaut aus, um auf ihr wie auf

schiefer Ebene von der Schwere weit hinaus nach vorn und nur ganz allmählig nach unten getrieben zu werden. Der Schiffshalter (Echeneis) saugt sich mit der merkwürdigen Platte, die er an der Oberseite seines Vorderkörpers und Kopfes besitzt, an der Unterfläche des Schiffes fest, um weite Fahrten desselben als heimlicher Passagier mitzumachen.

2) Im anderen Falle aber erscheint die Ortsbewegung unzweifelhaft ganz und gar als der Effekt einer Thätigkeit des organischen Körpers selbst; sie dauert, so lange diese Thätigkeit fortgesetzt wird, und hört mit ihr auf. Einzelnen Pflanzen, den Thieren aber fast ohne Ausnahme kommt offenbar die Fähigkeit zu, durch Impulse, welche von den Kräften des Organismus selbst ausgehen, einzelne Theile ihrer Masse und auch die Gesammtmasse ihres Körpers zu bewegen, und fast durch die ganze Thierreihe dient diesem Zwecke ein eigener Apparat mit besondern Kraft erzeugenden Gebilden, den Muskeln. Vermittelst dieser Einrichtungen ist also der Organismus selbst locomotorisch thätig, es handelt sich um active Locomotion im Gegensatze zur passiven.

Nun sehen wir aber, dass je nach den Umständen dieselbe Thätigkeit des lebenden Körpers im einen Falle die Lage desselben gegenüber der Erdoberfläche verändert, im andern nicht. Würde z. B. ohne die Thätigkeit seiner inneren Kräfte der Körper mit dem umgebenden Medium fortgerissen, von einem fremden Körper fortgedrängt, durch eine Fernkraft in Bewegung gesetzt werden, so kann der Effekt der Aktion des Körpers gerade darin bestehen, diese Einflüsse der äusseren Kräfte aufzuheben; es wird dann der Körper an derselben Stelle bleiben. Die Thätigkeit des Körpers verläuft in den beiden Fällen in derselben Weise und auch in der Wirkung liegt bei aller Verschiedenheit etwas Analoges: immer wird die Bewegung des ganzen Körpers zur Umgebung, wie sie ohne Aktion seiner inneren Kräfte vorhanden sein müsste, durch das Spiel dieser inneren Kräfte verändert; immer ist die Einwirkung der letzteren derjenigen einer äussern Kraft gleich, welche, für sich allein, auf die Gesammtmasse des Körpers bewegend wirkt. Die Verschiedenheit besteht bloss darin, dass im einen Falle diese Wirkung durch andere, wirklich von aussen kommende Einflüsse, welche von der momentanen Thätigkeit unabhängig sind, aufgehoben wird, im andern Falle nicht oder doch nur theilweise.

Zu der Fähigkeit des lebenden Organismus, durch Aktion seiner eigenen Kräfte den Ort auf der Erde zu verändern, kommt also die Fähigkeit, denselben äusseren Einflüssen gegenüber zu behaupten, zu dem Vermögen, activ sich lebendige

Kraft zu erwerben, um sie nachher arbeitleistend beim Angriffe auf irgend einen fremden Körper wieder zu verbrauchen und auszunützen, kommt das Vermögen, dem verschiebenden Einflusse, dem Angriffe anderer Körper und Kräfte Widerstand zu leisten und der Arbeit, welche diese an seinem Körper zu leisten versuchen, entgegen zu arbeiten. Aber Alles das ist nur die Aeusserung einer und derselben Thätigkeit des Körpers, einer Thätigkeit, deren Einfluss auf den Bewegungszustand der Gesammtmasse des Körpers demjenigen einer äusseren Kraft gleich ist. Es ist durchaus gerechtfertigt, unter allen Umständen diese Thätigkeit des Körpers als locomotorische Thätigkeit, ihren Effekt als locomotorische Leistung und ihren Einfluss auf die Gesammtmasse des Körpers während der einzelnen Zeiteinheit als locomotorische Kraft zu bezeichnen.

Wenn Jemand auf dem Verdecke eines Schiffes ebenso schnell nach hinten schreitet, als dieses selbst nach vorn rückt, so ändert er seinen Ort zwar in Bezug auf das Schiff, aber nicht gegenüber der Erdoberfläche. Die Thätigkeit seiner Gehmuskulatur dient nur dazu, den Impulsen, welche von der bewegten Unterlage dem Körper mitgetheilt werden, das Gleichgewicht zu halten, nicht aber dem Körper eine Bewegung gegenüber der Erdoberfläche zu ertheilen. Und trotzdem trägt Niemand Bedenken, diese Thätigkeit als eine locomotorische zu bezeichnen, offenbar, weil es sich bei der Beurtheilung der locomotorischen Thätigkeit, der aktiven Locomotion nicht um den absoluten Effekt, sondern um den relativen handelt gegenüber einem Bewegungungs- oder Ruhezustande, wie er ohne Mitwirkung der Körperkräfte statthaben müsste.

Ein Fisch oder Schwimmvogel, der auf irgend eine Weise eine gewisse Geschwindigkeit bei seiner Bewegung durch das Wasser erworben hat, kann sich nicht weiter bewegen, ohne einen Widerstand des Wassers hervorzurufen und durch denselben gehemmt zu werden, durch einen Einfluss, welcher von einer Thätigkeit des Körpers im Momente selbst unabhängig ist. Seine Geschwindigkeit muss durch diesen Widerstand allmählig aufgebraucht werden, wenn keine Aktion des Körpers zu Hülfe kommt. Man gestatte uns, diese allmählig sich verzögernde Bewegung kurzweg als den Bewegungszustand zu bezeichnen, der ohne das Eingreifen der Aktion des Schwimmfusses oder Schwimmschwanzes vorhanden wäre. Durch die Thätigkeit der Fortbewegungsorgane jedoch wird bewirkt, dass die Vorwärtsgeschwindigkeit des Thieres constant bleibt. Kein Mensch denkt daran, diese Thätigkeit anders denn als eine locomotorische Thätigkeit zu bezeichnen. Die locomotorische Kraft wirkt beschleunigend auf den Körper, ihr Effekt ist für dieselbe Zeit dem ver-

zögernden Effekte des Widerstandes auf die Vorderfläche des Körpers gleich. Die locomotorische Kraft ist durchschnittlich gleich gross, wie diejenige des hemmenden Widerstandes, aber entgegengesetzt gerichtet; sie dient also nicht dazu, die lebendige Kraft des Körpers zu vermehren, sondern nur dazu, einer zweiten, von der momentanen Thätigkeit des Körpers unabhängigen, äusseren Kraft das Gleichgewicht zu halten.

Wird zugegeben, dass für diese beiden Fälle unsere Definition zu treffend ist, dann kann consequenter Weise auch in dem folgenden Beispiele kein Zweifel an der Richtigkeit und Zweckmässigkeit derselben bestehen. Man betrachte den rüttelnden Falken, der sich trotz der Schwerkraft in freier Luft an derselben Stelle hält, oder irgend einen anderen Vogel, der durch Flügelschläge wenigstens in verticaler Richtung an derselben Stelle, auf derselben horizontalen Höhe bleibt. Hier muss nothwendig auf die gesammte Körpermasse, oder auf den Schwerpunkt derselben eine Kraft vertical nach oben wirken, welche durchschnittlich ebense gross ist, als die in entgegengesetzter Richtung wirkende Schwere, — und wenn diese aufwärts gerichtete Kraft eine Folge innerer Kräfte des Körpers (der Muskelthätigkeit) ist, so haben wir das Recht, sie als eine locomotorische Kraft, die Verhinderung der Fallbewegung als Effekt der locomotorischen Thätigkeit des Körpers, als eine locomotorische Leistung zu bezeichnen.

Die absolute Grösse der Bewegung oder Dislocation gegenüber der Erdoberfläche kann also bei der activen Locomotion nicht massgebend für die Energie der inneren, locomotorischen Thätigkeit sein und es darf die Grösse der locomotorischen Leistung nicht ohne Weiteres nach jenen Momenten bemessen werden. Bei der Untersuchung der locomotorischen Thätigkeit eines Körpers müssen vielmehr folgende Fragen gestellt werden:

Wie würde der gemeinschaftliche Schwerpunkt des Systems unter sonst denselben Verhältnissen in dem von uns zu untersuchenden Zeitabschnitte sich verhalten, wenn keine Aktion des Körpers stattfände? welche Aenderung bewirkt die Thätigkeit des Körpers in der Bewegung der Gesammtmasse? Welche äussere Kraft würde eben denselben Effekt haben? Welcher Natur ist diese Thätigkeit des Körpers? Sind alle inneren Kräfte des Körpers, welche dazu mitwirken, den Bewegungszustand der Gesammtmasse des Körpers zu ändern, ohne weiteres als Theile der locomotorischen Thätigkeit aufzufassen?

Was den letzten Punkt betrifft, so sei von vornherein bemerkt, dass hier ein Unterschied gemacht werden muss. In mechanischer Hinsicht stellt der locomotions-

fähige organische Körper ein System grösserer oder kleinerer, mehr oder weniger gegeneinander verschieblicher materieller Partikel dar, zwischen denen freie Spannkräfte, als innere Kräfte, bewegend wirken.*) Von all den inneren Kräften des organischen Körpers steht jedoch nur ein Theil zu der Lebensthätigkeit in direkter Beziehung; nur zum Theil können sie eine active Betheiligung des Körpers an seiner Locomotion, eine active locomotorische Thätigkeit, wie wir sie oben allgemeiner definirt haben, vermitteln.

Es giebt innere Kräfte, welche passiv dadurch wachgerufen werden, dass die Theilchen des Körpers durch äussere Kräfte ungleich bewegt oder ungleich in ihrer Bewegung gehemmt werden, so dass ihre gegenseitigen Entfernungen sich ändern. Sie haben mit der Lebensthätigkeit des Organismus direkt nichts zu thun und können nicht als Aeusserungen einer Thätigkeit oder Aktion des organischen Körpers gelten.

Zu dieser Categorie von inneren Kräften, Spannkräften der Lage, welche passiv durch äussere Kräfte oder Widerstände hervorgerufen sind, stehen andere innere Kräfte im Gegensatz dadurch, dass sie durch einen complicirten Lebensprozess frei werden. Sie sind in erster Linie das Resultat chemischer Prozesse und stehen hinsichtlich ihrer Grösse zu dem Umfange dieser Prozesse in Proportion. Der chemische Umwandlungsprozess aber wird durch einen Auslösungsvorgang inscenirt, welcher nur einen sehr geringen Werth an mechanischer Arbeit für sich allein darstellt, der mit der Grösse der Arbeit, welche die ausgelösten Spannkräfte zu leisten vermögen, gar nicht zu vergleichen ist. Diese ganze Kette der Erscheinungen ist als Lebensthätigkeit oder Aktion des organischen Körpers aufzufassen.

Während die Kräfte der ersten Categorie durch Aenderungen in der gegen-

*) Irgend ein begränzter Complex materieller Theilchen kann von uns als Ganzes betrachtet und als ein materielles System von anderen Körpern unterschieden werden. Alle Beziehungen zwischen Theilchen des Systemes heissen dann innere Beziehungen, solche aber zwischen dem System oder einem Theile desselben einerseits und Körpern, die nicht zum Systeme gehören, andererseits, heissen äussere. Nun wirken alle Kräfte, die wir kennen, stets gleichzeitig auf 2 verschiedene materielle Angriffspunkte in entgegengesetzter Richtung ein und stellen immer eine Wechselbeziehung zwischen mindestens 2 verschiedenen materiellen Partikeln dar. Je nachdem bloss der eine Angriffspunkt der Kraft, oder beide dem gerade von uns ins Auge gefassten Systeme angehören, ist die Kraft eine innere oder eine äussere mit Bezug auf dieses System. Im ersten Falle kommen beide Seiten der Kraftwirkung für unser System in Betracht, im zweiten Falle ist es nur die eine Seite.

Bei der Untersuchung der locomotorischen Thätigkeit eines organischen Körpers bildet naturgemäss gerade dieser Körper das System, das wir für sich als Ganzes, in seinen Beziehungen zur Umgebung und hinsichtlich des Verhaltens seiner Theile zueinander untersucht wissen wollen.

seitigen Lage der kleinsten Massenelemente erst wachgerufen werden, ohne dass die letzteren sich selber wesentlich verändern, sind die der zweiten Art in ihrem Auftreten an Umwandlungen in der Beschaffenheit der Moleküle selbst geknüpft. Sie sind der Ausdruck dafür, dass den veränderten Molekülen auch neue gegenseitige Gleichgewichtslagen entsprechen, und sie streben die Configuration des Systemes so zu ändern, dass diese Lagen erreicht werden. Die Kräfte dieser Art brauchen nicht erst passiv durch äussere Einwirkungen hervorgerufen zu werden; sie sind es, welche willkürlich, wie wir uns ausdrücken, vom Organismus in Anwendung gebracht werden können. Wir wollen uns im Folgenden nicht weiter darauf einlassen, wie diese activen Spannkräfte des Organismus frei werden. Wir betrachten sie vielmehr jeweilen für bestimmte Anordnungen und Verbindungen der materiellen Theilchen des Körpers zu einander als gegeben. Die Frage, wie nun die Locomotion im gegebenen Falle zu Stande kommt, ist dann ein rein mechanisches Problem.

Die Grösse der einzelnen Theile, welche wir als mechanische Einheiten oder „materielle Partikel“ ansehen dürfen, ist je nach der Art des Organismus und je nach dem Charakter und der erforderlichen Genauigkeit unserer Analyse eine verschiedene.

Bei den niedersten locomotorisch thätigen thierischen und pflanzlichen Organismen ist die ganze weiche, protoplasmatische Leibesmasse contraktil, das heisst die Kräfte, welche die Configuration des Körpers zu verändern streben, können an jeder Stelle desselben wachgerufen werden. Wenn auch im einzelnen Fall die Spannkräfte nicht gleichzeitig und gleichmässig zwischen allen Theilchen wirken, sondern auf bestimmte Regionen, bei den Amoeben z. B. oft auf die ausgestreckten Pseudopodien localisirt sind, wenn auch hier schon die Bewegung von den direkt gegeneinander bewegten Theilchen nur durch Vermittelung der Cohäsionskräfte auf die Nachbartheilchen übertragen wird, so ist doch die Scheidung zwischen aktiv und passiv bewegten Theilchen keine bleibende, sie wechselt von einem Augenblick zum andern und ist keine in die Augen fallende.

Ein Fortschritt in der Entwicklung des Apparates zeigt sich darin, dass die bewegenden Spannkräfte regelmässig nur in ganz bestimmten, differenzirten Theilen der Leibesmasse, in Wimpern, Geisselschwänzen, in besonderen stielartigen Fortsätzen des Körpers wachgerufen werden. Bei den Metazoen localisiren sich die Contraktionsvorgänge auf besondere Zellengruppen, auf die Cilien der Flimmerepithelien, auf Tentakel und auf spezifische Elemente im Innern der Gewebe, die Muskelzellen. Aber auch hier ist oft die Abgränzung der nur passiv mitbewegten Körpermasse in

verschiedene, jeweilen einheitlich, als Ganzes bewegte grössere Abschnitte nur undeutlich oder gar nicht nachzuweisen. Bei der Analyse des mechanischen Vorganges dürfen also auch hier immer nur relativ kleine Bezirke des Körpers als materielle Partikel figuriren.

Bei höheren Thieren aber festigen sich mehr und mehr grosse Complexe durch ein inneres oder äusseres Skelet zu einheitlichen Massen, die als Ganzes bewegt werden und sich mechanisch als Einheiten, als materielle Partikel von bedeutendem Umfange darstellen. So gliedert sich der Leib der Articulaten und Wirbelthiere in Segmente und Glieder. Die locomotorischen Kräfte localisiren sich ihrerseits auf besondere Gewebsstücke, die Muskeln, welche zwischen die Glieder und Segmente eingefügt sind. Es lässt sich oft der ganze Muskel mechanisch als einfache Kraft denken, welche mit bestimmter Grösse beiderseits auf die Anheftungspunkte des Muskels an den Gliedern einwirkt. Wenigstens erweist sich eine derartige Betrachtungsweise als zu vielen Zwecken vollkommen ausreichend und äusserst vortheilhaft.

II.

Massenmittelpunkt eines Systemes. — Bewegung der Gesammtmasse, Eigenbewegung der Partikel. — Gleichgewicht der Abstände, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Bewegungsmomente der Partikel mit Bezug auf den Massenmittelpunkt. — Gleichgewicht der inneren Kräfte. — Das erweiterte I. Newton'sche Grundgesetz der Bewegung. Das erweiterte II. Newton'sche Grundgesetz. — Gleichgewicht der durch innere Kräfte veranlassten Drehbewegungen.

Meine Absicht, die Bedingungen zu erörtern, unter denen die inneren Kräfte eines Körpers locomotorisch wirksam sein können, wird Keinem überflüssig erscheinen, welcher die Literatur über Ortsbewegung kennt. Soweit diese für gewöhnlich dem Dilettanten in Physik und Mathematik zugänglich ist, zeigt sie gerade hinsichtlich der Grundfrage bis jetzt eine empfindliche Lücke. Auch wer bei anatomischen und physiologischen Studien sein Interesse der thierischen Locomotion zuwendet, wird sich vergeblich nach einer zusammenhängendeu Darstellung der allgemeinsten mechanischen Prinzipien des Gegenstandes umsehen.

Zunächst erscheint es mir zweckmässig, einige Hauptsätze, namentlich in Bezug auf die Bewegung eines materiellen Systemes durch innere und äussere Kräfte im Folgenden zu entwickeln, da ihre genaue Kenntniss die wichtigste und unentbehrlichste Grundlage für das Verständniss der locomotorischen Thätigkeit bildet.

Doch wird mir heute meine Aufgabe sehr wesentlich dadurch erleichtert, dass J. Clerk Maxwell ein kleines Büchlein: „Matter and Motion“ geschrieben hat, in welchem die Hauptlehren über die Materie und ihre Bewegung in überraschend einfacher

und klarer Weise auseinandergesetzt sind.*) Wenn ich nun auch für die Ableitung nur gerade der für uns wichtigen Hauptsätze besser und schneller zum Ziele zu kommen hoffe, wenn ich meinen eigenen Weg gehe, so kann ich mich doch in mancher Beziehung im Hinblick auf dieses vorzügliche Werk kürzer fassen.

Man kann sich jedes materielle System in kleinste Partikel von gleicher Masse zerlegt denken. Es giebt dann für jede bestimmte Configuration des Systemes einen einzigen, in seiner Lage zu den Theilchen desselben genau bestimmten Punkt, der folgende Beziehungen giebt: Sämmtliche Abstände der Massentheilchen des Systemes von diesem Punkte geben zusammen die Summe 0. Dieser Punkt ist der Massenmittelpunkt des Systemes. Man kann diesen Satz auch folgendermassen ausdrücken: Wenn man den Abstand jedes elementaren Theilchens von diesem Punkte nach den drei Hauptrichtungen des Raumes (die man im einzelnen Falle beliebig wählen kann) zerlegt und durch drei Coordinaten mit positiven und negativen Vorzeichen ausdrückt, so ist für jede Hauptrichtung die Summe sämmtlicher positiver Coordinaten absolute gleich der Summe sämmtlicher Coordinaten mit negativem Vorzeichen.

So lange das System seine Configuration nicht ändert, behält der Massenmittelpunkt dieselbe Lage im System, kann sich aber zugleich mit diesem, gegenüber umgebenden Körpern bewegen. Seine Bewegung repräsentirt die mittlere Bewegung sämmtlicher Theilchen des Systems.**)

Wenn nun die Theilchen des Systemes in Bewegung gegeneinander begriffen sind, so dass sich die Configuration des Systemes ändert, dann bestimmt sich in

---

*) Substanz und Bewegung von J. Clerk Maxwell. Ins Deutsche übersetzt von Dr. E. v. Fleischl. Braunschweig 1879. Was der Verfasser will, das giebt er uns: eine ausgezeichnete Einleitung in das Studium der gesammten Physik.

**) Es ist das Moment einer Masse, welche derjenigen des ganzen Systemes gleich ist und die sich mit der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes bewegt (Moment = Produkt dieser Masse in diese Geschwindigkeit), an Grösse gleich und in der Richtung parallel der Summe der Momente sämmtlicher Partikeln des Systemes. (Cl. Maxwell l. c. Art. LXII). Diese Bedingung ist erfüllt in dem Fall, wo sämmtliche Theilchen gleich und parallel dem Massenmittelpunkte sich bewegen (Progressivbewegung), unter Umständen aber auch in dem Falle, wo ungleiche Bewegung der Theilchen stattfindet, nämlich dann, wenn die Bewegung in jeder kleinen zeitlichen Phase als Combination aufgefasst werden kann

a) einer Progressivbewegung sämmtlicher Theilchen mit dem Massenmittelpunkte,

b) mit einer Drehbewegung derselben um eine instantane Schwerpunktsaxe.

Das System verhält sich dabei wie ein starrer Körper.

jeder neuen zeitlichen Phase die Lage des Massenmittelpunktes auf eine neue, besondere Weise. Ist aber die Bewegung der Theilchen gegeneinander und gegenüber der äussern Umgebung noch so complicirt, so lässt sich der Bewegungszustand des Systemes doch immer auffassen als Combination

a) einer bestimmten Progressivbewegung der Theilchen mit dem Massenmittelpunkte im umgebenden Raume (Bewegung des Systemes als Ganzes, der Gesammtmasse)

b) mit einer Eigenbewegung der Theilchen (innere Bewegung des Systems).

Man kann sehr leicht die Eigenbewegung der Theilchen für sich allein ins Auge fassen, wenn man einen Augenblick sich vorstellt, dass der umgebende Raum oder die umgebende Körperwelt sich gleichzeitig mit dem Massenmittelpunkt progressiv verschiebt. Letzterer ist dann gegenüber seiner Umgebung in Ruhe. Die Eigenbewegung der übrigen Theilchen aber ist dann identisch mit ihrer Bewegung in dieser Umgebung. Trotz der ungleichmässigen Bewegung der Theilchen in letzterer muss die Lage des Massenmittelpunktes in Bezug auf letztere unverändert bleiben. Es muss in jedem Zeitmoment die Summe aller Abstände der kleinsten Masseneinheiten des Körpers von diesem Punkte = 0 sein. Diess ist nur dann möglich, wenn auch die sämmtlichen von den kleinsten Masseneinheiten in derselben Zeit zurückgelegten Bewegungsbahnen (man kann die Zeit so klein wählen, dass die Bahnen geradlinig sind) zusammen die Summe 0 geben, oder dass die Summe sämmtlicher Componenten dieser Verschiebungen in jeder der drei Hauptrichtungen für sich allein = 0 ist. Diese Behauptung lässt sich auf einfache Weise geometrisch beweisen.

Denkt man dabei an die Bahnen, welche im ersten Zeittheilchen der Bewegung zurückgelegt sind, so ergiebt sich, dass die Summe aller Beschleunigungen = 0 sein muss, wenigstens für das erste Zeittheilchen; hat man einen Moment aus dem Verlaufe der Bewegung im Auge, innerhalb dessen die Geschwindigkeit als constant angesehen werden kann, so muss für denselben die Summe aller Geschwindigkeiten = 0 sein.

Sind aber in irgend einem Momente die Theilchen derart mit Geschwindigkeiten versehen, dass dadurch an der Lage des Massenmittelpunktes nichts verändert wird, so können sie sich auch mit diesen Geschwindigkeiten noch beliebig lange fortbewegen, ohne dass eine Aenderung geschieht; jede Aenderung aber in kleiner Zeit kann durch Bewegung der Theilchen in bestimmten anderen Wegen dargestellt werden und es muss die Summe sämmtlicher Ablenkungen wieder = 0 sein; nur

dann ist auch die Summe sämmtlicher resultirenden Bewegungen der Theilchen = 0. Es muss also ganz allgemein für jedes Stadium der Bewegung die Summe der Beschleunigungen = 0 sein.

Wir haben also Folgendes gefunden: Mit Bezug auf den Massenmittelpunkt muss Gleichgewicht der Abstände aller kleinsten Masseneinheiten bestehen, und bei Configurationsänderungen in jedem Augenblick: Gleichgewicht der Dislocationen, Gleichgewicht der Geschwindigkeiten und Gleichgewicht der Beschleunigungen.*)

Wir können aber noch einen Schritt weiter gehen. Wir wissen, dass bei gleichen Massen die Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen den Kräften proportional sind. Speciell giebt der Ausdruck Bescheunigung mal Masse ein Mass der Kraft, das man als Moment bezeichnet. Damit der Massenmittelpunkt an derselben Stelle bleibt, muss also Gleichgewicht der Kräfte, und Gleichgewicht der Momente stattfinden, ganz gleichgültig wie die Kraftwirkung sich auf die einzelnen Abschnitte der materiellen Partikel vertheilt. In irgend einer Dimension des Raumes muss also die Summe der bewirkten Bewegungsmomente und muss die Summe der wirkenden Kräfte = 0 sein; d. h. in den beiden entgegengesetzten Richtungen muss gleiche Kraftwirkung stattfinden: die Aktion in einer Dimension muss gleich der Reaktion in derselben Dimension sein. Nur wenn diess der

---

*) Das Gleichgewicht der Abstände kann auch als Gleichgewicht der statischen Momente bezeichnet werden. Man denke sich das System starr, im Massenmittelpunkt unterstützt, der Schwere unterworfen, dann wird jede Bewegung als Drehung um eine von drei Hauptaxen durch den Massenmittelpunkt sich äussern. Wenn nun von den drei Axen zwei horizontal genommen werden, dann findet in Bezug auf die dritte, vertikale gar keine drehende Wirkung statt; mit Bezug aber auf die zwei horizontalen Axen herrscht Ruhe, wenn die Summe aller statischen Momente = 0 ist. Unter dem statischen Momente versteht man bekanntlich das Produkt aus der Kraft mal den Abstand ihrer Richtung von der Drehaxe. Die zwei statischen Momente jedes Theilchens in Bezug auf die zwei horizontalen Axen sind also gleich den Produkten aus dem Gewichte des Theilchens mal eine seiner beiden horizontalen Coordinaten. Ist nun die Summe aller Coordinaten der Masseneinheitan in jeder der beiden horizontalen Richtungen jeweilen = 0, so ist auch von den Summen der statischen Momente der Massetheilchen mit Bezug auf jede der beiden horizontalen Richtungen jede für sich = 0, da ja sämmtliche kleinste Theilchen laut Voraussetzung gleiche Masse und gleiches Gewicht haben. Der Körper ist also im statischen Gleichgewicht gegenüber der Schwere. Der Massenmittelpunkt ist identisch mit dem Schwerpunkte.

Die Drehbewegung eines Körpers um den Schwerpunkt kann als ein besonderer Fall einer solchen Eigenbewegung aufgefasst werden. Es findet eine ungleichartige Eigenbewegung der Partikel statt; es besteht Gleichgewicht der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in allen drei Dimensionen; die Configuration des Ganzen bleibt dieselbe.

Fall ist, wird durch die Wirkung von Kräften auf die Theilchen des Körpers an dem Bewegungszustande seines Massenmittelpunktes nichts geändert.

Alle inneren Kräfte eines Systemes nun erfüllen diese Bedingung; denn ihre Wirkung beschränkt sich auf Theile dieses Systemes und nach dem 3. Newton'schen Grundgesetze der Bewegung ist die Aktion jeder Kraft gleich ihrer Reaktion. Innere Kräfte stören also niemals das Gleichgewicht der Eigenbewegung der Theilchen etc. und sind demnach ohne Einfluss auf den Bewegungszustand des Massenmittelpunktes des Systems.*)

---

*) Ueber Materie, Bewegung und Kraft lassen sich drei Grundannahmen machen, welche nicht aus noch allgemeineren Sätzen abgeleitet werden können, nämlich

1. dass die Materie an sich träg ist und, so viel an ihr liegt, in ihrem Bewegungszustande verharrt,
2. dass die Aenderung der Bewegung der Grösse der einwirkenden Kraft proportional ist und in der Richtung der Einwirkung der Kraft erfolgt,
3. dass jede Kraft eine Beziehung zwischen zwei Körpern darstellt, dass also neben der Aktion stets eine Reaction (Wirkung nach der entgegengesetzten Richtung) vorhanden ist und dass die Wirkung der Gegenwirkung gleich ist.

Diese drei Grundannahmen entsprechen den drei Bewegungsgesetzen, welche Newton im Jahre 1686 aufgestellt hat. (Newton, Philos. nat. princ. math. London 1687 S. 19. Isaac Newton's Mathematische Prinzipien der Naturlehre. Mit Bemerkungen und Erläuterungen herausg. von J. Ph. Wolfers. Berlin 1872).

Wenn im 1. Grundgesetz wirklich die Eigenschaft der Materie an sich formulirt ist, so lässt sich doch wohl nicht, wie Cl. Maxwell annimmt, das 3. Bewegungsgesetz aus dem ersten ableiten. Das erste gilt vielmehr zunächst nur für Materie, in der gar keine inneren oder äusseren Kräfte wirkend angenommen werden. Mit Hülfe der Ableitung aber, welche soeben von uns für ein complicirtes materielles System auf Grund des 1. und 2. Bewegungsgesetzes gefolgert wurde, und indem wir das 3. Bewegungsgesetz als gesichert voraussetzten, gelangten wir zu dem Schlusse, dass solche Kräfte, die mit ihrer ganzen Wirkung bloss auf Theile desselben Systemes sich äussern, die also mit Bezug auf das System innere Kräfte sind, das Gleichgewicht der Bewegungsmomente, Beschleunigungen, Dislocationen, Abstände, welches mit Bezug auf einen bestimmten Punkt (den bisherigen Massenmittelpunkt) besteht, nicht stören und daher den Bewegungszustand des Massenmittelpunktes nicht beeinflussen, dass aber jedesmal, wenn nur der eine Theil der Wechselwirkungen oder Kräfte an dem betrachteten Systeme sich äussert, dieses Gleichgewicht nur bestehen bleiben kann in Bezug auf einen solchen Punkt, der selbst in seiner Lage resp. in seinem Bewegungszustande eine Aenderung erfährt.

Auf diese Weise gelangen wir also durch Ableitung zu einer erweiterten und praktisch wichtigen Fassung des ersten Bewegungsgesetzes, zu der Folgerung nämlich, dass bei jedem noch so complicirten materiellen Systeme der Massenmittelpunkt trotz aller inneren Kraftwirkungen in seinem Bewegungszustande verharrt.

Wäre aber dieser Satz durch die Erfahrung ausser allen Zweifel gesetzt, dagegen bezüglich des 3. Grundgesetzes nur die allgemeine Annahme gegeben, dass eine Kraft immer nach 2 Seiten wirkt, das Verhalten der Aktion zur Reaction aber an sich zweifelhaft, so würde die Thatsache,

Wir haben also folgenden wichtigen Satz gewonnen, den wir als Erweiterung des ersten Newton'schen Grundgesetzes der Bewegung auffassen können:

Die Masse eines materiellen Systemes als Ganzes genommen, oder der Massenmittelpunkt desselben verharrt in seinem Bewegungszustande, so viel an dem Systeme selbst liegt, mag dasselbe noch so complicirt sein und mögen noch so complicirte innere Wechselwirkungen in demselben stattfinden. Wohl aber muss jede äussere Kraft eine Wirkung auf den Massenmittelpunkt haben.

Dass genauere Verhältniss nun zwischen dieser Aenderung der Bewegung der Gesammtmasse und der Wirkung äusserer Kräfte wird durch ein zweites wichtiges Gesetz gegeben, das man als erweitertes zweites Newton'sches Grundgesetz der Bewegung auffassen kann. Wir wollen dasselbe durch folgende drei Sätze in seinem ganzen Umfange formuliren:

a) Wenn irgend eine Partialmasse eines Systemes mit der Einwirkung einer Kraft eine bestimmte Aenderung ihres Bewegungszustandes erfährt, so erfährt dadurch der Massenmittelpunkt des ganzen Systemes eine Aenderung seiner Bewegung. Und zwar verhält sich dabei die Grösse der Beschleunigung des Gesammtmassenmittelpunktes zu derjenigen des Partialmassenmittelpunktes umgekehrt wie die Grösse der Gesammtmasse zur Grösse der Partialmasse. Die Richtung der Bechleunigung aber ist dieselbe.

Daraus folgt unmittelbar:

b) Dass der Gesammtmassenmittelpunkt genau so in seiner Bewegung beeinflusst wird, als ob die Gesammtmase in ihm concentrirt wäre und die äussere Kraft in ihrer ursprünglichen Grösse und Richtung direkt auf ihn einwirkte. Was aber für eine Kraft gilt, gilt auch für die gleichzeitige Einwirkung beliebig vieler äusserer Kräfte. Ist der Impuls einer Kraft = Grösse der Kraft $\times$ Zeit ihrer Einwirkung = Grösse der beschleunigten Masse $\times$ Grösse der Beschleunigung in dieser Zeit = Moment des Körpers,

c) so wird die Veränderung des Momentes des Systemes während

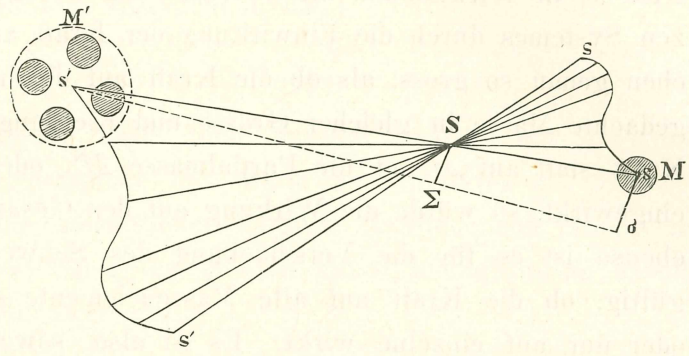
---

dass innere Kräfte an der Bewegung des Massenmittelpunktes nichts ändern, allerdings umgekehrt benutzt werden können, um dar zu thun, dass bei jeder Kraft die Aktion genau gleich der Reaktion ist.

eines Zeitintervalles gemessen durch die Summe der Impulse äusserer Kräfte während des Intervalles. (Maxwell. Art. LXV).

Um den ersten Satz zu beweisen, fassen wir zunächst den Fall ins Auge, wo eine äussere Kraft auf ein einzelnes, frei bewegliches Partikel eines Systemes einwirkt. Die Masse des letzteren sei M, die übrige Masse des Systemes sei M'. Wir haben dann ein System, das aus zwei frei gegeneinander beweglichen Partialmassen besteht; s sei der Schwerpunkt von M, s' derjenige von M'. S sei der Gesammtschwerpunkt bei Beginn der Aktion der Kraft (Fig. 1). Dann muss S in der geraden Verbindungslinie von s und s' liegen und $M.sS = M'.s'S$ sein.

Fig. 1.



$$\frac{M'}{M} = \frac{sS}{s'S}.$$

Irgend eine äussere Kraft treffe nun die Masse M und bringe ihren Schwerpunkt in der Zeiteinheit von s nach σ, während M' an derselben Stelle bleibt. Dann ist Σ der neue Gesammtschwerpunkt

$$M'.s'\Sigma = M.\sigma\Sigma$$

$$\frac{M'}{M} = \frac{\sigma\Sigma}{s'\Sigma} = \frac{sS}{s'S},$$

also ist $\Sigma S \parallel \sigma s$ und

$$\frac{\sigma s}{\Sigma S} = \frac{s'S+sS}{s'S} = 1+\frac{sS}{s'S} = 1+\frac{M'}{M},$$

$$\frac{\sigma s}{\Sigma S} = \frac{M+M'}{M}.$$

Es verhält sich also wirklich die Grösse der Beschleunigung (Dislocation, Endgeschwindigkeit) des Gesammtmassenmittelpunktes zu derjenigen des Partialmassenmittelpunktes umgekehrt wie die Grösse der Gesammtmasse sich zu der Grösse der Partialmasse verhält. Damit ist Satz a für dieses System $M+M'$ als richtig erwiesen.

Ferner ist $\Sigma S = \sigma s . \frac{M}{M+M'}$. Hätte nun dieselbe Kraft, welche die Partialmasse M in der Zeiteinheit um die Strecke $s\sigma$ verschoben hat, — wir nehmen zunächst an, dass die Masse starr ist und dass die Kraft auf ihren Schwerpunkt gewirkt hat — auf die Masseneinheit eingewirkt, so würde sie derselben eine Beschleunigung $s\sigma . M$, und

sie würde einer auf einen Punkt concentrirten Masse $M+M'$ die Beschleunigung $s\sigma \cdot \frac{M}{M+M} \parallel s\sigma$ ertheilt haben. $s\sigma \cdot \frac{M}{M+M'}$, ist aber $= S\Sigma$ wie oben bewiesen wurde. Also ist in Wirklichkeit die Verschiebung des gemeinsamen Schwerpunktes des ganzen Systemes durch die Einwirkung der Kraft auf ein isolirtes einzelnes Massetheilchen genau so gross, als ob die Kraft auf die im Gesammtschwerpunkte concentrirt gedachte Masse in gleicher Grösse und Richtung eingewirkt hätte. Hätte dieselbe Kraft statt auf M auf die Partialmasse M', oder auf irgend einen Theil derselben eingewirkt, so würde die Wirkung auf den Gesammtmassenmittelpunkt dieselbe sein; ebenso ist es für die Verschiebung des Schwerpunktes einer Partialmasse gleichgültig, ob die Kraft auf alle Massenelemente derselben gleichmässig vertheilt ist, oder nur auf einzelne wirkt. Es ist also, soweit es die Bewegung der Gesammtmasse betrifft, ganz gleichgültig, an welcher Stelle des Systemes die äussere Kraft angreift, und was für eine Kraft gilt, das gilt auch für mehrere gleichzeitig wirkende.

Aber es handelte sich bis jetzt nur um Systeme, deren Theilchen vollkommen frei und ohne sich gegenseitig zu beeinflussen gegeneinander verschieblich sind. Nun sind sehr häufig zwar beim Beginne der Aktion äusserer Kräfte auf ein System keine Wirkungen innerer Kräfte in demselben vorhanden, oder es besteht inneres Gleichgewicht; in Folge der äussern Kraft nun, welche eine Parthie der Masse im ersten Moment unabhängig von dem übrigen Theile des Systems um eine kleine Grösse bewegt, wird die Configuration geändert und dadurch können innere Kräfte wachgerufen werden. Man denke sich z. B. die Massen M und M' der Fig. 1 durch ein gewichtloses elastisches Band so verbunden, dass des letzteren Spannung in der Lage ss' gleich 0 ist. Durch die Bewegung von M in der Richtung der Kraft wird dieses Band nun gedehnt, so dass seine Spannung auf die Bewegung von M als eine zweite, hemmende oder ablenkende Kraft einwirkt. Die Spannung wirkt aber, wie jede Kraft, mit gleicher Grösse nach beiden Seiten und die Partialmasse M' erfährt gleichzeitig eine ebenso grosse aber entgegengesetzte Einwirkung wie M. Es können auch unabhängig von den durch die äusseren Kräfte herbeigeführten Configurationsänderungen Veränderungen in den innern Kräften auftreten. In allen diesen Fällen aber ändern die inneren Kräfte an sich den Bewegungszustand des Massenmittelpunktes nicht. Derselbe wird ebenso wenig durch eine schon zu Beginn der Aktion bestehende Eigenbewegung der Theilchen gegeneinander beeinflusst.

Welcher Natur nun die mit der Einwirkung der äussern Kraft combinirten inneren Beziehungen auch sind, man kann sich dieselben immer für sich allein vor

sich gehend denken und daneben für sich allein die Bewegung, welche der Partialmasse von der äussren Kraft mitgetheilt wurde, wenn sie vollkommen frei verschieblich wäre. Es wird auf diese Weise klar, dass nur die letztere für die Bewegungsänderung des Massenmittelpunktes massgebend ist. *)

Es ist nun leicht einzusehen, dass auch äussere Kräfte sich so combiniren können, dass am Bewegungszustande des Massenmittelpunktes des Systemes nichts geändert wird. Die Summe sämmtlicher äusserer Kräfte (nach Grösse und Richtung) muss in diesem Falle = 0 sein; es ist aber ganz gleichgültig an welchen Punkten des Systemes diese Kräfte angreifen.

Zwei parallele, gleich grosse, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte werden also auf den Gesammtschwerpunkt des Körpers keine Wirkung haben. Sobald sie in zwei verschiedenen geraden Linien wirken, setzen sie das ganze System oder einen Theil desselben in einseitige drehende Bewegung um den Schwerpunkt. Wenn aber innere Kräfte Drehbewegungen um bestimmte Schwerpunktsaxen (vielleicht combinirt mit andern Bewegungen) veranlassen, so giebt es stets zwei Gruppen von Partikeln, die sich in entgegengesetztem Sinne um dieselbe Schwerpunktsaxe drehen. Es werden also stets je zwei Drehbewegungen in entgegengesetzter Rich-

---

*) Man beweist zunächst für ein einzelnes Partikel, dass trotz der gleichzeitigen Anwesenheit innerer Kräfte und Eigenbewegungen Satz a und b gelten, wenn eine äussere Kraft auf dasselbe wirkt. Dann gilt dasselbe für beliebig viele gleichzeitig wirkende äussere Kräfte und für beliebig viele Theilchen des Systemes. Jener Beweis aber für das erste Partikel ist äusserst einfach. Wenn man die zeitliche Phase genügend klein wählt, so darf man nach Belieben zuerst die Eigenbewegung des Theilchens, dann die Ablenkung durch die äussere Kraft sich vollziehen denken, oder umgekehrt.

Das Partikel M bewege sich auf irgend einem Wege vermöge seiner Eigenbewegung von ς nach s (Fig. 1). Dann muss der Mittelpunkt der übrigen Körpermasse M' sich so bewegen, dass die Verbindungslinie zwischen ihm und dem Schwerpunkte von M stets durch denselben Punkt S geht, welcher der Gesammtschwerpunkt ist, und dass die Abstände der Partialschwerpunkte stets umgekehrt proportional sind der Grösse der Partialmassen. Der Partialschwerpunkt von M' bewegt sich also von ς' nach s' in einer Curve, welche der Curve ςs vollkommen ähnlich ist. Die Ablenkung aber durch die äussere Kraft sei = $s\bar{\sigma}$. Man ersieht aus Fig. 1, dass nur diese an dem Bewegungszustande des Gesammtschwerpnnktes etwas ändert und zwar soviel, als ob die Kraft auf die im Schwerpunkt concentrirt gedachte Gesammtmasse mit gleicher Grösse und Richtung gewirkt hätte.

Somit ist Satz a und b ganz allgemein bewiesen. Die ganze Ableitung gilt ja natürlich auch für den Fall, dass das ganze System mit dem Massenmittelpunkte in einer Progressivbewegung begriffen ist.

tung wachgerufen; der Betrag dieser beiden Drehbewegungen zusammen ist = 0 mit Bezug auf den Massenmittelpunkt. Dieser Satz ist für die Theorie der Locomotion von grosser Wichtigkeit.

III.

Wechselwirkung zwischen den bewegten Theilen des Systemes und der Umgebung. Auslösung passiver Locomotion durch innere Kräfte. — Aeussere Widerstände der Wirkung und dem Wesen nach äusseren Kräften gleich. — Grundprincip der activen Locomotion. — Methoden der Analyse.

Den wesentlichsten Inhalt der letzten Auseinandersetzungen bildete die Einwirkung innerer und äusserer Kräfte auf die Bewegung eines beliebig complicirten materiellen Systems; keine Frage, dass das Gewonnene auch für noch so complicirte organische Körper Geltung hat. Weiter oben nun hatten wir die Behauptung aufgestellt, dass die locomotorische Thätigkeit von innern Kräften des Organismus auf die Bewegung der Gesammtmasse des letzteren einen Effekt habe, welcher demjenigen einer äusseren Kraft gleich sei. Steht diese Definition nicht in offenbarem Widerspruch zu dem erweiterten ersten Bewegungsgesetze?

Der Widerspruch ist nur scheinbar. Der aus den Newton'schen Prinzipien abgeleitete Fundamentalsatz über die Wirkung innerer Kräfte gilt ausdrücklich nur für den Fall, dass letztere einzig und allein auf Theilchen des betrachteten Systems wirken. Letzteres ist nun aber in Wirklichkeit kaum je der Fall. Ueberall ist der thierische Körper von materiellen Theilchen umgeben. Wenn nun die innern Kräfte des Organismus Eigenbewegungen seiner Partialmassen hervorrufen, muss nothwendig eine mechanische Wechselwirkung zwischen Partikeln des Systemes und dessen Umgebung stattfinden. So überträgt sich ein Theil der Wirkung der innern Kräfte durch Theilchen des Systemes auf die materielle Umgebung.

Durch die Wechselwirkung zwischen einzelnen bewegten Theilen des Systemes und der Umgebung können zunächst gewisse Sperrvorrichtungen aufgehoben werden, durch welche bis dahin irgend eine äussere Kraft verhindert war, auf das System einzuwirken. Ein Verzweifelnder kann das Seil durchschneiden, an welchem er schwebend über dem Abgrund erhalten wurde, oder eine Pulverladung entzünden, um sich in die Luft zu sprengen. Der Körper besass Energie der Lage mit Bezug auf irgend eine äussere Kraft (Schwere, Spannkräfte des Pulvers) und die Grösse dieser Energie steht in gar keiner bestimmten Relation zu der Grösse der mechanischen Wechselwirkung zwischen dem Körper und seiner Umgebung, welche zur Auslösung dieser Energie führte. Für die Locomotion kommt nur die letztere in Betracht, es handelt sich offenbar um passive Ortsbewegung.

Auf die Benutzung von solchen künstlichen oder zufälligen äusseren Constellationen aber ist, wie wir gesehen haben, der thierische Körper für seine Locomotion nicht beschränkt. Vielmehr macht sich derselbe den Umstand zu Nutze, dass bei jeder Wechselwirkung zwischen einem Theil seiner Masse und der materiellen Umgebung nothwendig der Bewegungszustand dieser Partialmasse geändert werden muss. Die Partialmasse wird offenbar durch die materielle Umgebung in ihrer Bewegung gehindert, sie muss an Bewegung Einbusse erleiden. Soll trotzdem stets Gleichgewicht der Eigenbewegungen der Körpertheile mit Bezug auf den Massenmittelpunkt bestehen, so kann letzterer unmöglich in seinem ursprünglichen Bewegungszustande verharrt, er muss vielmehr eine Aenderung desselben erfahren haben. Dieses ist in letzter Linie ein Effekt der inneren Kräfte, ermöglicht durch ihre Einwirkung auf die materielle Umgebung des Systemes. Das Resultat ist gleich dem Effekte einer äussern Kraft.

Zu einer solchen Wechselwirkung mit der Aussenwelt sind die Bedingungen überall gegeben, wenn auch nicht überall gleich gut. Es steht hier offenbar die Grösse der Einwirkung auf die Gesammtmasse in einem bestimmten Verhältniss zu dem Umfang der innern Thätigkeit. Wiederholte innere Aktion vermehrt jene Einwirkung. Hier handelt es sich also um eine active Locomotion im wahren Sinne des Wortes. Sie beruht, um kurz zusammenzufassen, auf der Möglichkeit, dass innere Kräfte Bewegungen der Partialmassen des Körpers gegeneinander veranlassen und dass diese Bewegungen durch den Widerstand der materiellen Umgebung beeinflusst werden.

Was ist nun aber ein äusserer Widerstand? Ein materielles Partikel kann unter zweierlei Umständen hinsichtlich seiner Bewegnng gehindert werden oder Widerstand erfahren:

1) wenn es diese Bewegung schon erworben hat: dann wird seine Geschwindigkeit vermindert oder anullirt;

2) wenn es erst im Begriff ist, sich unter der Einwirkung irgend einer Kraft diese Bewegung zu erwerben: dann wird die Beschleunigung, die es erfährt, in Folge des äusseren Widerstandes kleiner oder gleich Null sein.

Im ersten Falle verliert eine gewisse Zahl M von Masseneinheiten die Geschwindigkeit v (reelle Einbusse). Die Grösse Mv giebt ein Mass für die ganze Einbusse an Bewegung und ein Mass für den Widerstand. Würde der Widerstand in einer be-

stimmten Kraft W bestehen, die in der Zeit t auf den bewegten Körper einwirkt, so wäre $-Mv =$ dem Impulse dieser Kraft oder $= W.t$.

Im zweiten Falle solle unter dem Einfluss der beschleunigenden Kraft F und des Widerstandes W jedes Theilchen der Masse M eine Geschwindigkeit erlangen, die um die Grösse v geringer ist, als diejenige, welche es ohne äussern Widerstand in der Zeit t erlangen würde. Es handelt sich auch in diesem Falle um eine Einbusse an Bewegung die $= Mv$ ist und es ist ganz sicher, dass wenn der Widerstand eine Kraft W wäre, die der beschleunigen Kraft F entgegen wirkte, wieder $Wt = -Mv$ sein müsste.*) Eine derartige Einbusse nenne ich eine virtuelle.

Wenn also der Widerstand einer äussern Kraft verglichen wird, so wird der Impuls dieser Kraft durch den reellen oder virtuellen Verlust an Bewegungsmoment gemessen, welchen die Masse M erfährt.

Den äussern Widerstand einer äussern Kraft zu vergleichen, ist nun aber nicht bloss annäherungsweise erlaubt, sondern dies entspricht dem Wesen des Wechselverhältnisses. Man könnte bei oberflächlicher Betrachtung zwei verschiedene Kategorien von Widerständen unterscheiden. Entweder ist die hemmende Masse frei beweglich, und es wird auf sie von dem bewegten Körper einfach Bewegung übertragen, oder die hemmende Masse ist nur bei gleichzeitiger Ueberwindung einer Spannkraft verschieblich. Im letzteren Fall ist leicht verständlich, in wiefern der Widerstand einer äussern Kraft gleich ist. Aber auch im ersten Falle handelt es sich im Grunde um etwas Aehnliches.

Das Resultat eines Bewegungsaustausches zwischen zwei Massen ist, dass der Bewegungszustand jeder der beiden Massen um eine gewisse Grösse verändert wird. Diese Aenderung muss nun nothwendig in stetiger Weise sich vollzogen haben. Ob ein Theilchen auch noch so plötzlich z. B. aus der relativen Ruhe zu einer bestimmten relativen Geschwindigkeit gelangt, — immer müssen zeitliche Zwischenphasen vorhanden sein, in welchen die Bewegung allmählig von 0 bis zu dem bestimmten Endwerthe ansteigen konnte.

Wenn dieser Austausch daher auch für die gewöhnliche Beobachtung im Moment der Berührung begonnnen und vollendet erscheint, so vergeht doch in Wirklichkeit über dem Austausch eine kleine Spanne Zeit, während welcher die Massen-

---

*) Die resultirende Bewegungsmenge Mr = der Summe der einzeln ertheilten Bewegungsmengen = der Summe der einzelnen Impulse. Wenn $Ft = Mv'$, $Ft + Wt = Mv' - Mv = Mr$, so ist $Wt = -Mv$.

mittelpunkte der Theilchen sich nothwendigerweise noch eine bestimmte Strecke gegeneinander bewegen, und nur die durch diese Annäherung in Wirksamkeit gesetzten Kräfte können die Verminderung der Bewegung auf der einen Seite, die Vermehrung auf der andern bewirken. Diese Kräfte leisten im Kleinen, was die Federkraft an den Puffern der Eisenbahnwagen, oder was der zwischen die Landungsbrücke und das anfahrende Dampfschiff zwischen hinein gelegte elastische Ballen im Grossen leistet.

Und was für den Bewegungsaustausch zwischen den Oberflächentheilchen verschiedener Körper gilt, das besteht auch zu Recht für die Uebertragung der Bewegung von einem Theilchen eines Körpers auf die übrigen Theilchen desselben.

Es gehört also zum Wesen dieser Widerstandskräfte, dass sie erst durch eine wenn auch noch so geringe Bewegung der Massenmittelpunkte der Theilchen gegeneinander wachgerufen werden, es ist aber durchaus nicht nothwendig, dass sie mit dem Augenblicke, wo diese relative Bewegung selbst 0 wird, zu wirken aufhören. So überdauert die Wirkung dieser Kräfte bei zwei gegeneinander stossenden Billardkugeln den Moment, in welchem dieselben gleich schnell sich bewegen und fährt noch fort, auf beide Massen beschleunigend einzuwirken; auch lassen sich noch viele andere, analoge Beispiele für diese Behauptung anführen. Die Physiker haben übrigens diese Verhältnisse bei Anlass der Gesetze des Stosses mit dem grössten Scharfsinn schon früh erörtert.

Der auf einen Körper ausgeübte Widerstand ist also auch da, wo er in der Uebertragung von Bewegungsmenge an eine freie Masse besteht, jederzeit der Wirkung äusserer Kräfte gleichzusetzen, die an den zunächst gehemmten Oberflächentheilchen angreifen.

Jeder äussere Widerstand ist seinem Wesen und seiner Wirkung nach einer äussern Kraft gleichzusetzen und es ist nur nöthig, die Grösse und Richtung der äussern Wiederstandskräfte, welche durch die Aktion des Körpers wachgerufen sind, zu kennen, um die locomotorische Leistung dieser Aktion zu beurtheilen. Jede äussere Wiederstandskraft beeinflusst den Massenmittelpunkt des Systemes in jedem Augenblicke so, als ob sie auf die in ihm concentrirt gedachte Masse direkt einwirkte; dabei ist vollkommen gleichgültig, an welchem Theile des Systemes sie wirkt.

Da nun streng genommen keine Bewegung der Partialmassen gegenüber der Umgebung stattfinden kann, ohne dass auf umgebende materielle Theilchen mechanisch eingewirkt wird, so werden stets zugleich mehrere äussere Kräfte wachgerufen. Soll dabei locomotorische Einwirkung auf den Massenmittelpunkt stattfinden,

so darf die Resultirende aller dieser äussern, auf die Gesammtmasse bewegend wirkenden Kräfte nicht = 0 sein.

Innere Kräfte haben also nur dann und nur dadurch locomotorischen Einfluss auf ein materielles System, dass sie äussere Kräfte wachrufen, welche, wenn sie in gleicher Grösse und Richtung auf denselben materiellen Punct einwirkten, eine gemeinschaftliche Resultirende haben würden, die nicht = 0 ist.

Zur Erläuterung diene folgendes einfache Beispiel:

Wenn zwei gleiche, homogene, und gleich schwere Kugeln durch eine innere Kraft horizontal auseinander getrieben werden, nachdem sie sich zuvor in horizontaler Richtung nicht bewegt haben, so werden, wenn dies im luftleeren Raume geschieht, beide Massen gleich grosse Beschleunigungen in entsprechenden Zeittheilchen erhalten und stets gleich schnell sich bewegen; findet dasselbe in ruhiger, atmosphärischer Luft statt, so wird zwar die Horizontalbeschleunigung und Horizontalgeschwindigkeit durch den Luftwiderstand vermindert werden, aber an beiden Massen in entsprechenden Phasen jeweilen um die gleichen Grössen. Das Gleichgewicht der Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Bewegungsmengen wird dann mit Bezug auf die Verticale durch die ursprüngliche Lage des Schwerpunktes durch die Widerstände nicht alterirt, weil die Resultirende ihrer Einwirkungen auf den gemeinsamen Massenmittelpunkt in jedem Zeittheilchen = 0 ist.

Anders ist die Sachlage, wenn die beiden Kugeln nach Volum und Masse verschieden sind, so dass die zwischen ihnen wirkenden Kräfte für sich allein denselben verschiedene Beschleunigungen ertheilen. Die Grösse des auf einen bewegten Körper wirkenden Widerstandes der Luft nimmt nämlich mit der Grösse der Masse, besser gesagt der voranbewegten Oberfläche ab, mit der Geschwindigkeit zu; und zwar heben sich diese Umstände nicht auf, indem der Widerstand zwar direkt wie die Fläche ab-, jedoch ungefähr wie das Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Zugegeben, es bestehe in einer bestimmten Phase wirklich Gleichgewicht der Bewegungsmomente mit Bezug auf einen bestimmten Ort des Schwerpunktes und Mv sei $= M'v'$. Wenn nun die Durchmesser von M und M' sich verhalten z. B. wie 1:2, so verhalten sich die Oberflächen wie 1:4, die Massen wie 1:8, die Geschwindigkeiten wie 8:1. Der Widerstand gegen M' wird in dem nächsten kleinen Zeittheilchen 4 mal kleiner sein als gegen M, wegen der verschiedenen Oberfläche, und $8 \times 8 = 64$ mal grösser, wegen der verschiedenen Geschwindigkeit, in summa also $\frac{64}{4} = 16$ mal grösser. Bezeichnen

wir den Widerstand gegen M und M' mit W und W', so ist $W' = 16 . W$; die auf den gemeinsamen Schwerpunkt einwirkende Resultirende $= W' — W = 15 . W$; der gemeinsame Schwerpunkt wird also verschoben und der beschleunigende Einfluss auf denselben wird erst in demjenigen Momente $= 0$, in welchem v' nur noch $= 2v$ ist. Diesem Bewegungszustande entspricht aber eine bestimmte horizontale Bewegung des Schwerpunktes, da ja ohne eine solche Gleichgewicht der Bewegungsmomente nicht vorhanden sein könnte.

Denkt man sich, dass ein System von zwei Kugeln durch die innere Kraft P und $—P$ auseinander getrieben werde, dass aber die Bewegung der einen Kugel durch einen „absoluten“ äussern Widerstand so gut wie ganz, diejenige der andern kaum merklich gehemmt werde, dann halten sich Widerstandskraft W und innere Kraft P an der ersten Kugel das Gleichgewicht ($W = —P$) und nur der andere Theil $—P$ der innern Doppelkraft wirkt dann bewegend an dem System und zwar auf die zweite Kugel.

Dieses Beispiel lehrt, dass man nach zwei verschiedenen Methoden die Beschleunigung des gemeinsamen Schwerpunktes ermitteln kann:

a) Aus der faktischen Beschleunigung, welche jede einzelne Partialmasse unter dem Einflusse sämmtlicher an ihr wirkender Kräfte erfährt.

b) Aus der Resultirenden der sämmtlichen äussern Widerstände (in unserm Falle ist $W' = 0$ und $W — W' = W$).

Die erste Methode giebt Aufschluss über das Wesen des ganzen Vorganges, die zweite sieht von den innern Vorgängen im Systeme ab. Beide Methoden sind gleich correkt. Die zweite erlaubt, direkt von den bekannten äussern Widerständen auf die locomotorische Wirkung, oder von einer bekannten locomotorischen Wirkung auf bestimmte nothwendige Verhältnisse der äussern Widerstände zu schliessen; ich hoffe, im folgenden zeigen zu können, dass dieses bis jetzt wenig benutzte Verfahren recht dankenswerthe Aufschlüsse bei praktisch wichtigen Fragen bringt. Die Untersuchung der thierischen Locomotion darf sich aber auf dasselbe nicht beschränken. Wir erstreben ja in letzter Linie eine klare Einsicht in das ganze Wechselverhältniss zwischen dem Stoffumsatze, den daraus hervorgehenden innern Kräften, und der äussern Leistung, also in den ganzen innern Mechanismus der Körperkräfte in seiner Wechselbeziehung zur Aussenwelt.

IV.

Die verschiedenen Verhältnisse der materiellen Umgebung: 1) Umgebung nicht homogen, ungleich widerstandsfähig. Bewegung an festen Unterlagen. — Die Lehre von der Störung und Erhaltung des Aequilibriums durch Körperbewegungen. Die Schaukel. 2) Homogene Umgebung, Gesetze des Widerstandes von Flüssigkeiten gegen bewegte Flächen. — Erzeugung ungleicher Widerstände durch ungleich grosse Partialmassen, durch Oberflächenvergrösserung einzelner Theile, oder durch verschiedene Orientirung.

Wenn wir die verschiedenen Verhältnisse, unter denen active Locomotion stattfindet, zu überblicken suchen, so springt sicher sofort die Verschiedenheit in die Augen, welche durch die verschiedene Widerstandsfähigkeit der den organischen Körper umgebenden Medien bedingt ist. Es lassen sich hier zwei Kategorien auseinanderhalten. Im einen Falle geschieht die Bewegung an der Gränzscheide von verschieden dichten und verschieden widerstandsfähigen Medien: so am Wasserspiegel, so zwischen der festen Erdoberfläche einerseits, Luft oder Wasser andererseits, auf trockenem Lande oder am Grunde und Rande von Gewässern; dabei kann die feste Unterfläche glatt und flach sein oder mit Rauhigkeiten, Spitzen und Auswüchsen in das dünnere Medium hineinragen. — Im zweiten Falle aber vollzieht sich die Bewegung in einer mehr oder weniger homogenen Umgebung, in weicher Erdkrume, in lockerem Sande, mitten im Wasser oder frei in der Luft.

1. Nichts erscheint einfacher, als die Art und Weise, in der Ungleichheiten in der Dichte und Widerstandsfähigkeit der umgebenden Medien zur Erzeugung einer ungleichen Behinderung der Eigenbewegungen der Partialmassen und dadurch zur Locomotion benutzt werden. Beim Gang, Lauf und Sprung, beim Kriechen und Klettern wird immer einseitig durch einen Theil des Körpers an dem festern Medium ein besonders starker Widerstand wachgerufen, welcher keine erhebliche Bewegung entgegen seiner Richtung zulässt, während die Bewegung der übrigen Theile des Körpers in jeder andern Richtung durch das dünnere Medium stattfindet und verhältnissmässig wenig gehemmt wird. Von dieser Bewegung wird zum Schluss meist ein Theil an die auf den Boden aufgesetzten Körpertheile abgegeben und so werden auch diese zuletzt in die in der Richtung des Widerstandes erfolgende Verschiebung hinein bezogen.

Die Verhältnisse sind hier der Locomotion so günstig, dass selbst bei Körpern, welche an ganz wenig Punkten mit der festen Unterlage in Berührung sind, kaum eine Bewegung irgend eines Körpertheils durch Muskelkräfte ausgeführt werden kann, ohne dass der Schwerpunkt aus der Ruhe in Bewegung übergeht oder in seinem

Bewegungszustande eine Aenderung erfährt. Wir können dies jeden Augenblick an uns selbst beobachten. Bewegen wir den Arm aus der gebeugten Stellung durch Streckung, aus der gesenkten Stellung durch Heben weiter nach vorn, so würden die Muskelkräfte, welche dies bewirken, zugleich den Partialschwerpunkt des Rumpfes nach hinten bewegen, wenn unser Körper ganz ohne äusseren Wiederstand beweglich wäre.

Dies geschieht nun auch unter Umständen in Wirklichkeit, indem die Schulter zuerst etwas zurückweicht. Jedenfalls aber wird die Rückwärtsbewegung des Rumpfes mit Kopf und Beinen durch den Widerstand des Erdbodens gegen die Bewegung der Füsse in etwas gehemmt; es wirkt ein Widerstand nach vorn. Die Bewegung der Körpertheile nach vorn hat über die Bewegung nach hinten das Uebergewicht: der Schwerpunkt bewegt sich, unserer Theorie gemäss, in der Richtung der Widerstandskraft.

Wirklich, wenn wir uns zu Beginn der Aktion auf den Fussspitzen genau in der Balance gehalten haben, dann genügt das energische Vorstrecken des Armes, um uns vorne über fallen zu lassen, obschon unsere Schulter mit dem Kopfe anfänglich etwas zurückgetrieben wird.

Man ersieht hieraus, wie die Lehre von der Störung und Erhaltung des Gleichgewichtes bei den Stellungsänderungen der Glieder unseres Körpers durch Muskelanstrengungen aus den von uns oben abgeleiteten Sätzen grossen Nutzen ziehen kann. Freilich kann man annähernd ebenso gut aus der resultirenden Verschiebung des Gesammtschwerpunktes auf den Widerstand zurückschliessen, als umgekehrt. Aber die resultirende Bewegung des Schwerpunktes ist eben nicht so unmittelbar zu beurtheilen, als es vielleicht zunächst scheinen möchte. Wohl stimmt in unserem Beispiel mit der Richtung der Bewegung des Armes und seines Partialschwerpunktes die Vorbewegung des Gesammtschwerpunktes überein. Aber wenn wir statt durch Hebung aus der Normalstellung den Arm durch Senkung aus der erhobenen Stellung vorbewegen, dann wirkt der Widerstand des Erdbodens nicht einer Bewegung der Füsse nach hinten, sondern einer solchen nach vorn entgegen, er wirkt nach hinten; unser Gesammtschwerpunkt wird also nach hinten bewegt und waren wie vorher auf den Fussspitzen in Balance, so laufen wir diesmal Gefahr, nach hinten über zu fallen.

Ein ganz ähnlicher Unterschied besteht, je nachdem wir den Oberkörper mit dem Kopf durch Beugung der Hüftgelenke oder durch Streckung derselben nach vorn in die horizontale Stellung bringen. Führen wir die Bewegung energisch auf den Fussspitzen aus, ohne Balanciranstrengungen zu machen, indem wir nur die

Stellung unseres Hüftgelenkes ändern, dann fallen wir nach hinten über bei der Beugung, nach vorn bei der Streckung. Und doch wird in beiden Fällen der Partialschwerpunkt des Oberkörpers gegenüber den Beinen nach vorn verlegt. Werden gleichzeitig compensirende Stellungsveränderungen anderer Glieder, z. B. der Arme ausgeführt, um die besprochene Verschiebung des Schwerpunktes hinten anzuhalten oder wieder rückgängig zu machen, dann müssen dieselben in den beiden Fällen in verschiedener, einander gerade entgegengesetzter Weise erfolgen.

Aehnliches gilt für die Seitenbiegungen des Oberkörpers u. s. w. Ich will hier die Besprechung dieses Gegenstandes nicht weiter ausdehnen. Die Andeutungen mögen genügen, um darzuthun, dass die Lehre von der Störung und Erhaltung des Gleichgewichtes bei den Bewegungen des menschlichen Körpers folgenden Gesichtspunkten Rechnung tragen muss:

a) Man muss zunächst für bestimmte, einfache Kraftwirkungen an einem Gelenke bei bestimmter Stellung des Körpers feststellen, wie der Körper ohne äussere Widerstände sich bewegen würde, ferner, in welcher Weise diese Bewegung gehemmt ist und welches die resultirende Bewegung des Schwerpunktes ist.

b) Es muss gefragt werden, ob diese resultirende Verschiebung das Aequilibrium des Körpers gefährdet und welche compensirende Bewegungen geeignet sind und in der Regel verwendet werden, um das Gleichgewicht zu sichern.

Gesetze der Aequilibrirung des Körpers sind bis jetzt wesentlich nur im Interesse der Künstler studirt und formulirt worden und dies ist in vollkommen ungenügender Weise geschehen, weil den dynamischen Verhältnissen keine Rechnung getragen wurde. Harless z. B. in seiner plastischen Anatomie beurtheilt kurzweg die Aenderung der Lage des Gesammtschwerpunktes nach derjenigen des bewegten Armes, Beines, Oberkörpers etc. Dies muss naturgemäss dazu führen, dass mit Bezug auf die compensirenden Bewegungen öfters falsche Regeln aufgestellt werden.

Ich halte es nicht für überflüssig, die Methode, nach welcher derartige Verhältnisse richtiger analysirt werden, noch an einem zweiten Beispiele zu erläutern.

Wir können einen Schaukelstuhl, ein Schaukelpferd, eine Hängeschaukel zusammen mit dem Menschen, der sich damit in Bewegung setzt, als ein zusammengehöriges materielles System auffassen. Dieses System steht nur an wenig Punkten, beim Schaukelpferd unten, bei der Hängeschaukel oben mit einer festen Unterlage in Berührung und es erscheint auf den ersten Blick räthselhaft, dass die innern Kräfte dieses Systems dessen Schwerpunkt gegenüber der Erdoberfläche abwechselnd hin-

und herbewegen können. In Wirklichkeit sind es aber gerade jene wenigen Berührungspunkte, die Aufhängepunkte oben, oder unten die Stellen, an denen die gebogene Basis des Schaukelpferdes den Boden berührt, an denen äussere Widerstände wachgerufen werden und zwar nicht bloss solche in vertikaler Richtung, welche etwa den Apparat hindern, zu sinken, sondern auch solche mit horizontalen Componenten.

Wir können uns, wenn wir auf der Schaukel sitzen, in Bewegung setzen, indem wir nichts Anderes thun, als in geeigneten Intervallen die Unterschenkel durch Streckung des Kniegelenkes in die horizontale Lage zu bringen und wieder sinken zu lassen, indem wir das Knie beugen. Könnte die Streckung des Kniegelenkes geschehen, ohne dass unser System irgend eine Behinderung seiner Bewegung erführe, so müssten dabei die Partialschwerpunkte des Unterschenkels einerseits, des übrigen Körpers mit der Schaukel andererseits in gerader Richtung auseinander getrieben werden; während dabei der Fuss in die Höhe geht, würde das Kniegelenk nach unten sich bewegen. Nun ist aber der Körper mit der Schaukel an einigen Punkten, sei's oben, sei's unten, in seiner Rückbewegung gehindert; er wird nur entfernt von diesen Punkten sich merklich rückwärts bewegen, unter Umständen auch dieses nicht. Jedenfalls ist der ganze Betrag der Rückbewegung vermindert, die Bewegung nach vorn hat das Uebergewicht, der gemeinsame Schwerpunkt rückt nach vorn. Wenn nun die Streckbewegung zu Ende geht und das ganze System ein starres Ganzes wird, dann gleicht sich die Bewegung zwischen den Partialmassen aus: durch die Unterschenkel wird der übrige Körper mit sammt der Schaukel etwas nach vorn gerissen. Nun kommt aber ein zweites Moment hinzu, das von dem bis jetzt besprochenen streng auseinander gehalten werden muss. Durch die Vorbewegung des gemeinsamen Schwerpunktes ist derselbe beim Schaukelpferde und beim Schaukelstuhl über die Unterstützungspunkte hinaus gerückt und weiter von letzteren entfernt, als von einer weiter vorn gelegenen Stelle des gekrümmten Fusses der Schaukel; daher wird der Apparat nun unter dem Einfluss der Schwere vorn überfallen, bis jene nähere, zweite Stelle der Schaukel den Boden berührt. Der Schwerpunkt, wenn er inzwischen nicht noch weiter nach der Seite des Unterschenkels sich verschoben hat, steht nun senkrecht über der Unterstützungsfläche und möglichst tief; die Oscillation der Schaukel geht zwar noch im selben Sinne weiter, wird aber durch die Wirkung der Schwere schliesslich sistirt. Jetzt beginnt der Apparat zurückzuschwingen und hierbei kann er wieder durch einen locomotorischen Impuls, vermittelst einer energischen Beugung des Kniegelenkes, unterstützt werden u. s. w.

Bei der Hängeschaukel aber, deren Schwerpunkt ebenfalls aus der Gleichgewichtslage nach vorn gerückt ist, beginnt der Apparat wie ein Pendel zurückzuschwingen. Wir pflegen hier den Vorschwung dadurch zu unterstützen, dass wir beim Beginne desselben eine kräftige Streckbewegung des Körpers ausführen. Denkt man sich diese Bewegungen des Körpers und der Schaukel ohne äussern Widerstand vor sich gehend, so bleibt der gemeinsame Schwerpunkt an derselben Stelle, resp. er pendelt ungestört hin und her, obschon der Rumpf nach der einen Seite, die Schaukel nach der andern Seite von ihm sich entfernt. In Wirklichkeit aber besteht gegen eine Bewegung in der Richtung der Länge des Pendels ein absoluter Widerstand und auch die Bewegung in der dazu senkrecht stehenden Richtung, tangential zum Schwingungsbogen der Schaukel, ist einigermassen gehemmt. Der gemeinsame Schwerpunkt verschiebt sich also durch die blosse Streckung des Körpers nach oben und hinten, der ganze Pendelapparat erfährt dadurch einen Gewinn an Energie der Lage und wird eine höhere vordere Excursionsstellung erreichen, als ohne jene Streckaktion. Vorn aber resultirt ein ähnlicher Gewinn aus der Vorbeugung des Körpers.

---

2. Ungünstiger für die Locomotion scheinen homogene, leicht verschiebliche (flüssige), den thierischen Körper ringsumgebende Medien zu sein. Und trotzdem giebt es fliegende, rudernde, schwimmende, durch den Sand sich drängende Thiere. Um diess zu verstehen, muss auf den Widerstand jener Medien gegen bewegte Flächen näher eingegangen werden.

Schon Galileo Galilei (geb. 1565. Pendelnde Kronleuchter im Dom zu Pisa 1583.), der als Begründer der neuern Dynamik betrachtet werden muss, in sofern er zuerst durch verschiedene Versuche nachzuweisen suchte, dass die Schwerkraft verschieden grossen Massen gleiche Beschleunigungen ertheilt, erkannte den störenden Einfluss des Luftwiderstandes. Es musste fortan ein Hauptziel der Physiker werden, die Gesetze dieses Einflusses, welcher alle Versuche über Bewegung der Körper modificirt, theoretisch oder empirisch festzustellen.

Newton, seiner Natur gemäss, drang tiefer in das Wesen des Vorganges ein. Er nahm an, dass die Theilchen der Flüssigkeit, welche in der Bahn des bewegten Körpers liegen, successive von der Bewegung desselben ergriffen werden, indem ein ähnlicher Bewegungsaustausch stattfinde, wie beim Stoss; er folgerte, dass um so mehr Theilchen in Bewegung gesetzt werden müssen in derselben Zeit, je grösser die Wegstrecke ist, welche der Körper in dieser Zeit zurücklegt, dass ferner an jedes einzelne Theilchen um so mehr Bewegung abgegeben werde, je grösser diese Wegstrecke resp. die Geschwindigkeit des bewegten Körpers ist, — dass daher der Widerstand aus zwei Gründen mit der Geschwindigkeit, dass er also in summa mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wachsen müsse. Ferner nehme die Zahl der bewegten Theilchen und damit die Grösse der Abgabe an Bewegungsmenge oder der Widerstand zu mit der Ausdehnung der vorausbewegten Fläche; endlich wachse derselbe mit der

Dichte resp. der Schwere jedes einzelnen verdrängten Theilchens des widerstehenden Mediums. Newton selbst, da er die experimentellen Resultate mit der Theorie nicht in Einklang fand, scheint schliesslich von derselben nicht befriedigt gewesen zu sein. Es lässt sich auch mit Recht geltend machen, dass die Verhältnisse complicirter sind als beim einfachen Stoss; die einzelnen Theilchen der Flüssigkeit werden nicht frei, sondern entgegen dem Drucke der umgebenden Flüssigkeit bewegt und beschreiben an verschiedenen Stellen verschiedene Bahnen, bis sie wieder zur Ruhe kommen. Aber das, was zur Aufklärung des Gegenstandes nach Newton bis auf unsere Zeit geschehen ist, musste noch im Jahre 1842 von dem Physiker von Littrow als unbedeutend bezeichnet werden (Gehler's Physik. Wörterbuch X. Bd. 2. Abth. pg. 1723 u. ff.): „Wir wissen nur, dass der Widerstand, welchen vorzüglich die Luft den in ihr bewegten Körpern entgegensetzt, von der Dichte des Mittels, von der Gestalt des bewegten Körpers und von der Geschwindigkeit seiner Bewegung abhängt und dass man von den wirklichen Beobachtungen sehr abweichende Resultate der Rechnung erhält, wenn man den Widerstand dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional setzt, obgleich man nichts Besseres zu substituiren weiss, da alle andern Voraussetzungen, die man bisher versucht hat, noch viel mehr von der Erfahrung abweichen."

Einen wirklichen Fortschritt bezeichnet indessen die Formel von Duchemin, welche nach Prechtl, der selbst sehr sorgfältige Experimente über den Luftwiderstand angestellt hat, mit den zahlreichen in älterer und neuerer Zeit angestellten Versuchen gut übereinstimmt. Duchemin setzt zunächst den Widerstand einer zur Fortbewegungsrichtung senkrecht stehenden Ebene proportional ihrer Ausdehnung und dem Quadrate der Geschwindigkeit, dann aber in dritter Linie proportional der Dichte, welche die Luft in dem bestimmten untersuchten Zeitpunkte unmittelbar vor der Fläche besitzt, einer Grösse, die selbst wieder zugleich mit der Geschwindigkeit, in bestimmtem Verhältnisse, wächst. Diese Formel, welche (nach Prechtl) die Erfahrungsresultate mit Genauigkeit wiedergiebt, zeigt „dass — für kleine Geschwindigkeiten der Widerstand im Verhältniss des Quadrates der Geschwindigkeit stehe, wie es die Erfahrung bestätigt, dass jedoch bei grösseren Geschwindigkeiten der Widerstand in einem grösseren Verhältniss zunehme, weil dann auch die Verdichtung der Luft vor der Fläche bedeutend zunimmt, so dass sie endlich das Doppelte wird" (Prechtl, Untersuchungen über den Flug der Vögel. Wien 1846).

Man vergleiche:

Duchemin, Experimental. Untersuchungen über die Gesetze des Widerstandes der Flüssigkeiten; übers. von Dr. Schnuse. Braunschweig 1844. Die Formel von Duchemin für den Widerstand lautet: $R = 0{,}627\ F\Delta\frac{u^2}{g}$, wobei F den Inhalt der Fläche, u die Geschwindigkeit und Δ die Dichte der Luft vor der bewegten Fläche bezeichnet (g constant). Dabei ist $\Delta = \delta\left(1+\frac{u^2}{\gamma}\right)$, in welcher Formel γ constant ist und δ die Dichte der Luft bei dem herrschenden Thermometer- und Barometerstande bedeutet.

Gronau, Die historische Entwicklung der Lehre vom Luftwiderstande. 1865.

Marey, Expériences sur la résistance de l'air pour servir à la physiologie du vol des oiseaux Physiol. expér. Travaux du laboratoire. 1875 VI.

Für aproximative Berechnungen sind genügend und zweckmässig die Angaben, welche Prof. G. Wellner kürzlich über diesen Gegenstand gemacht hat.*) Dieser Autor setzt nämlich

*) G. Wellner, Ueber die Möglichkeit der Luftschifffahrt. Brünn 1880.

$$W = \zeta F v^2.$$

Dabei ist der Widerstandscoefficient ζ für atmosphärische Luft = $^1/_8$ kilogr., für Wasser = 150 kilogr. (Mittelwerthe aus ziemlich weit auseinanderliegenden Berechnungen).

Wohl zu beachten ist, dass diese Werthe für ζ nur gelten, wenn die Geschwindigkeit v nach Metern, die Fläche F nach Quadratmetern gemessen ist. Die Widerstandskraft W wird hier also direkt mit der Wirkung der Schwerkraft auf Körper von bestimmter Masse verglichen. Bei einem Körper von $^1/_8$ kilogramm Gewicht und einer Fläche von 1 □meter, die bei der Fallbewegung in horizontaler Lage voran nach unten bewegt wird, würde bei einer Fallgeschwindigkeit von 1 Meter der Widerstand gleich dem Gewicht sein und demnach keine weitere Beschleunigung der Fallbewegung mehr eintreten.

Bildet die Bewegungsrichtung mit der voranbewegten Fläche einen Winkel $= \alpha$, so ist erfahrungsgemäss

$$W = \zeta F v^2 . \sin \alpha.$$

Werden nicht Ebenen, sondern Flächen anderer Art voranbewegt, so hängt also die Grösse des Widerstandes sehr von der Gestalt der Fläche ab. Nach vorn concave Flächen erzeugen einen grössern Widerstand, als ihre Projektion auf die Normalebene der Bewegungsrichtung, diess im Widerspruch zu der zuletzt aufgestellten Formel, weil das Abgleiten der Luft von den schrägen Theilen der Fläche hier erschwert ist. Bekanntlich ist auch die Gestalt der Hinterseite des Körpers von Einfluss auf die Grösse des Widerstandes. Schon Newton hat über diese Verhältnisse fundamentale Berechnungen und Versuche angestellt. Speziell für die Verhältnisse des Fluges sind dann von grösster Bedeutung die Untersuchen von Prechtl (l. c.).

Aus dem Angeführten geht wenigstens soviel mit Sicherheit hervor, dass für die Verhältnisse der thierischen Locomotion der Widerstand von geometrisch ähnlich gestalteten und übereinstimmend bewegten Oberflächen der Grösse der Oberfläche und dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional ist. Demnach besteht in Wirklichkeit die Voraussetzung, auf Grund deren oben gefolgert wurde, dass zwei durch innere Kräfte in der Luft horizontal auseinander getriebene Kugeln von gleichem Stoff aber verschiedenem Volumen ungleiche Widerstände erfahren und dass der Bewegungszustand ihres gemeinsamen Schwerpunktes dadurch geändert wird.

Die Natur würde also in der verschiedenen Grösse der Partialmassen, zwischen denen die inneren Kräfte wirken, und in der verschiedenen Grösse der

ihnen ertheilten Geschwindigkeiten ein Mittel zur Erzeugung verschieden grosser äusserer Widerstände finden und dadurch active Locomotion in homogenen Medien zu Stande bringen können.

Ausserdem aber genügt eine blosse Aenderung der Gestalt einer Partialmasse, eine Vergrösserung des bei der Bewegung vorangehenden Theiles ihrer Oberfläche, damit sie einen grössern äussern Widerstand bei ihrer Bewegung erfahre. Eine flächenhafte Verbreiterung derjenigen Partialmassen, welche als Locomotionshebel bei den fliegenden, schwimmenden, grabenden Geschöpfen den hauptsächlichen, locomotorisch wirksamen Widerstand wachrufen sollen, ist bekanntlich für die Locomotionsfähigkeit von der grössten Bedeutung. Die Flügel des Vogels, die Schwimmhäute der im Wasser rudernden Geschöpfe, Flossen und Schwimmschwanz der Fische, die Grabfüsse des Maulwurfs, diese Enrichtungen erläutern alle das in Rede stehende Prinzip.

Auch die blosse Verschiedenheit der Orientirung der Einzelabschnitte des Körpers zu ihrer Eigenbewegung kann zur Erzeugung ungleicher äusserer Widerstände verwendet werden, so bei den langgestreckten, cylindrischen, band- oder plattenförmigen Wasserthieren, welche sich durch Schlängelungen ihres Leibes fortbewegen Zur allgemeinen Orientirung mag das Angedeutete genügen. Bei der Betrachtung der allgemeinen Verhältnisse der innern Maschinerie und bei der speciellen Analyse der einzelnen Locomotionen wird Manches zur Ergänzung hinzugefügt werden können.

V.

Ausdehnung der Oberflächen, welche den wesentlichen locomotorischen Widerstand hervorrufen. Dynamische Bedeutung des Skeletes. — Richtung der Bewegung der Partialmassen nicht massgebend für die Richtung der äussern Widerstände. Active Locomotion symmetrisch gebauter und bewegter Apparate durch symmetrische Widerstände. — Innere Uebertragung der Kraftrichtungen. — Die ursprüngliche Richtung der treibenden innern Kraft ist nicht massgebend für die Richtung ihres locomotorischen Impulses. Der Hebemuskel des Vogelflügels und der Musc. deltoideus des Menschen. — Ein Fall äusserer Uebertragung innerer Kräfte.

Wie schon aus dem Vorigen hervorging, stehen Gestalt, Oberfläche, Masse und Orientirung der Theile, welche bei der Locomotion auf die materielle Umgebung wirken, in enger Anpassung zu der letzteren. In flüssigen Medien, wo der Widerstand kein absoluter ist, erweist sich namentlich die flächenartige Vergrösserung der Theile, welche den hauptsächlichen locomotorischen Widerstand erzeugen sollen, als vortheilhaft. Mit der mechanischen Wechselbeziehung zwischen so grossen Theilen der Körperoberfläche und ihrer Umgebung sind hier keine speziellen, schädlichen Nebenwirkungen für die Strucktur des Körpers verknüpft.

An festen Oberflächen könnten an und für sich ebensogut umfängliche, als beschränktere Partien der Körpermasse zur Hervorrufung der Widerstände benutzt

werden. Hier aber zwingt im Allgemeinen sowohl der schädliche Einfluss der Reibung auf die Struktur der Körperoberfläche, als auch das Interesse an einer möglichst geringen Behinderung der Fortbewegung, die Zahl der Berührungspunkte mit der Unterlage möglichst zu beschränken und bei der Erzeugung des locomotorischen Widerstandes Ausgleiten und Reibung möglichst zu vermeiden.

Je starrer die Theilchen der Umgebung, welche zunächst der Bewegung eines Körpers Widerstand leisten, mit einem grösseren Massensysteme verbunden sind, je plötzlicher und grösser ihr Widerstand ist, desto grösser ist der Verlust an Bewegungsmenge, welchen durch ihre Hemmung der ganze Körper erfahren kann, desto geringer aber die Formveränderung, welche der Körper dabei erleidet. Auch am locomotorisch thätigen Körper kann die Zahl der hauptsächlich Widerstand erfahrenden Oberflächentheilchen unter der Bedingung eingeschränkt sein, dass sich die auf dieselben wirkende Widerstandskraft prompt und weithin der umgebenden Masse mittheilt, was ja im Interesse der inneren Einrichtung der Bewegungsmaschine selbst nothwendig ist.

Wenn dafür durch starre Beschaffenheit der Partialmassen oder durch ein inneres oder äusseres Skelet derselben genügend gesorgt ist, wenn andererseits die äusseren Widerstände annähernd absolute sind, dann wächst der Widerstand mit der Vermehrung der sich berührenden Oberflächenpunkte kaum noch wesentlich. Daher bedienen sich wirklich die Thiere, welche sich auf der festen Erdoberfläche bewegen, im Allgemeinen dabei einer geringern Anzahl von Punkten zur Erzeugung des hauptsächlichen Widerstandes.

Diese Betrachtung führt uns naturgemäss dazu, die Bedeutung des Stützgerüstes des Körpers für die Locomotion zu würdigen.

Die eigentliche organische, das Wachsthum und die Bewegung vermittelnde Substanz ist naturgemäss weich und verschieblich. Je complicirter dieselbe in ihrer Struktur wird, je complicirter andererseits die mechanischen Wechselbeziehungen mit der Aussenwelt sind, desto nothwendiger muss die Configuration des Systemes in gewissem Grade gesichert werden. Dies wird bei grösseren thierischen Massen, die nicht rings vom Drucke einer Flüssigkeit gestützt sind, zum unbedingten Erforderniss. Die postulirte Sicherung geschieht durch ein von der weichen Körpersubstanz abdifferenzirtes Stützgerüst, welches entweder als centrale Axe den Weichtheilen zur Befestigung dient oder Hohlräume um dieselben bildet. Ganz allgemein ausgedrückt besteht die Funktion des Stüztgerüstes für irgend einen Körpertheil in der prompten Uebertragung von Impulsen, welche einzelne Theilchen des Körper-

abschnittes treffen, auf jene ganze Masse, seien nun jene Impulse Muskelwirkungen, oder äussere Widerstände, oder äussere Kräfte irgend anderer Art.

Es folgt daraus als selbstverständlich, dass jenes Gerüst namentlich da, wo solche äussere Kräfte stark und wiederholt einwirken, in relativ innigem Zusammenhange mit den zunächst von der Einwirkung betroffenen Oberflächentheilchen stehen muss. Deshalb inseriren die Muskeln meist unmittelbar am Skelet und es treten an den Verbindungsstellen der Partialmassen miteinander, an denen ja, wie oben erwähnt wurde, innere mechanische Wechselwirkungen statthaben müssen, die Skelettheile der verschiedenen Partialmassen in unmittelbare Berührung miteinander. Dies musste auch deshalb geschehen, damit unter Umständen bewegungsändernde Einflüsse oder Krafteinwirkungen von einem Punkte aus nicht bloss auf das zugehörige Glied sondern auf den ganzen Körper übertragen werden können.

Man vergegenwärtige sich nur, wie sich von der Unterstützungsfläche aus der Widerstand der Unterlage durch ein ganzes in sich gefestigtes System von Theilchen bis zu irgend einem beliebigen Partikel des Körpers fortpflanzen muss, um dasselbe zu verhindern, dem Einflusse der Schwere folgend sich zu bewegen, oder wie z. B. beim Sprung eine absolute Hemmung der Bewegung sich von den zunächst auf den Boden aufgesetzten Theilchen möglichst prompt sämmtlichen Massentheilchen mittheilen muss, um sie zu verhindern, sich in schädlicher Weise ineinander zu verschieben.

Umgekehrt, ist der letzt erwähnte spezielle Zweck, so weit er den ganzen Körper betrifft, durch ein Gerüst gesichert, welches kontinuirlich den ganzen Körper durchzieht, so fordern doch die gewichtigsten Interessen, es verlangt vornehmlich die locomotorische Thätigkeit eine Beweglichkeit einzelner Abschnitte des Körpers gegeneinander und damit eine Gliederung des Skeletes.

Obige Definition der Funktion des Stützgerüstes hat den Vortheil, dass sie sowohl die statische, als die dynamische Bedeutung in sich schliesst. Die statischen Beziehungen lassen sich als besondere Spezialfälle von den allgemeineren, dynamischen Verhältnissen ableiten. In der That, wenn z. B. ein thierischer Körper gegenüber der Schwere durch sein Stützgerüst an der Bewegung gehindert ist, dann wirken zwei Kräfte auf ihn: einmal die Schwere, auf alle Massetheilchen gleichmässig, sodann der Widerstand der Unterstützungsfläche, dieser zunächst doch nur auf die Theilchen, die mit ihr in Berührung sind. Wäre der ganze Körper weich, dann müssten diese Theilchen in die andern, welche durch die Schwere alle in gleichem Maasse beschleunigt werden, relativ hineingeschoben werden; durch das starre Gerüst aber

werden. Hier aber zwingt im Allgemeinen sowohl der schädliche Einfluss der Reibung auf die Struktur der Körperoberfläche, als auch das Interesse an einer möglichst geringen Behinderung der Fortbewegung, die Zahl der Berührungspunkte mit der Unterlage möglichst zu beschränken und bei der Erzeugung des locomotorischen Widerstandes Ausgleiten und Reibung möglichst zu vermeiden.

Je starrer die Theilchen der Umgebung, welche zunächst der Bewegung eines Körpers Widerstand leisten, mit einem grösseren Massensysteme verbunden sind, je plötzlicher und grösser ihr Widerstand ist, desto grösser ist der Verlust an Bewegungsmenge, welchen durch ihre Hemmung der ganze Körper erfahren kann, desto geringer aber die Formveränderung, welche der Körper dabei erleidet. Auch am locomotorisch thätigen Körper kann die Zahl der hauptsächlich Widerstand erfahrenden Oberflächentheilchen unter der Bedingung eingeschränkt sein, dass sich die auf dieselben wirkende Widerstandskraft prompt und weithin der umgebenden Masse mittheilt, was ja im Interesse der inneren Einrichtung der Bewegungsmaschine selbst nothwendig ist.

Wenn dafür durch starre Beschaffenheit der Partialmassen oder durch ein inneres oder äusseres Skelet derselben genügend gesorgt ist, wenn andererseits die äusseren Widerstände annähernd absolute sind, dann wächst der Widerstand mit der Vermehrung der sich berührenden Oberflächenpunkte kaum noch wesentlich. Daher bedienen sich wirklich die Thiere, welche sich auf der festen Erdoberfläche bewegen, im Allgemeinen dabei einer geringern Anzahl von Punkten zur Erzeugung des hauptsächlichen Widerstandes.

Diese Betrachtung führt uns naturgemäss dazu, die Bedeutung des Stützgerüstes des Körpers für die Locomotion zu würdigen.

Die eigentliche organische, das Wachsthum und die Bewegung vermittelnde Substanz ist naturgemäss weich und verschieblich. Je complicirter dieselbe in ihrer Struktur wird, je complicirter andererseits die mechanischen Wechselbeziehungen mit der Aussenwelt sind, desto nothwendiger muss die Configuration des Systemes in gewissem Grade gesichert werden. Dies wird bei grösseren thierischen Massen, die nicht rings vom Drucke einer Flüssigkeit gestützt sind, zum unbedingten Erforderniss. Die postulirte Sicherung geschieht durch ein von der weichen Körpersubstanz abdifferenzirtes Stützgerüst, welches entweder als centrale Axe den Weichtheilen zur Befestigung dient oder Hohlräume um dieselben bildet. Ganz allgemein ausgedrückt besteht die Funktion des Stüztgerüstes für irgend einen Körpertheil in der prompten Uebertragung von Impulsen, welche einzelne Theilchen des Körper-

abschnittes treffen, auf jene ganze Masse, seien nun jene Impulse Muskelwirkungen, oder äussere Widerstände, oder äussere Kräfte irgend anderer Art.

Es folgt daraus als selbstverständlich, dass jenes Gerüst namentlich da, wo solche äussere Kräfte stark und wiederholt einwirken, in relativ innigem Zusammenhange mit den zunächst von der Einwirkung betroffenen Oberflächentheilchen stehen muss. Deshalb inseriren die Muskeln meist unmittelbar am Skelet und es treten an den Verbindungsstellen der Partialmassen miteinander, an denen ja, wie oben erwähnt wurde, innere mechanische Wechselwirkungen statthaben müssen, die Skelettheile der verschiedenen Partialmassen in unmittelbare Berührung miteinander. Dies musste auch deshalb geschehen, damit unter Umständen bewegungsändernde Einflüsse oder Krafteinwirkungen von einem Punkte aus nicht bloss auf das zugehörige Glied sondern auf den ganzen Körper übertragen werden können.

Man vergegenwärtige sich nur, wie sich von der Unterstützungsfläche aus der Widerstand der Unterlage durch ein ganzes in sich gefestigtes System von Theilchen bis zu irgend einem beliebigen Partikel des Körpers fortpflanzen muss, um dasselbe zu verhindern, dem Einflusse der Schwere folgend sich zu bewegen, oder wie z. B. beim Sprung eine absolute Hemmung der Bewegung sich von den zunächst auf den Boden aufgesetzten Theilchen möglichst prompt sämmtlichen Massentheilchen mittheilen muss, um sie zu verhindern, sich in schädlicher Weise ineinander zu verschieben.

Umgekehrt, ist der letzt erwähnte spezielle Zweck, so weit er den ganzen Körper betrifft, durch ein Gerüst gesichert, welches kontinuirlich den ganzen Körper durchzieht, so fordern doch die gewichtigsten Interessen, es verlangt vornehmlich die locomotorische Thätigkeit eine Beweglichkeit einzelner Abschnitte des Körpers gegeneinander und damit eine Gliederung des Skeletes.

Obige Definition der Funktion des Stützgerüstes hat den Vortheil, dass sie sowohl die statische, als die dynamische Bedeutung in sich schliesst. Die statischen Beziehungen lassen sich als besondere Spezialfälle von den allgemeineren, dynamischen Verhältnissen ableiten. In der That, wenn z. B. ein thierischer Körper gegenüber der Schwere durch sein Stützgerüst an der Bewegung gehindert ist, dann wirken zwei Kräfte auf ihn: einmal die Schwere, auf alle Massetheilchen gleichmässig, sodann der Widerstand der Unterstützungsfläche, dieser zunächst doch nur auf die Theilchen, die mit ihr in Berührung sind. Wäre der ganze Körper weich, dann müssten diese Theilchen in die andern, welche durch die Schwere alle in gleichem Maasse beschleunigt werden, relativ hineingeschoben werden; durch das starre Gerüst aber

wird die Verchiebung der Partikel sehr schnell eingeschränkt und so wird auf prompte Weise die Einwirkung der Widerstandskraft auf sämmtliche Theilchen der Masse übertragen.

Wenden wir uns nun von den allgemeinen Verhältnissen der Construktion zu den speziellen Einrichtungen der Maschinerie, so erkennen wir, dass auf hundertfach verschiedene Weise derselbe Endzweck erreicht wird. Aber auch hier werden der Einzeluntersuchung mit Vortheil einige Bemerkungen allgemeinerer Natur vorausgeschickt.

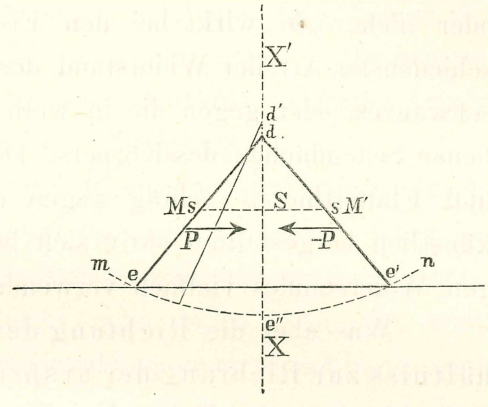
Es ist vor allem aus wichtig, sich der Thatsache bewusst zu sein, dass die Richtung der primären inneren Kräfte, wie sie z. B. durch den Reiz des Muskels frei werden, nicht ohne weiteres bestimmend ist für die Richtung, in denen sich die davon beeinflussten Partialmassen bewegen, dass ferner die Richtung der Bewegung der Partialmassen nicht massgebend ist für die Richtung der hervorgerufenen Widerstände, speziell nicht für diejenige des resultirenden, locomotorischen Widerstandes.

Was zunächst den zweiten Theil dieser Behauptung betrifft, so waren bis jetzt alle unsere Beispiele so gewählt, dass bei denselben die Widerstände direkt der Bewegung der Partialmassen oder einzelner Punkte derselben entgegen wirkten. Es konnte z. B. unter dieser Voraussetzung bei zwei in entgegengesetzter Richtung auseinandergetriebenen Kugeln ein resultirender Widerstand nur dadurch entstehen, dass irgend etwas auf einer Seite anders war, als auf der andern, die Dichte des widerstehenden Medimus, oder die Masse und Geschwindigkeit der einen Kugel, oder die Oberfläche u. s. w. Die Verhältnisse der beiden Seiten konnten nicht vollkommen symmetrisch zu einander sein. Nun ist aber weder bei symmetrisch gebauten Körpern mit symmetrischen Kräften Locomotion unmöglich, noch wirkt überhaupt der äussere Widerstand nothwendig genau derjenigen Richtung der Bewegung entgegen, die ihn hervorruft. An der Oberfläche eines starren äussern Körpers ist jede Verschiebung parallel dieser Oberfläche möglich und nur diejenige senkrecht zur Fläche ist gehindert. Wenn daher ein Körper auf schiefer Ebene dem senkrechten Zuge der Schwere unterliegt, so wird von seiner senkrechten Bewegung nur der Antheil gehemmt, welcher den Körper senkrecht zur schiefen Ebene verschiebt, der Rest, die Componente, die parallel zu letzterer gerichtet ist, vollzieht sich ungehemmt. Die wirkliche Bewegung erscheint als eine abgelenkte.

Nun kann bei einem symmetrischen System sehr wohl mit Bezug auf die Richtung senkrecht zur Symmetrieebene Symmetrie und Gleichgewicht der Kräfte, Widerstände und resultirenden Bewegungen vorhanden sein, während in den Dimensionen der Symmetrieebene selbst die Summe aller äusseren Widerstände durchaus nicht = 0 zu sein braucht. Da derartige symmetrische Systeme in der Thierwelt sehr verbreitet sind, so erscheint es nich überflüssig, dies besonders hervorzuheben.

Ein Beispiel sei hier erörtert. Zwei Massen M und M' (Fig. 2), die zueinander symmetrisch sind, werden so symmetrisch zur Ebene XX' aufgestellt, dass sie sich in einem Punkte d berühren und dort um eine (zur Bildfläche senkrecht gedachte) Axe drehbar sind, mit den andern Endpunkten e und e' aber an eine spiegelglatte, starre, senkrecht zu XX' stehende Oberfläche stossen. Nun sollen zwei symmetrische Kräfte P und $-P$ (innere Kraft des Systemes) in Aktion treten, die Hebelarme einander nähern und den Winkel ede' verkleinern; könnte diese innere Bewegung ohne äussere Widerstände und ohne andere innere, als diejenigen, welche in d statt haben, so lange fortgeführt werden, bis s und s', e und e' zusammenfallen, so müsste nothwendig der gemeinschaftliche Schwerpunkt seine Anfangslage beibehalten, s und s' müssten sich in der Geraden ss' bewegen, d würde gegen X' hin, e und e' müssten nach der Richtung X hin von dieser Linie weg bewegt werden. Es ist leicht, die Curve mn zu construiren, auf der die Punkte e und e' sich dabei bewegen müssten.

Fig. 2.



In Wirklichkeit aber hindert der Widerstand der Unterlage jede Verschiebung der Punkte e und e' in der Richtung $X'X$, ihre Glätte aber gestattet die Bewegung senkrecht zu dieser Richtung. Der Widerstand wirkt also wesentlich nur in der Richtung XX' und es muss gemäss dem von uns Bewiesenen dem gemeinsamen Schwerpunkt eine Bewegung in dieser Richtung ertheilt werden. Man kann diesen Fall leicht durch ein Modell, das aus zwei Holzhebeln und einem elastischen Zuge besteht, verwirklichen.

Ebensogut kann sich eine Muschel, trotzdem ihre Schalen annähernd symmetrisch zu einer Mittelebene sind, und symmetrisch bewegt werden, durch Zusammenklappen der Schalen in einer Richtung der Mittelebene fortbewegen und jeder thierische Körper, der symmetrisch configurirt ist und dessen Partialmassen gegeinander

durch vollkommen symmetrische Kräfte verschoben werden, (der Mensch beim Schwimmen, der fliegende Vogel u. s. w.), kann locomotorisch thätig sein, wenn nur die äussern Widerstände eine einseitig wirkende (reelle) Resultirende haben.

Der schräge Widerstand, der also nur eine Componente der Bewegung der Partialmasse betrifft, spielt bei der Locomotion der Thiere eine sehr grosse Rolle, sei nun der Körper und seien die Configurationsänderungen desselben symmetrisch oder nicht. So wirkt bei den Fischen und bei schwimmenden Kriechthieren verschiedenster Art der Widerstand des Wassers schräg gegen die Fläche des Schwimmschwanzes, oder gegen die in wellenförmiger Krümmung dem Wasser entgegengetriebenen Seitenflächen des Körpers. Der Widerstand der Luft wirkt bei Insekten, Vögeln und Flatterthieren schräg gegen die Flügelflächen. Auch bei den vom Menschen künstlich hergestellten aktiv sich bewegenden Systemen wird das Prinzip des schrägen Widerstandes vielfach verwendet.

Was aber die Richtung der Bewegung der Partialmassen in ihrem Verhältniss zur Richtung der ursprünglichen treibenden, innern Kraft betrifft, so kann hier kaum je in praxi weder bei den vom Menschen erstellten Locomotionsapparaten noch in den Kunststücken, welche die Natur herstellt, eine genaue Uebereinstimmung herrschen. Zu den treibenden inneren Kräften treten innere Wechselbeziehungen anderer Art, Wirkungen und Gegenwirkungen; aus der ursprünglichen Bewegung in einer Richtung entstehen Drehbewegungen und noch complicirtere Massenbewegungen. Die Uebertragung der inneren treibenden Kraft aus ihrer ursprünglichen Richtung in irgend eine andere ist ausserdem meist direktes Erforderniss. So liegen Muskeln oft ganz entfernt von den Gelenken, an denen sie beugend oder streckend wirken, und sind in beliebiger Richtung orientirt; von den Rädern, Riemen, Rollen und tausend kunstvollen Vorrichtungen der menschlichen Kunst, die diesem Zwecke dienen, gar nicht zu reden.

Noch viel weniger kann unter diesen Verhältnissen die ursprüngliche Richtung, in der die treibenden Spannkräfte wirken, für die Richtung des resultirenden, äussern Widerstandes bestimmend sein.

Bei einem Dampfschiffe besteht z. B. die locomotorische Leistung darin, trotz den Widerständen des Wassers gegen das die Flut durchfurchende Schiff die Horizontalgeschwindigkeit des letzteren konstant zu erhalten. Der dazu nützliche, locomotorische Widerstand wird durch die Drehung zwischen Rad und Schiffkörper

wachgerufen und wirkt auf die unten stehenden Radschaufeln immer wesentlich nach vorn. Die Spannkraft des Dampfes aber, welche die Kolben durch die Länge der Cylinder hin und hertreibt, die ursprüngliche treibende Kraft bewegt je nach den Systemen den Kolben entweder in horizontaler oder in vertikaler Richtung oder schräg zum Wasserspiegel, ja bei Maschinen mit beweglichen Cylindern ändert sich die Richtung der Kolbenbewegung von Augenblich zu Augenblick. Ebenso ist bei einer Locomotive die Erzeugung horizontal vorwärts gerichteter Reibungswiderstände an der unteren Peripherie der Räder an und für sich bei jeder beliebigen Orientirung der Cylinderaxe möglich. Es giebt immer Mittel, die Kraftrichtungen zu übertragen. So erlaubt offenbar auch die Lage und Richtung eines Muskels durchaus keinen sicheren Schluss auf den locomotorischen Effekt seiner Thätigkeit.

Als Beweis dafür, dass die Erörterung dieser allgemeinen Prinzipien durchaus nicht überflüssig ist, erscheint mir die Thatsache, dass selbst Prechtl, jener berühmte Physiker, dessen Untersuchungen über Luftwiderstand allgemein geschätzt sind, dessen „Untersuchungen über den Flug der Vögel“ (Wien 1846) von einer ebenso grossen Beobachtungskunst als analytischen Begabung zeugen und in theoretischer Beziehung noch heute das Beste darstellen, was wir über den so schwierigen Gegenstand besitzen, dass Prechtl doch gerade in einer solchen allgemeinen und anscheinend einfachen Frage sich geirrt hat. Prechtl erörtert ganz richtig, dass der Rumpf durch die Reaktion der grossen Brustmuskeln gehoben wird, während der abwärts bewegte Flügel in der Luft Widerstand findet; er geht aber nicht weiter in die Mechanik des Problemes der Reaktion ein und wendet sich zum *M. subclavius*. Dieser Muskel zieht wie der grosse Brustmuskel, von dessen vorderem Theile bedeckt und in den Winkel zwischen Brustbeinplatte und Brustbeinkamm eingelagert, schräg nach aussen oben zur Schulter, wirkt aber nicht von unten her auf den humerus, sondern von oben, nachdem er die Rollenvorrichtung des „foramen triosseum“ passirt hat. Mit Bezug auf diesen Muskel, den er als kleinen Brustmuskel bezeichnet, stellt nun Prechtl die ganz falsche Theorie auf, dass die Contraktion desselben zur Hebung des Vogelkörpers beitrage. (l. c. § 176). „Während eines Flügelschlages trägt auch der Mechanismus des Rückschlages einigermassen zur Hebung bei. Denn durch die Contraktion des kleinen Brustmuskels, welcher die Hebung oder Umrollung des eingezogenen Flügels bewirkt, zieht dessen eines Ende mit demselben Momente das Brustbein in die Höhe, als das andere durch das Loch des Schultergürtels laufende auf die Drehung des Oberarmbeinkopfes, deren Druck nicht nach abwärts, sondern hauptsächlich nach innen seitwärts und rückwärts gerichtet ist, wirkt. Von der analogen Wirkung kann

man sich leicht überzeugen, wenn man sich auf eine Wage stellt und mit feststehenden Füssen die Arme schnell in die Höhe zieht; es erfolgt eine Hebung oder Erleichterung des Körpers vermöge der Reaktion des Deltamuskels, die um so merkbarer ist, je schneller die Bewegung geschieht".

Denken wir uns aber zunächst die Hebung des Flügels durch den *M. subclavius* ohne äussere Widerstände vor sich gehen, so wird durch die Verschiebung des Flügels allein der Partialschwerpunkt beider Flügel gegenüber dem Rumpfe nach oben bewegt; der gemeinsame Schwerpunkt des Thieres aber wird durch die inneren Kräfte allein nicht beeinflusst; daher muss, während der Flügelschwerpunkt nach oben geht, der Rumpf nothwendigerweise nach unten bewegt werden. Um die Art dieses Wechselverhältnisses noch einen Schritt weiter zu studiren, denke man sich einmal die Hebung so lange fortgesetzt, bis der Flügel senkrecht steht und die Theilchen desselben sich horizontal der Symmetrieebene zu bewegen. Sie können sich dann in der vertikalen Richtung höchstens zugleich mit dem Rumpfe verschieben. Wäre letzteres wirklich der Fall, so würde offenbar der gemeinsame Schwerpunkt des Ganzen nicht mehr in Ruhe sein. Diese Annahme ist aber dem allgemeinen Gesetz über die Wirkung innerer Kräfte zu Folge nicht zulässig; es bleibt daher nur der Schluss möglich, dass der Flügel in dieser Vertikalstellung zugleich mit dem Rumpfe keinerlei Bewegung in irgend einer Richtung der Symmetrieebene ausführe, auch dann nicht, wenn die Muskelkräfte in vollster Thätigkeit sind. Die Anullirung der Aufwärtsgeschwindigkeit der Flügel, der Abwärtsgeschwindigkeit des Rumpfes ist also in diesem Momente perfekt; sie muss sich nothwendig durch Wirkung und Gegenwirkung an den Drehungspunkten vollzogen haben.

Kehren wir nun zu dem gewöhnlichen Vorgange einer Flügelhebung zurück. Es besteht die Aktion des *M. subclavius* dabei in der Hebung des Flügels und die Reaktion auf den Rumpf darin, dass demselben ein Impuls nach unten ertheilt wird. Zu berücksichtigen ist nun aber ausserdem der Widerstand, welchen der Flügel bei seiner Hebung erfährt; es ist leicht einzusehen, dass in Folge desselben die Abwärtsbewegung des Rumpfes das Uebergewicht bekommen und dass der Gesammtschwerpunkt nach unten bewegt werden muss. Es findet also das Umgekehrte von dem statt, was Prechtl behauptet.

Was aber jenes Beispiel vom menschlichen Muscul. deltoideus betrifft, so liegen hier die Verhältnisse ganz anders. Wenn Muskelkräfte dem Arme solche Impulse ertheilen, dass sich derselbe nach oben bewegt, so erhält nothwendig der übrige Körper zu gleicher Zeit entsprechende Impulse nach unten hin. Stand die Person

vor der Aktion auf einer leicht beweglichen Wage im Gleichgewicht, so wird bei der Hebung des Armes die Wagschale sich abwärts bewegen; aber da diess nie ohne einen grössern oder geringern Widerstand am Unterstützungspunkte geschehen kann, so fällt die Abwärtsbewegung zu gering aus, so dass der gemeinsame Schwerpunkt des ganzen Körpers (oder von Körper + Wagebalken) nicht in derselben Höhe bleiben kann; vielmehr rückt er nach oben. Wirkt die hebende Kraft sehr energisch und bekommt der Arm eine sehr grosse aufwärts gerichtete Bewegungsmenge, so wird, sind äussere Widerstände nicht vorhanden, die ganze abwärts gerichtete Bewegungsmenge des übrigen Körpers gerade aufgebraucht werden, damit durch die Verbindung der Schulter die Aufwärtsbewegung des Armes schliesslich anullirt werde. Nun kann aber durch den Widerstand der Wage selbst, wenn dieser gross ist, die Abwärtsbewegung des Körpers schon anullirt sein, während der Arm noch lebendige Kraft nach oben besitzt; je mehr der Arm der Senkelhalte sich nähert, desto mehr überträgt sich diese lebendige Kraft nothwendig dem ganzen Rumpfe und war die Bewegung sehr energisch, dann wird wohl der Rumpf gerade so gut in den Zehenstand emporgerissen werden können, als diess eintritt, wenn wir auf festem Grunde stehend die Arme energisch in die Höhe werfen. Hier wird also der grössere äussere Widerstand nicht an dem aufwärts bewegten Arme erzeugt, sondern an der Unterlage der Füsse. Hier kann so gut wie bei dem erörterten Beispiele vom Vogel locomotorische Einwirkung statthaben, aber in der entgegengesetzten Richtung.

Nachdem wir so eingehend über die inneren Uebertragungen der Kraftrichtung gesprochen haben, sei hier auch noch kurz auf ein anderes eigenthümliches Verhältniss aufmerksam gemacht, das sich findet, wo durch Verengerung eines an einer Seite offenen, vom thierischen Körper gebildeten Rohres oder Bechers Flüssigkeit ausgetrieben und durch den Rückstoss der Körper fortbewegt wird (Salpen, Medusen, Libellenlarven u. s. w.). Hier wird der Wanddruck der Flüssigkeit an sämmtlichen Wandstellen des Rohres gleichzeitig gesteigert, also auch an Stellen, die durch die inneren Kräfte des Körpers gar nicht bewegt werden. Es findet also eine Art Uebertragung der ursprünglichen Wirkung und Gegenwirkung auf das äussere Medium statt, mit Umänderung der Richtung, und nur der eine Theil der Wirkung wird von diesem Medium auf den thierischen Körper wieder abgegeben. Der äussere Widerstand gegen die Verengerung der Leibeswand wird also hier zum Theil durch äussere Uebertragung direkt in eine fortbewegende Kraft umgewandelt.

VI.

Die active Locomotion im Allgemeinen an eine Configurationsänderung des Körpers geknüpft. Verwerthung von lebendiger Kraft der Eigenbewegung zur Locomotion. — Gränzen der Configurationsänderung. Hin- und Herbewegung der Partialmassen. Die Rückbewegung mehr oder weniger activ locomotorisch wirksam, oder direkt schädlich (Correction). — Mittel zur locomotorischen Verwerthung beider Theile der Aktionsperiode. — Unterschied der künstlichen und natürlichen Locomotionsmaschinen.

Im Allgemeinen ist die active Locomotion mit Configurationsänderungen des Körpers verknüpft. Innere, organische Kräfte veranlassen innere Bewegungen, äussere Widerstände modificiren dieselben, doch so, dass ein Rest übrig bleibt. Wenn innere Kräfte sich so das Gleichgewicht halten, dass durch sie allein keine Aenderung in der Configuration oder Bewegung des Systemes zu Stande kommt, so können sie zu der Wechselwirkung zwischen dem letzteren und der Aussenwelt nichts Neues hinzufügen, keine neuen äusseren Widerstände hervorrufen und keine locomotorische Wirkung haben. Es können wohl die Theilchen in Folge einer vorausgegangenen bewegenden Einwirkung von Kräften noch in Bewegung gegeneinander begriffen sein, und diese Bewegung kann zur Erzeugung eines einseitigen Widerstandes und zur locomotorischen Wirkung verwendet werden; aber die letztere kommt nicht auf Rechnung der jetzt an jedem Theilchen sich das Gleichgewicht haltenden Kräfte, sondern auf Rechnung derjenigen, die früher eingewirkt haben. So kann die lebendige Kraft, welche ein Locomotionshebel, ein Ruder, ein Flügel bei seiner Drehung gegenüber dem Rumpfe erworben hat, schliesslich durch äussere Widerstände aufgehoben und locomotorisch ausgenutzt werden, zu einer Zeit, wo gar keine Muskelkräfte mehr beschleunigend einwirken.

Nun sind aber die Partikel des thierischen Körpers nur innerhalb gewisser Gränzen gegeneinander verschieblich. Die gegenseitige Bewegung derselben durch innere Krräfte in irgend einer Richtung ist daher beschränkt und soll sich dieselbe Aktion wiederholen, so muss eine Bewegung nach der umgekehrten Richtung stattfinden, welche die ursprüngliche Configuration wieder herstellt. Eine Bewegung aus einer Gränzlage ist überhaupt ohne Umkehr nicht denkbar, doch steht mehr als ein Weg zur Rückbewegung offen. Bei regelmässiger Fortdauer der locomotorischen Thätigkeit werden nun aber wohl im Allgemeinen einzelne besonders wirksame Folgen von Stellungsänderungen periodisch wiederholt werden müssen und dies führt dazu, dass der Ablauf der Stellungsänderungen auch während der ganzen übrigen Periode das eine Mal wesentlich wie das andere Mal verläuft. Jedes Theilchen bewegt sich dann gegenüber den anderen continuirlich in einer geschlossenen Bahn, die

in jeder Periode wesentlich dieselbe ist, so wenigstens bei längerer Fortführung derselben Locomotionsthätigkeit.

Die gegenseitige Bewegung der Partialmassen ist naturgemäss in gewisse Schranken gebannt; es giebt Fälle, in denen die Theilchen, um in eine bestimmte Anfangslage zurückzukehren, eine genau rückläufige oder annähernd rückläufige Bewegung ausführen müssen. Jedenfalls aber kann man fast immer an einer ganzen Periode deutlich zwei Abschnitte, eine Hin- und Herbewegung, unterscheiden, auch wenn die Rückbewegung keine genau rückläufige ist. Jeder wird sich hierbei daran erinnern, wie das Ruder gegenüber dem Kahn einen flachgedrückten Kegelmantel beschreibt, wie Aehnliches mit den Ruderfüssen der Enten und Schwäne geschieht, wie jeder Punkt des Flügels von einem Insekt oder Vogel gegenüber dem Rumpfe eine eigenthümliche, geschlossene Curve beschreibt und wie man doch in allen diesen Fällen deutlich zwei Theile einer Periode unterscheiden kann. Noch viel schärfer ist die Gliederung beim Gange der Landthiere und des Menschen, wo die Extremitäten sich innerhalb derselben Ebene vor- und zurückdrehen.

Auf den ersten Blick scheint es, als ob hinsichtlich der locomotorischen Leistung innerhalb der beiden Theile der Periode, der Hin- und Herbewegung zwei Möglichkeiten ganz streng voneinander unterschieden werden könnten. Bald scheint nur in der einen Hälfte der Periode die Locomotion direkt gefördert zu werden, während die andere Hälfte bloss der Wiederherstellung der Anfangslage dient. So schliesst z. B. das Vorführen der Ruder, das Vorführen der Beine beim Gehen und beim Schwimmen keine erhebliche, direkte, locomotorische Leistung in sich. Nach den Theorieen, welche Prechtl, Marey u. a. über die Flugbewegung aufgestellt haben, würde dies auch für die Hebung des Flügels beim Vogel gelten.

Die andere Möglichkeit ist, dass auch die Rückbewegung locomotorisch wirkt. Dies ist z. B. entschieden der Fall bei der Hin- und Herbewegung des Schwimmschwanzes der Fische und würde für die Flügelbewegung gelten, wenn die Ansicht von Borelli richtig wäre, dass sowohl bei der Hebung als bei dem Niederschlage die vorausgehende Fläche etwas nach hinten gewendet ist; es gilt für jene von Tatin und anderen Technikern hergestellten künstlichen Vögel, die nach dem Borelli'schen Prinzipe fliegen. Wenn wir, auf dem Rücken schwimmend die Vorderarme und Hände abwechselnd den Schenkeln nähern und sie von ihnen entfernen, so dass die Hohlhand dabei nach unten sieht, aber immer etwas schräg vorangeht, und dass gerade sie den Wider-

stand erzeugt, dann bewegt sich die Hand in Achtertouren und ihr Druck auf das Wasser hilft sowohl bei der Annäherung als bei der Entfernung, den Körper in der Höhe zu halten.

Meist ist die Sache dabei so, dass die in den beiden Hälften der Periode erzeugten resultirenden, äusseren Widerstandskräfte nicht genau dieselbe Richtung haben, dass sich aber ihre Impulse zu einer mittleren vortheilhaften Richtung combiniren. Tragen wir diesem Umstande Rechnung, dann gehört auch die locomotorische Thätigkeit der menschlichen oberen Extremität beim gewöhnlichen Schwimmen in diese Kategorie. Beim Zurückführen der Arme wirkt der Widerstand des Wassers nach vorn oben auf die Handflächen; führen wir dann die Arme vor der Brust gegeneinander und vor dem Kopfe nach vorn, so bewegen wir dabei wieder die Hohlhandfläche schräg voran gegen das Wasser und erzeugen einen Widerstand, der schräg nach oben und aussen wirkt.

Ist die Theorie von Pettigrew über den Flug richtig, dann erzeugt der Vogelflügel beim Niederschlage einen Widerstand, der nach hinten oben gerichtet ist, bei der Hebung aber gleitet er mit seiner obern Fläche, die zugleich etwas nach hinten sieht, schräg gegen die Luft und erzeugt einen Widerstand, der mehr nach vorn unten sich äussert. Beide Einflüsse sollen sich dann zu einem mittleren, nach vorn oben gerichteten combiniren. Doch erwähne ich diese Ansicht von Pettigrew, ohne sie vertheidigen zu wollen.

Jedenfalls giebt es Fälle, in welchen die eine Hälfte der Periode zwar an Wirksamkeit der andern nicht gleichkommt, aber irgend eine nicht zu unterschätzende Nebenwirkung zu Stande bringt, und so finden sich alle Uebergänge bis zu dem Falle, wo sie gleichsam einen leeren Gang der Maschine darstellt. Letzteres ist seltener, als man glauben möchte. Man irrt sich in Wirklichkeit, wenn man annimmt, dass das Vorführen der Beine beim Gehen und Laufen an und für sich ohne locomotorischen Effekt sei. Die Vorführung der Beine ist mit einer Vorbewegung des Gesammtschwerpunktes verknüpft. Man führe nur eine solche Bewegung energisch aus und man wird bemerken, wie der ganze Körper gewaltsam nach vorn, dem vorgeschleuderten Beine nach gezogen wird. Angenommen, es seien in der Stellung, bei welcher der menschliche Körper von dem vorgestellten Fusse unterstützt ist und die Vorführung des zurückstehenden Beines beginnt, die Beugemuskeln in Thätigkeit, aber ohne dass die Bewegung von der Schwere und von äussern Widerständen beeinflusst ist, so wird vorn der Kopf gegen den Fuss des vorzuführenden Beines bewegt und umgekehrt. Der gemeinsame Schwerpunkt, der ursprünglich noch über den Hüftgelenken lag, wird

gegenüber den Hüftgelenken nach vorn rücken müssen, oder besser gesagt, es wird, da er in Wirklichkeit an derselben Stelle bleibt, das Hüftgelenk nach hinten durchgedrückt. Da nun das vorgeführte Bein annähernd eine reine Drehung um den Gesammtschwerpunkt nach vorn oben ausführt, so muss die andere Partialmasse, der Oberkörper mit dem aufgestellten Beine eine umgekehrte Drehung ausführen, bei welcher der Kopf nach vorn, das Hüftgelenk und noch mehr der Fuss nach hinten geht. Diese Betrachtung zeigt klar, nach welcher Seite hin das Standbein drücken wird. Der Widerstand wird auf den Fuss des starr mit dem Oberkörper verbunden gedachten Standbeines nach vorn wirken und es wird der locomotorische Effekt in einer Bewegung des Gesammtschwerpunktes nach vorn bestehen. Nur so erklärt sich auch, dass der Körper bei gleich grossem Betrage des horizontalen Abstandes des gehobenen Beines vom Rumpfe doch stärker nach vorn gerissen wurde, wenn die Hebung mit grosser Energie, als wenn sie langsam geschah.

Hier dienen also immer noch beide Theile der ganzen Aktionsperiode demselben Zwecke. Nun giebt es aber Fälle, in welchen dies nicht zutrifft. Ja eine solche Rückführung der Partialmassen in ihre Ausgangsstellung ist häufig nicht bloss ohne positiven locomotorischen Effekt, sondern wirkt direkt der gewünschten Verschiebung des Ganzen entgegen. Beim Rudern muss das Ruder eine mehr oder weniger grosse Strecke weit entgegen dem widerstehenden Wasser vorgeführt werden und die hierbei erlittene Hemmung wirkt direkt schädlich. Hier wird der Nachtheil dadurch möglichst herabgemindert, dass das Ruder gedreht und mit der Kante voran vorbewegt wird. In andern Fällen wird ein Hebelarm eingezogen oder verkürzt, damit er weniger Widerstand bietet. Oder es ist, namentlich bei flächenhaften oder borstenartigen, fest eingepflanzten Locomotionshebeln der mittlere, elastische Gleichgewichtszustand von der Art, dass der von der einen Seite kommende Widerstand die Fläche derselben vergrössern und senkrechter zur Richtung der Bewegung stellen muss, während bei der Bewegung nach der entgegengesetzten Richtung die Gebilde sich umbiegen und zur Bewegungsrichtung mehr parallel stellen.

An den Schwimmfüssen der Frösche und Wasservögel gestatten einmal die Gelenke des Fusses und der Zehen eine derartige Abbiegung, ausserdem aber legen sich die Zehen mit den zwischen ihnen ausgespannten Schwimmhäuten bei der Vorbewegung zusammen, so dass der Fuss eine schmale, mit der Kante voranbewegte Platte darstellt, während beim wirksamen Schlage nach hinten die Extremität sich streckt und steift und die Schwimmhaut sich entfaltet.

Bekanntlich nehmen die meisten Autoren, welche sich mit dem Fluge befasst

haben, an, dass auch an dem Vogelflügel ein analoger, kunstvoller Mechanismus sich finde, indem derselbe bei der Hebung die von oben andrängende Luft leicht zwischen den Federn durchlasse, während bei dem Niederschlage sämmtliche Federn ventilartig aufeinander geschlossen werden. — Kurz die Einrichtungen, welche eine derartige schädliche Wirkung vermindern, sind sehr mannigfaltig und zum Theil sehr wunderbar.

Wenden wir uns noch einmal zu jenen Fällen, bei denen sowohl bei der Hin- als bei der Herbewegung der Partialmassen ein locomotorisch brauchbarer Widerstand erzeugt werden soll, so finden wir, dass auch hier besondere Hülfsmittel nothwendig sind, namentlich da, wo im Interesse eines möglichst grossen, locomotorischen Widerstandes in einem flüssigen Medium eine flächenhafte Vergrösserung desjenigen Körpertheiles stattgefunden hat, der den wirksamen Schlag führt.

Zweierlei Vorkehrungen sind hier ganz allgemein zu verwerthen:

1) eine Stellungsänderung der locomotorisch wirksamen Fläche zu der Richtung der Hin- und Herbewegung;
2) eine möglichst grosse Divergenz der Richtungen, in denen sich die Fläche in den beiden Abschnitten der Aktionsperiode bewegt.

Was zunächst den letzten Punkt betrifft, so führt eine einfache Ueberlegung zu einem interessanten Schlusse. Denkt man sich die Excursionen einer Partialmasse, wie das beim thierischen Körper gewöhnlich der Fall ist, durch die Verbindung einer Seite derselben mit dem übrigen Körper beschränkt, so lässt sich das Excursionsgebiet irgend eines Punktes, z. B. der Spitze derselben annähernd durch eine Ellipse oder durch einen Kreis in einer Ebene darstellen (Fig. 3 A u. B).

Stellt nun der Durchmesser *a b* den einen Theil der locomotorischen Hin- und Herbewegung dar, so wird für den Rückweg das Maximum der Divergenz erzielt werden, wenn er in einem Durchmesser erfolgt, der um 90° von dem ersten verschieden ist. Da aber auch die Länge und Dauer des wirksamen Rückweges von Bedeutung ist, so wird bei seitlich beschränktem Excursionsgebiet (Fig. 3 B) der Winkel, den die beiden Durchmesser miteinander bilden, mit Vortheil weniger gross als 90° sein.

Fig. 3 A

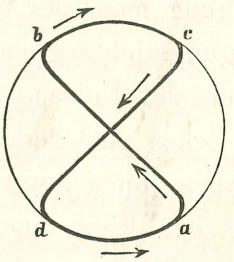


Fig. 3 B

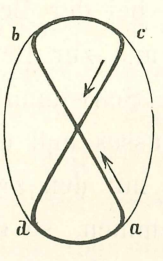
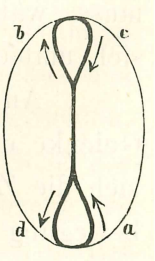


Fig. 3 C



Die Rückbewegung erfolgt also nach unserer schematischen Darstellung am besten in den Richtungen *c d* und es gelangt eine Partialmasse von *b* nach *c* am einfachsten durch eine Bewegung in der Peripherie des Excursionsgebietes, ebenso von *d* wieder nach *a*. Es ist leicht ersichtlich, dass in diesem Falle von dem Ende der Partialmasse eine Achtertour beschrieben wird.

Je mehr nun die Locomotionsfläche selbst gegenüber der Bewegungsrichtung alternirend umgestellt werden kann, desto weniger brauchen im Allgemeinen die sich kreuzenden Schenkel der Achtertour zu divergiren; sie können sogar eine Strecke weit zusammenfallen und nur an den Enden zur Bildung zweier Schleifen auseinander weichen, entsprechend den Bogen, die hier jeder Punkt mehr oder weniger parallel zur Peripherie des Excursionsgebietes beschreibt, während die Umstellung der Fläche erfolgt.

Fig. 4.

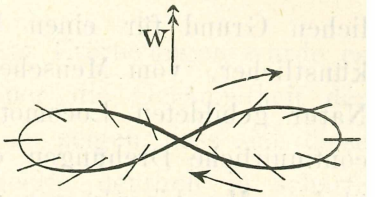


Fig. 4 stellt in einer Vertikalebene die Achtertour dar, welche beim Schwimmen auf dem Rücken von den Handflächen beschrieben wird; die Richtung der Handflächen ist durch die einzelnen die Curve schneidenden Linien angedeutet. Fig. 5 aber zeigt in einer Horizontalebene die Achtertour, welche das Ende der Schwanzflosse des Fisches gegenüber dem Rumpfe beschreibt und die Richtung derselben; ich hoffe an anderer Stelle Gelegenheit zu finden, die hierbei zu Grunde gelegte, von mir neu aufgestellte Theorie von der Bewegung des Schwimmschwanzes eingehend erörtern. In beiden Figuren ist die Richtung des resultirenden, locomotorischen Effektes durch den Pfeil *W* bezeichnet.

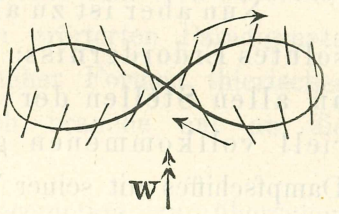


Fig. 5.

Neben der Bewegung in Achtertouren gewährt auch noch diejenige längs den Seiten eines Dreiecks einen ähnlichen Vortheil. Von *a* nach *b* und von *b* nach *c* (Fig. 6 A) kann z. B. ein wirksamer locomotorischer Widerstand erzeugt werden und nur die Excursion *a c* ist nutzlos oder schädlich. Die Bewegung der Hände beim gewöhnlichen Schwimmen kann nach diesem Schema erläutert werden. In Fig. 7 B ist ein Trajektorium derselben, in der Ansicht von oben dargestellt; *v* und *h* bedeuten vorn und hinten; die Lage der Handfläche zum Trajektorium

Fig. 6 A

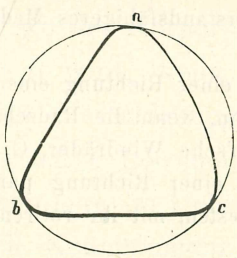
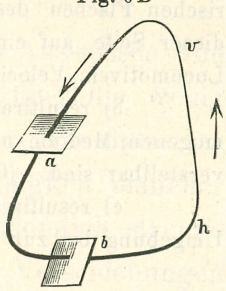


Fig. 6 B



ist an zwei Stellen *a* und *b* markirt; derjenige Theil der viereckigen Flächenstücke, welcher tiefer im Wasser liegt, ist schraffirt.

Die Stellungsänderung der Flächen der Partialmasse gegenüber dem übrigen Körper erfolgt durch Drehung in Gelenken, wie bei der menschlichen Hand oder durch Biegung, wie beim Ende der Schwanzflosse des Fisches oder durch beide Momente; aber immer ist sie eine beschränkte wegen des materiellen Zusammenhanges dieser Theile mit dem übrigen Körper. Dieser Zusammenhang bildet den thatsächlichen Grund für einen bedeutungsvollen Unterschied zwischen der Construktion künstlicher, vom Menschen hergestellter Maschinen und derjenigen der von der Natur gebildeten Locomotionsapparate. In den künstlichen Maschinen haben wir continuirliche Drehungen einzelner Maschinentheile um eine Achse gegenüber dem übrigen Maschinenkörper, wir haben die für die Locomotion so zweckmässigen Räder und rotirenden Schrauben.*)

Nun aber ist zu allen solchen continuirlichen Axendrehungen Eines absolutes Erdorderniss: die gegeneinander gedrehten Maschinentheile müssen an allen Stellen der Berührung und Wechselwirkung voneinander materiell vollkommenen getrennt, discontinuirlch sein. So bildet das Rad eines Dampfschiffes mit seiner Welle gegenüber den Axenlagern, der Triebstange, kurz dem ganzen übrigen Schiffskörper einen Körper für sich und so weiter.

Da eine derartige Zerspaltung des thierischen Körpers in vollkommen isolirte Massen mit der Leitung der Ernährungs- und Bewegungsvorgänge innerhalb der Partialmassen von einem einheitlichen Centrum aus absolut nicht vereinbar ist, so musste die Natur auf die Vortheile vollkommen drehbarer Partialmassen verzichten.

---

*) Einseitiger Widerstand wird dabei erzeugt:

a) tangential zu einer Seite der bei der Rotation beschriebenen Kreise, wenn die locomotorischen Flächen des Rades nicht gegenüber dem Rade verstellbar sind, nur dann, wenn das Rad an dieser Seite auf ein widerstandsfähigeres Medium trifft, als auf der andern. (Räder der Dampfschiffe, Locomotiven, Velocipede).

b) resultirend in einer Richtung einer zur Axe senkrecht stehenden Ebene in einem ganz homogenen Medium nur dann, wenn die Radschaufeln gegenüber den Speichen vollkommen unbeschränkt verstellbar sind. (Oldham'sche Windräder, G. Wellner, l. c. pag. 22).

c) resultirend in einer Richtung parallel der Drehungsaxe auch in vollkommen homogener Umgebung bei zur Axe festen, mit ihr rotirenden Schraubenflächen.

VII.

Ortsbewegung durch Biegungen und Wellenbewegungen des ganzen Körpers, eines Rumpfes oder breiten Fortsatzes. — Locomotion durch Extremitäten. a) durch Verkürzung und Verlängerung. b) Benutzung der ganzen Extremität als Ruder. Drehende Nebenwiskung; Correktion der Drehung durch die Schwere, durch Widerstände gegen das hintere Leibesende (Hint. Extr. der Bipeden, vord. der Quadrupeden, Vögel beim Fliegen und Rudern, Kahn); Schluss aus der drehenden Einwirkung äusserer Kräfte auf die drehende Nebenwirkung der locomotorischen Impulse; Eilgang, Lauf und Sprung bei Bipeden. Behauptung, dass die Hüftmuskeln dabei von grosser Bedeutung sind. c) Mitwirkung der Gelenkmuskulatur der Extremität selbst zur Erzeugung von schräg zu ihrer Längslinie gerichteten Widerständen.

Nach einer so langen Reihe mühsamer, theoretischer Erörterungen würde es sehr am Platze sein, einen orientirenden Ueberblick über die Gesammtheit der Einzelerscheinungen thierischer Locomotion zu werfen und zu zeigen, dass sich diese Mannigfaltigkeit im Lichte der auseinandergesetzten Theorie deutlich in scharfe Gruppen und Typen gliedert. Aber dies würde einerseits den Umfang dieser Abhandlung mehr als zulässig ausdehnen; denn es hält bei mancher einzelnen Besonderheit schwer, mit wenig Worten ihre Zugehörigkeit zu den erörterten Paradigmata klarzustellen. Andererseits sind uns die Verhältnisse mancher Formen thierischer Locomotion auch heutzutage noch vollkommen dunkel; ich brauche nur an die räthselhafte Fortbewegung der Landschnecken zu errinnern.

Wer aber nur die Hauptformen der thierischen Locomotion zu übersehen wünscht, der findet eine ausgezeichnete Anleitung dazu in einer wohldurchdachten, von richtigen physikalischen Gesichtspunkten getragenen, zusammenfassenden Darstellung, welche Herr Milne Edwards über diesen Gegenstand gegeben hat.*)

So beschränke ich mich denn darauf, nur einige wenige, einzelne Punkte des grossen Gebietes, die gerade günstig für uns gestellt sind, heller zu beleuchten, um zu zeigen, dass sie von den neuen Gesichtspunkten aus, die wir gewonnen haben, eine andere Gestalt und ein anderes Ansehen gewinnen. Anderes, was ebenfalls zum Beweise dienen könnte, soll an andern Orten entwickelt werden.

Wenn man die Fälle ausser Acht lässt, wo der Körper durch Ausstossen von Flüssigkeit vermittelst des Rückstosses fortbewegt wird, wenn man über die wenig geregelte Ortsbewegung niederster Thiere durch Verschiebungen des Protoplasmas hinwegsieht, wenn man endlich die beschränkte active Locomotionsfähigkeit mancher festsitzenden Thiere unberücksichtigt lässt, so kann man im Uebrigen ziemlich strenge unterscheiden, ob die active Locomotion durch Krümmungen und Verschiebungen

*) Milne Edwards, Leçons sur la Physiologie et l'Anatomie comparée etc. t. XI. 1874.

der ganzen Leibesmasse, eines rumpfartigen Abschnittes derselben oder solcher Theile, welche mit demselben in sehr ausgedehntem Zusammenhange stehen, vermittelt wird, oder aber durch Extremitäten, welche mit relativ schmaler Basis einem rumpfartigen Abschnitte aufsitzen.

Würmer, Raupen, etc. haben die Fähigkeit, abwechselnd einen bestimmten Abschnitt der Länge des Körpers zu verkürzen und zu verlängern oder durch Krümmung die Enden desselben einander zu nähern und wieder von einander zu entfernen.

Indem nun bei der Verkürzung das vordere, bei der Verlängerung das hintere Ende des Abschnittes durch festes Anlegen an den Boden oder durch Eingreifen von borsten- oder stummelartigen Fortsätzen in die Rauhigkeiten der Unterlage oder durch Ansaugen gegen die Verschiebung gesichert wird, wird in beiden Fällen ein Widerstand, der nach vorn gerichtet ist, und eine Verschiebung der Mitte dieses Körperabschnittes nach vorn hervorgebracht Das sich bewegende Ende schleift dabei leicht über den Boden oder kann von demselben abgehoben sein. Bei Blutegeln und Spannerraupen bildet der ganze Körper einen Bogen; bei den übrigen Raupen entsteht zunächst am hinteren Leibesende zwischen den zwei hintersten Beinpaaren eine Krümmung, sodann, indem diese sich ausgleicht, eine solche an dem nächst vordern Abschnitte; so läuft gleichsam eine Welle von hinten nach vorn über die ganze Länge des Thieres.

Andere Weichthiere, doch auch viele Fische bewegen sich im Wasser vorwärts durch Schlängelungen des Leibes, die Schlangen in ähnlicher Weise auf wenig verschieblichem, trockenem Boden. Bei den Rochen laufen Wellenbewegungen in ähnlicher Weise über die plattenartig an der Seite vorstehenden Brustflossen; bei den Kielfussschnecken zeigen sie sich an medianen, plattenartigen Auswüchsen der Körpermasse bei vielen andern Meeresschnecken an seitlichen Säumen des mächtigen Fusses.

Libellenlarven oder Fische, aus dem Fangnetz auf den Boden geschüttet, schnellen sich durch Seitenbewegung des verbreiterten hinteren Leibesendes empor und durch ebensolche seitliche Oscillationen bewegen sich die Fische in ihrem eigenen Elemente. Der Krebs schlägt mit seinem Schwanze nach oben und unten.

Wie bekannt spielt auch bei höheren Wirbelthieren und beim Menschen die plötzliche Streckung der vorher zusammengekrümmten Wirbelsäule bei der Fortbewegung eine grosse Rolle, namentlich beim Sprung. Gewöhnlich stemmt sich das eine Ende durch Vermittelung der hinteren (untern) Extremitäten gegen den Boden, unter Umständen aber auch direkt wie beim Känguruh vermittelst des mächtigen

Schwanzes. An die mit Schwimmschwanz versehenen Wale, an die Robben, den Biber etc. brauche ich wohl kaum zu erinnern.

Zu dieser Art der Fortbewegung stellt sich also in ziemlich scharfen Gegensatz die Fortbewegung durch Extremitäten. Ich halte es für geboten, zunächst zwei Modi, nach welchen die Extremitäten zur Locomotion verwendet werden können, gesondert zu besprechen, obschon sie öfters nur combinirt vorkommen:

1) Die Annäherung oder Entfernung der Endpunkte der Extremität gegen einander,
2) Die hebelartige Drehbewegung um die Einlenkungsstelle am Rumpf.

Im ersten Falle wird, wenn kein Ausgleiten an der Widerstand leistenden Fläche stattfindet, ein Widerstand erzeugt, der in der Längsrichtung der Extremität wirkt. Die letztere muss sich, um auf diese Weise thätig zu sein, verlängern und verkürzen können. Wo sie durch ein Skelet gestützt ist, muss dieses gegliedert sein.

Herr Prof. H. Meyer bespricht diese Art der Extremitätenwirkung in seinem Buche: die Statik und Mechanik des menschlichen Knochengerüstes*) ausführlich, hebt aber nicht deutlich genug hervor, dass unter allen Umständen ein locomotorischer Einfluss auf den Gesammtschwerpunkt stattfinden muss, wenn eine Extremität bei ihrer Streckung einen äusseren Widerstand erfährt. Wir stehen z. B. in Gegensatz zu diesem Autor keinen Augenblick an, die Erhebung des menschlichen Körpers durch Streckung der Beine als eine ganz richtige Ortsbewegung zu bezeichnen.

Der Mensch bedient sich dieser Thätigkeit in sehr ausgedehntem Maasse zum Sprung in die Höhe und nach vorn, beim Gang, Kriechen, Klettern, Stemmen, Armwippen u. s. w., allerdings nicht immer, ohne dass zugleich der zweite, gleichzubesprechende Modus der Verwendung mit im Spiele ist.

Handelt es sich um reine Streckung oder Verkürzung und erfolgt der Widerstand in der Längsrichtung der Extremität, so ändert sich die Stellung der letzteren zum übrigen Körper an und für sich nicht; Muskelkräfte wirken zunächst nicht in diesem Sinne und gerade hierauf ist Gewicht zu legen. Wohl aber ist zu berücksichtigen, dass allemal, wenn der locomotorische Impuls nicht auf den Schwerpunkt des Restes der Körpermasse hingerichtet ist, eine Drehung desselben um seinen Schwerpunkt, damit aber auch eine Stellungsänderung gegenüber der locomotorisch

---

*) Leipzig 1873 (pag. 65 u. ff., pag. 67).

thätigen Extremität eintreten muss; dieselbe ist aber nicht durch Muskelaktion an dem Gelenke, dessen Stellung sich ändert, hervorgerufen. Die besprochene Leistung der Extremität verhält sich ähnlich, als ob ein elastisches, gedehntes Band oder eine comprimirte, cylindrisch aufgewundene Metallspirale zwischen einen Punkt des Bodens und eine Stelle des Rumpfes eingefügt wäre

---

Für den zweiten Typus der Verwendung einer Extremität zur Locomotion ist charakteristisch, dass gerade an dem Gelenke zwischen Rumpf und Extremität Muskelkräfte thätig sind, dass also die Stellung der Längsaxe der Extremität zum Rumpfe aktiv geändert wird. Ein äusserer Widerstand wird hierbei nicht erzeugt in der Längsrichtung der Extremität, sondern senkrecht zu derselben, mehr oder weniger senkrecht, je nachdem eine direkte Hemmung der Bewegung oder nur eine Ablenkung stattfindet. Hier liegt die Richtung der Widerstandskraft meist weit ab vom Schwerpunkt; und der Impuls, den das System von aussen durch eine Extremität erhält, wird ihm zugleich eine Drehbewegung um den Schwerpunkt mittheilen. Durch symmetrische Wirkung zweier Extremitäten kann diese Drehung — bei gleichzeitiger Aktion von vornherein verhindert, — bei alternirender Aktion wieder rückgängig gemacht werden.

Der Widerstand wirkt also mehr oder weniger senkrecht zur Längsaxe des Locomotionshebels, ähnlich wie bei dem Ruder eines Kahnes. Um eine solche Ruderwirkung hervorzurufen genügt es, dass die Extremität ein einfaches, starres Ganzes ist, sofern nur ihre Stellung zum Rumpfe durch Muskelkräfte geändert werden kann. Dies ist offenbar der einfachste Typus einer locomotorischen Extremität.

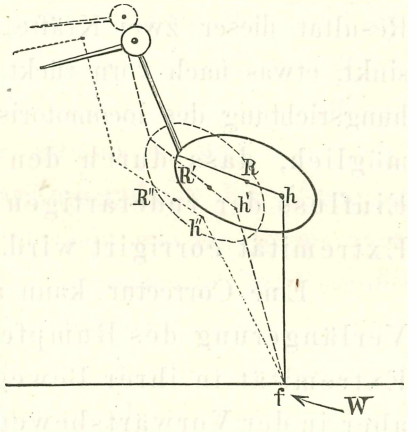
Die Ruderwirkung kann freilich auch von jeder Extremität mit gegliedertem Skelet vollzogen werden, sobald dieses in seinen Gelenken durch Muskelkräfte gefestigt werden kann. Dass bei der Schwimmbewegung der Wasserkäfer, der Vögel, bei der Bewegung der Brustflossen der Fische, bei den Flügelbewegungen fliegender Thiere und tauchender Vögel diese Analogie mit der Ruderbewegung besteht, erscheint wohl Jedem selbstverständlich, aber man hat bis jetzt offenbar gänzlich übersehen, dass auch beim Gang, Lauf und Sprung, kurz bei der Bewegung auf fester Oberfläche die Extremitäten oft im Ganzen wie Ruder gebraucht werden, so dass sich diese Art der Benutzung mit der Verkürzung und Verlängerung auf die mannigfaltigste Weise combinirt.

Bei den meisten vierbeinigen und zweibeinigen Landthieren werden die Extremitäten beim Gang, Sprung und Lauf annähernd in vertikalen, der Medianebene

parallelen Ebenen bewegt. Werden sie wirklich wie Ruder als starres Ganzes gegenüber dem Rumpfe nach hinten bewegt, so findet ihr unteres Ende einen wesentlich nach vorn gerichteten Widerstand, dessen Richtung nicht durch die Einlenkungsstelle der Extremität am Rumpfe, meist auch nicht einmal durch den Schwerpunkt des Körpers geht, sondern erheblich von ihm nach unten zu abliegt. Wohl wird die Gesammtmasse des Körpers dann gerade so vorwärts bewegt, als ob eine dem Widerstande an Grösse und Richtung entsprechende Kraft direkt auf die im Schwerpunkt concentrirt gedachte Masse einwirkte; ausserdem aber muss der Körper dabei so gedreht werden, dass sein vorderes Ende nach oben, sein hinteres nach unten rückt.

In Fig. 8 sei R der Schwerpunkt des Rumpfes in der Anfangslage, derjenige des locomotorisch thätigen Beines sei l, h = Hüftgelenk, f = Fusspunkt.

Fig. 7.



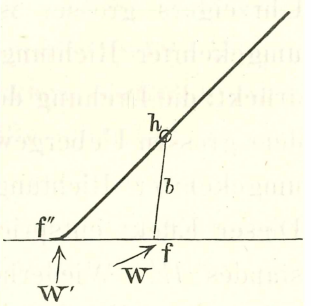
Die Wirkung einer Muskulatur, welche hinten am Hüftgelenk liegt und dasselbe streckt, wird darin bestehen, dass der Rumpf mit der Hüfte nach vorn sich bewegt, dabei aber um das Hüftgelenk so sich dreht, dass in Summa die Menge der Drehbewegung um den gemeinschaftlichen Schwerpunkt im Sinne des Uhrzeigers grösser ist als die der Drehbewegung in umgekehrter Richtung, oder praktisch fasslich ausgedrückt: die Drehung des Rumpfes im Hüftgelenk wird verhältnissmässig stark sein, trotz dem grossen Uebergewichte der Masse des Rumpfes gegenüber der viel geringern des in umgekehrter Richtung sich drehenden Beines; h gelangt nach h' und R nach R'. Dieser Effekt entspricht der Richtung und dem Angriffspunkte des erzeugten Widerstandes W. Wiederholen sich solche locomotorische Impulse, dann muss nothwendig zuletzt der Rumpf über das Hüftgelenk hinten überkippen, — vorausgesetzt, dass kein äusserer Einfluss als der Widerstand W in Frage kommt. Dies müsste die Fortdauer der Locomotion gefährden. In der Natur beobachten wir nun nichts derartiges. Ist dies ein Beweis dafür, dass die Annahme einer Ruderwirkung der Extremität unhaltbar ist, oder sind noch andere Einflüsse im Spiele, welche jener Drehung entgegen wirken?

Zunächst spielt die Schwere eine derartige Rolle. Nehmen wir an, es befinde sich während der locomotorischen Verwendung der Extremität der gemeinsame Körperschwerpunkt nach vorn von der Fussfläche f, so wird die Schwerkraft den Körper (der ja im Hüftgelenk gegenüber einer Configurationsänderung durch die

Schwere hinreichend durch die Wirksamkeit der Streckmuskeln gefestigt ist) über die Fussfläche *f* drehen und nach vorn umkippen machen zu derselben Zeit, in welcher die oben geschilderte locomotorische Configurationsänderung und Verschiebung vor sich geht. Das Resultat dieser zwei miteinander combinirten Bewegungen wird sein, dass die Hüfte mit dem Rumpfe noch mehr nach vorn geht, dass aber die schliessliche Orientirung des Rumpfes von der Anfangslage weniger verschieden ist, als wenn die Schwere nicht mitgewirkt hätte. (*h* gelangt nach *h''* und *R* nach *R''* Fig. 8). Neben der zuerst allein berücksichtigten äusseren Kraft des locomotorischen Widerstandes sind nämlich jetzt noch zwei andere in Betracht zu ziehen: die Schwerkraft und eine von ihr hervorgerufene zweite Widerstandskraft an der Fussfläche *f*. Das Resultat dieser zwei Kräfte für sich allein ist, dass der Körper im Ganzen etwas sinkt, etwas nach vorn rückt und in einer Richtung gedreht wird, welche der Drehungsrichtung des locomotorischen Widerstandes *W* entgegengesetzt ist. Es ist also möglich, dass durch den drehenden Einfluss der Schwere der drehende Einfluss der ruderartigen Aktion einer hinter dem Schwerpunkt gelegenen Extremität corrigirt wird.*)

Eine Correctur kann aber auch in einer zweiten Art stattfinden, wenn eine Verlängerung des Rumpfes hinter der locomotorischen Extremität in ihrer Bewegung gegen den Boden, nicht aber in der Vorwärtsbewegung gehemmt ist. Dieses Verhalten ist durch Figur 9 schematisirt. Hier wird durch die Drehung des Rumpfes um das Hüftgelenk *h* hinten bei *f'* ein senkrecht nach oben gerichteter Widerstand wachgerufen, der in ähnlicher Richtung der locomotorischen Drehung entgegenwirkt, wie im vorigen Falle die Schwere.

Fig. 8.



Ein solches Verhältniss ist z. B. beim Känguruh gegeben, wo der Schwanz am Boden schleift. Es kann sich aber auch eine gelenkig mit dem Rumpfe verbundene Stütze zwischen den hintern Theil des Körpers und den Boden hineinstellen. Wenn z. B. irgend ein vierfüssiges Landthier mit gut entwickelten vorderen Extremitäten diese letzteren kraftvoll ruderartig nach hinten bewegt, so wird durch den locomotorischen Widerstand allein dem Rumpfe eine Drehung

*) Es ist nur nothwendig, dass die Ausgleichung in periodischen Zeitabständen je einmal perfekt ist. So kann z. B. der Körper vorne über im Fallen begriffen sein, wenn die ruderartige Thätigkeit der Extremität beginnt; die Drehung wird dann aufgehoben, in die umgekehrte verwandelt und zuletzt kann die drehende Einwirkung der Schwere wieder das Uebergewicht bekommen.

ertheilt, bei welcher der Kopf nach oben, der Hinterleib nach unten geht; zugleich aber rückt der Rumpf vorwärts. Nun wird aber die Abwärtsbewegung des Hinterleibes durch die hintere Extremität gehemmt; auch wenn diese Extremität vollständig passiv sich verhält vermittelt sie einen aufwärtsgerichteten, die locomotorische Drehung verhindernden Widerstand; durch die Beweglichkeit des Hülfsgelenkes aber wird die Vorwärtsbewegung des Rumpfes gestattet.

Aehnlich ist der Fall, wenn wir ausschreitend mit beiden Füssen den Boden berühren und nun das Hüftgelenk des vorgesetzten Beines strecken, während am Hüftgelenke der andern Seite keine Muskelkraft wirkt.

Bei den vierfüssigen Landthieren, welche sich ihrer vorderen Extremitäten bei der Locomotion bedienen, zeigt sich vor allem aus, dass die letzteren sich nicht bedeutend, während sie auf den Boden aufgestellt sind, verlängern und verkürzen. Geringe Muskelkraft zur Fixirung genügt, damit sie als annähernd starre Stützen einen grossen Theil der Körperlast tragen. Wohl aber entwickelt, wie man sieht, die Beugemuskulatur des Schultergelenkes und die Streckmuskulatur des Ellbogens eine sehr energische Thätigkeit, welche das gesteifte Vorderbein wie ein Ruder nach hinten presst. Der Effekt dieser Thätigkeit muss in einer Vorbewegung des Rumpfes bestehen; zugleich wird der Hinterleib stärker auf das Hüftgelenk abwärtsgedrückt und der Druck der Hinterfüsse auf den Boden vermehrt. Die vordere Extremität dieser Quadrupeden hat daher eine grosse Bedeutung als Organ der Vorwärtsbewegung.

Jeder kann sich selbst zu einem erläuternden Versuche benutzen, indem er sich über eine Thürschwelle legt, die Arme beugt und sich vorn auf der Höhe der Oberarme gestützt hält. Drückt er nun die Ellbogen kraftvoll nach hinten, bei Gefahr des Ausgleitens gegen die Thürschwelle, so rutscht der Rumpf mit den Beinen nach vorn; die Beine schleifen über den Boden und drücken stärker gegen denselben, als bei ruhiger Haltung.

Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse im Grunde da, wo ein widerstehendes flüssiges Medium den drehenden Einfluss des locomotorischen Widerstandes aufhebt. Auch in flüssigen Medien wird nämlich der locomotorische Widerstand nicht immer so erzeugt, dass die drehenden Wirkungen beider Seiten sich aufheben. Ich denke dabei gar nicht an die Fälle, wo damit bezweckt wird, den Körpbr zu lenken, wie bei den seitlichen Wendungen der Vögel; ich steife mich auch nicht auf die Ruderbewegungen der Schwimmvögel, da ja Jedermann dieselben so gut wie die Ruderbewegungen vieler schwimmenden Säugethiere schon von sich aus mit der Bewegung

auf fester Erdfläche in nahe Beziehung bringen wird. Wohl aber muss ich auf ein bis jetzt gar nicht gewürdigtes Verhältniss im Fluge der Vögel aufmerksam machen.

Gesetzt der Fall, dass die Längslinie des Flügels beim Niederschlage annähernd einen Kegelmantel beschreibt um eine quere Linie, welche durch die beiden Schultergelenke geht, dann gleicht die Bewegung des Flügels in einzelnen Theilen der Radbewegung eines Dampfschiffes; die Richtung der Widerstandskräfte wird nicht durch die quere Verbindungslinie der Schultergelenke, welche die Axe der Raddrehung darstellt, gehen. Bei symmetrischen Apparaten und Kräften, und hierum handelt es sich in unserm Falle, heben sich nun, wie wir geschehen haben, diejenigen Componenten der Widerstandskräfte beider Seiten, welche der Medianebene parallel liegen, gegenseitig nicht auf, sondern summiren sich; sie stellen zusammen die resultirende Widerstandskraft dar, welche für die Grösse des locomotorischen Einflusses auf die Gesammtmasse massgebend ist. Nun kann zwar, auch wenn eine radartige Bewegung der Flügel in der oben erörterten Weise stattfindet, trotzdem die Richtung dieser Widerstandskraft im Durchschnitt oder während ihrer stärksten Wirkung durch den Schwerpunkt des Vogelkörpers gehen. Jedesmal aber, wenn die Flügel beim Niederschlage weiter nach vorn ausgreifen, liegt der Schwerpunkt nach hinten oder oben von dieser Richtung ab. Die Gesammtmasse wird dabei ganz ebenso gut nach vorn oben getrieben werden können; zugleich aber wird die locomotorische Thätigkeit den Körper im Ganzen rückwärts drehen. Wie kann ein solcher drehender Einfluss corrigirt werden?

Die Schwere könnte nur dann hiezu dienlich sein, wenn der Schwerpunkt in der Zeit, während die Flügel sich auf die Luft stützen, nach vorn von den mittleren Stützpunkten läge, und dies ist durchschnittlich nicht der Fall; eher gilt das Gegentheil für die von uns hier im Auge gefassten Fälle, in denen der Flügel beim Niederschlage zunächst sehr deutlich nach vorn und unten geht. Wohl aber kann der Luftwiderstand, welchen der ganze Vogelkörper bei seiner Vorwärtsbewegung erfährt, jene Drehung hintanhalten unter der Bedingung, dass er auf den unterhalb des Schwerpunktes gelegenen Theil der vorausbewegten Körperoberfläche stärker wirkt, als auf den oberen Abschnitt. Da nun der breiteste Theil der Unterfläche durch den Rumpf und den Schwanz gebildet wird und der Schwerpunkt über dem vorderen Theile dieses Abschnittes liegt, so genügt es, diese Unterfläche mehr nach vorn zu drehen, um diese postulirte Wirkung des Luftwiderstandes mehr hervortreten zu lassen. Wir beobachten auch wirklich, dass z. B. die Enten, welche den ersten

Theil des Niederschlages deutlich nach vorn unten ausführen, die Längs-Axe des Körpers beim Fluge relativ stark senkrecht gestellt haben.

Bei den rudernden Schwimmvögeln müssen ebenfalls diese beiden Momente berücksichtigt werden, wenn man sich die Verhinderung einer fortdauernden locomotorischen Drehung in derselben Richtung erklären will. Erstens könnte eine Lage des Schwerpunktes vor der mittleren Lage der stemmenden Fussflächen in Betracht kommen, sobald man wenigstens annimmt, dass der Körper bei der Aktion zunächst etwas über das Niveau, bis zu dem er in der Ruhe eintaucht, emporgehoben wird. Zweitens, und das ist es wohl, was in Wirklichkeit stattfindet, muss jede Drehung, bei welcher das vordere Leibesende sich hebt, das hintere tiefer ins Wasser gesenkt wird, den Widerstand des Wassers auf den unterhalb des Schwerpunktes gelegenen Abschnitt des Leibes vermehren. So wird sich durch eine Art von Selbstregulation eine neue Orientirung der Körperaxe einstellen, bei welcher sich die drehenden Einflüsse der locomotorischen Thätigkeit und des Widerstandes gegen die voranbewegte Fläche des Leibes das Gleichgewicht halten.

Ganz dasselbe geschieht beim Rudern im Kahn. Die Ruder, welche im vorderen Theile des Schiffes angebracht sind, heben bei ihrer Thätigkeit den Vordertheil des Schiffes in die Höhe. Diese Drehung des Schiffes bezieht sich auf die ganze mittlere Lage der Längsrichtung während der Locomotion, sie geht aber nicht über ein gewisses Maximum hinaus, bei welchem die umgekehrt wirkenden, drehenden Einflüsse des locomotorischen Impulses einerseits, des Widerstandes gegen die vorbewegte Unterfläche des Schiffes andererseits sich das Gleichgewicht halten.

Herr H. Meyer*) hat in scharfsinniger Weise auseinandergesetzt, wie die Lage der Stützpunkte der Ruder vor dem Schwerpunkte des Systemes die Bedingung ist, unter der einzig bei der Aktion eine Regulation hinsichtlich der seitlich drehenden Einflüsse durch den Widerstand der Vorwärtsbewegung möglich ist. Was für die Horizontalebene gilt, das gilt auch für die Drehungen in der vertikalen, sofern die Schwere keine wesentliche Rolle spielt. Erst wo letzteres der Fall ist, sehen wir in vielen Fällen, dass die Stellen, an denen der wesentliche locomotorische Widerstand erzeugt wird, nach hinten von dem Körperschwerpunkte gelegen sind.

Wir haben also gefunden, dass die Ruderwirkung derjenigen Extremitäten, die in vertikalen Ebenen um quere Axen sich bewegen, nothwendig mit einer Dre-

*) H. Meyer, Statik und Mechanik, pag. 78.

hung des Körpers verbunden ist, welche den Fortgang der locomotorischen Thätigkeit gefährdet, dass es aber äussere Einflüsse giebt, welche dieser Drehung entgegenwirken können. So dürfen wir eine Ruderwirkung auch da nicht von vornherein läugnen, wo eine derartige drehende Nebenwirkung nicht ohne weiteres ersichtlich ist. Machen wir aber die Beobachtung, dass die Schwere bei der Locomotion den Körper nothwendig vornüber drehen muss, oder dass das Hintertheil des Thieres bei der Locomotion wirklich einen starken Widerstand von vorn oder einen Druck von unten her erfährt, und dass trotzdem die richtige durchschnittliche Orientirung des Thierkörpers erhalten bleibt, so sind wir geradezu berechtigt zu schliessen, dass der locomotorische Widerstand in seiner Richtung nach vorn oben nicht durch den gemeinsamen Schwerpunkt geht, sondern unten an ihm vorbei zielt.

Beim Känguruh, wenn es seine langen Sprünge macht, scheint mir sowohl der Schwerpunkt des Körpers zumeist vor den stemmenden Füssen zu liegen, als auch zugleich das Schwanzende gegen den Boden gedrückt zu werden. Der Widerstand, der an den Enden des Fusses entwickelt wird, kann also dabei nich direkt gegen den Schwerpunkt gerichtet sein.

Wenn Vögel schnell dahin rennen wie die Hühner, Kraniche, Störche und namentlich wie die Strausse, so beginnt der wesentliche Theil der Aktion ihres Beines, soweit Beobachtungen der Natur und von Abbildungen lehren, in dem Augenblicke, in welchem die Zehen senkrecht unter dem Knie stehen, und dauert fort, während dieselben unter der Hüfte vorbei nach hinten rücken. Dabei ist der Körper nur an der Seite des stemmenden Beines mit dem Boden in Berührung. Hier muss also die Schwere während der locomotorischen Aktion einen nach vorn drehenden Einfluss haben und es kann auch hier der Widerstand nicht schräg auf- und vorwärts gegen den Schwerpunkt, sondern er muss mehr direkt nach vorn gerichtet sein.

Wenn wir mit beiden Beinen abspringend einen sehr weiten Sprung nach vorn thun wollen, dann lassen wir uns zu allererst vorn überfallen.

Die dadurch herbeigeführte Drehung wird durch den Absprung rückgängig gemacht, ja wir dürfen ziemlich stark nach der umgekehrten Richtung zurückgedreht anlangen, weil der Aufsprung selbst seinerseits wieder eine Correktur der Stellung herbeiführt. Kein Zweifel daher, dass der locomotorische Widerstand bei einem solchen Sprunge durchaus nicht nach dem Schwerpunkte hinzielt, sondern fast horizontal nach vorn gerichtet ist.

Es bildet eine der Grundlagen der Theorie, welche die Gebüdrer Weber über den Gang Lauf und Sprung des Menschen aufgestellt haben, dass die locomo-

torischen Kräfte bei allen diesen Bewegungen in einer Linie wirken, welche von dem stemmenden Fusse zum Schwerpunkte geht. Aus unserer obigen Auseinandersetzung ergiebt sich aber, dass diese Voraussetzung mindestens für den Eil- und Sprunglauf unmöglich zu treffen kann, ja nicht einmal für das schnellste Gehen zu Recht besteht. Beim schnellsten Gehen steht das Hüftgelenk nie nach hinten von dem auf den Boden gesetzten Fusse, höchstens senkrecht über demselben, der Schwerpunkt aber liegt im Durchschnitt nach vorn von ihm. Man kann auch leicht berechnen, dass der Luftwiderstand für gewöhnlich nicht gross genug ist, um das Ueberfallen auch eines viel weniger stark nach vorn geneigten Körpers nach vorn verhindern zu können.

Man erkennt, wie in allen diesen Fällen dieselben verschiedenen Momente, die es ermöglichen, dass der locomotorische Impuls, statt gegen den Schwerpunkt zu wirken, mehr direkt nach vorn gerichtet sein kann, auch zugleich einen Ausschlag zu Gunsten einer grösseren Vorwärtsgeschwindigkeit bewirken müssen.

Wir gewinnen also mit Bezug auf die Richtung des locomotorischen Widerstandes einen nicht unwichtigen Anhaltspunkt durch Ueberlegungen der obern angedeuteten Art; wir erkennen, dass der locomotorische Widerstand sehr häufig nicht in der Richtung vom Fusse zum Schwerpunkt wirken kann, sondern unter ihm vorbei nach vorn und oben zielt. Halten wir uns nun an die Fälle, in denen die hintere Extremität wesentlich der Locomotion vorsteht, so bemerken wir, dass ganz allgemein das Hüftgelenk der stemmenden Seite nach hinten vom Schwerpunkte liegt. Es kann also unmöglich die Richtung des locomotorischen Widerstandes oder der locomotorischen Kraft mit der Längslinie der Extremität zusammenfallen, beide können nicht durch eine einfache Streckung der Extremität erzeugt sein.

Wohl aber kann es sich um eine Combination zwischen einer einfachen Streckung und zwischen einer Ruderbewegung der Extremität durch Aktion der Hüftmuskeln oder gar um die alleinige Ruderwirkung handeln.

Wir werden weiter unten noch genauer nachzuweisen suchen, dass gerade die Aktion der Hüftmuskeln wirklich eine grosse Rolle spielt. Leichter nun, als für die hintere Extremität, wird uns schon an und für sich bei der vorderen der Nachweis, dass durch die Thätigkeit der Muskeln des Schultergelenkes die Extremität als Ganzes wie ein Ruder bewegt wird, und dass die ganze Körpermasse bewegt wird, wenn die Extremität in ihrer Ruderbewegung durch einen äussern Widerstand gehemmt ist. Die Analogie zwischen der Ruderbewegung einerseits und der locomotorischen Verwendung der vorderen Extremität zum Fliegen und Tauchen wie bei den Vögeln, zum

Graben wie bei den Maulwürfen etc., zu den mannigfaltigsten vom Menschen selbst ausgeführten Operationen, bei welchen die obere Extremität als Ganzes durch die Schultermuskeln bewegt wird (Schwimmen und Turnen), — diese Analogie liegt zu sehr auf der Hand, als dass sie übersehen werden könnte. Aber dieselbe dehnt sich auch auf die Thätigkeit der vorderen Extremitäten beim Gang, Lauf und Sprung der vierfüssigen Landthiere aus und dies wird kaum fraglich bleiben können, wenn uns das Schwerere gelungen sein wird, für diese Bewegungsformen bei den hintern Extremitäten eine Ruderwirkung nachzuweisen.

Wir können es jedenfalls als gesichert betrachten, dass die Extremitäten nicht bloss durch einfache Verlängerung oder Verkürzung, sondern auch im Ganzen als Ruder wirken; aber damit ist der ganze Umfang ihrer Verwendbarkeit noch nicht erschöpft.

Soll das ganze Glied durch Verlängerung oder Verkürzung genau in seiner Längslinie locomotorisch wirken, dann muss im Allgemeinen immer gleichzeitig an mehreren Gelenken Aktion stattfinden. Nur ein bestimmter Kreis von Combinationen kann in gleicher Weise diesem Postulate genügen. Geht man nun von einer dieser Combinationen aus und denkt sich die Aktion an einem einzelnen Gelenke verstärkt, so wird dadurch die Grösse und Richtung des Widerstandes im Allgemeinen geändert; die Richtung des locomotorischen Impulses wird nunmehr mit der Längslinie des Gliedes divergiren. Die Muskelaktion nämlich, welche zur Streckung eines einzelnen Gelenkes der Extremität dient, ruft mit dem distal vom Gelenke gelegenen Endabschnitte derselben an der Unterlage einen Widerstand hervor, welcher im Allgemeinen nicht in der Längslinie dieses Endabschnittes wirkt, sondern schräg gegen dieselbe und gegen das Gelenk hin gerichtet ist.

Daraus folgt, dass auch durch die Thätigkeit der Extremität selbst ohne Mitwirkung der Hüftgelenkmuskulatur Widerstände hervorgerufen werden können, deren Richtung mit der Längslinie der Extrimität divergirt.

Man denke sich ferner den Oberschenkel mit dem Rumpfe starr verbunden, so verhält sich nun der Unterschenkel zu diesem Complexe ganz ähnlich, wie sich vorher das im Hüftgelenke bewegliche Bein zum Rumpfe verhalten hat. Die Muskulatur des Kniegelenkes wird jetzt auf den Endabschnitt des Beines wie auf ein Ruder wirken; ist endlich auch der Unterschenkel gegenüber dem Rumpfe fixirt, so kann der Fuss durch die Muskeln des Fussgelenkes als Ruder bewegt werden.

VIII.

Einige Sätze über den locomotorischen Effekt der Aktion an den Gelenken der hinteren (unteren) Extremität. Bedeutung der Ferse. — Locomotorische Kräfte beim Gange. Fünf Perioden in der Aktion des aufgesetzten Beines; Kräfte am Fuss- und Kniegelenk. — Schema einer einfachen periodischen Bewegung durch Ablenkung der Fallbewegung und Wirkung einer hebenden locomotorischen Kraft. Treibende Momente beim Gang: abgelenkte Fallbewegung, Kniestreckung; Streckung des zurückgestellten Beines im Fussgelenk; Streckung des Hüftgelenkes. — Thatsachen der Aktion der Hüftstrecker; Richtung der locomotorischen Einwirkung. Correktion der Drehung. — Mitwirkung der Hüftstrecker zur Hebung des Körpers; sie leisten Arbeit am Knie- und Fussgelenk.

Die Richtung und Grösse des locomotorischen Widerstandes bei der Thätigkeit eines einzelnen oder mehrerer Gelenke für die verschiedensten Stellungen des Körpers und für alle möglichen Beziehungen zur Aussenwelt ableiten zu können, dabei zugleich Einsicht in das Getriebe der innern Wechselwirkungen zu haben, die Grösse und Richtung des Druckes und Gegendruckes, sowie der stattfindenden Bewegungen an den Gelenkstellen zu kennen und die Kräfte, welche jede einzelne Partialmasse beeinflussen, zu übersehen — dies muss offenbar ein erstrebenswerthes Ziel für denjenigen sein, welcher die mechanischen Probleme der activen Locomotion allgemeiner gefasst und behandelt wissen möchte. Wir sind aber noch weit davon entfernt, eine genaue Analyse dieser Verhältnisse geben zu können. Ich will mich darauf beschränken, einige wenige spezielle Angaben über die Gelenke der hintern resp. untern Extremität zu machen, welche sich durch einfache Ueberlegungen ableiten und durch einfache Versuche bestätigen lassen und welche für die Theorie des Ganges, Laufes und Sprunges von einiger Wichtigkeit sind.

1. Contraktion der Streckmuskeln des Hüftgelenkes bei den gewöhnlichen Stellungen des Menschen und der Landthiere bewirkt, wenn die Rückbewegung des Knies oder Fusses gehemmt ist, dass die Hüfte im Bogen nach vorn geht. Der Rumpf dreht sich über dem Hüftgelenke zurück; die Hüfte wird nach vorn durchgedrückt. Der gemeinsame Schwerpunkt bewegt sich vorwärts.

Die Wirkung der Beugemuskeln ist eine entgegengesetzte.

2. In den gewöhnlichen Fällen, wenn der Unterschenkel seine Richtung durch Bewegung im Fussgelenk oder Drehung mit dem Fusse über den Boden ändern kann, bewirkt Contraktion der Streckmuskeln des Knies, dass der Rumpf vom Fusse entfernt wird. Das Knie wird nach hinten durchgedrückt; der Körperschwerpunkt bewegt sich aufwärts und rückwärts. Ist das Hüftgelenk dabei nicht fixirt, so kann eine passive Stellungsänderung in demselsen erfolgen (Beugung).

3. Wenn wir vollständig niederknieen oder wenn überhaupt das Knie wenig nach oben, viel nach vorn vom Fusse liegt, so wird bei der Streckung des Knies der Fuss nach hinten unten gedrückt, der Körperschwerpunkt erhält einen Impuls

nach vorn oben, das Knie wird vom Boden ab nach oben und hinten gehoben oder es wird doch mindestens, wenn die Schwere alle diese Erscheinungen und vor allem die Bewegung des Knies modificirt, der Druck des Knies auf den Boden vermindert.

4. Beugung des Kniegelenkes wirkt namentlich locomotorisch bei horizontaler Lage des Oberschenkels und vorgestrektem oder senkrecht stehendem Unterschenkel, einer Stellung, wie wir sie beim Sitzen oder Hocken einnehmen. Auch wenn die Kniebeuge mehr direkt nach hinten sieht, kann bei nur wenig energischer Beugeanstrengung, indem durch die Mitwirkung der Schwere die Entfernung des Fusses vom Boden verhindert wird, ein nach vorn gerichteter Widerstand erzeugt werden. Der Körper wird durch eine solche Aktion nach vorn bewegt. Durch Beugungen des Kniegelenkes treiben sich die Knaben auf ihren Schlitten vorwärts, wo die Neigung der Schlittenbahn gering ist.

5. Ueberall, wo der Fuss einer deutlichen Ferse entbehrt, wirkt am Fussgelenk wesentlich nur die Streckung locomotorisch. Wo der Fuss dem Boden der Länge nach aufliegt, wird im Allgemeinen durch Streckung des Fussgelenkes ein Widerstand an der Spitze des Fusses erzeugt, der nach oben und hinten gerichtet ist. Der Druck des hinteren Endes des Fusses auf die Unterlage mindert sich, ja das Fussgelenk kann trotz der Schwere des auf ihm lastenden Körpers bei energischer Aktion vom Boden abgehoben werden; der Körperschwerpunkt erhält einen Impuls nach oben und hinten. Nur wenn das Knie und der ganze Körperschwerpunkt erheblich weit nach vorn rücken, kann Streckung des Fussgelenkes einen nach vorn oben gerichteten Widerstand erzeugen. Beim Menschen (das Vorhandensein einer Ferse ist dabei von keinem Einfluss) kann der Körperschwerpunkt noch ein erhebliches Stück vor dem vorderen Ende der stützenden Fussfläche liegen, während er doch noch durch Streckung des Fusses einen Impuls nach hinten erhält.

Ist das Fussgelenk aber schon vom Boden abgehoben, der Fuss selbst steil gegen den Boden gerichtet, so bewirkt weitere Streckung des Fussgelenkes schon bei weniger weit nach vorn gerücktem Knie einen Widerstand, der nach vorn oben gerichtet ist und meist nach vorn von dem Hüftgelenke, ja dem Körperschwerpunkte vorbei zielt.

6. Wenn der Fuss nur vorn den Boden berührt, so kann die Contraction der Beugemuskulatur des Fussgelenkes nur durch die Mitwirkung der Schwere bewirken, dass die Spitze des Fusses einen nach vorn gerichteten Druck auf den Boden ausübt, welcher den ganzen Körper zurücktreibt. Sobald die Aktion irgend wie energisch würde, müsste die Fussspitze vom Boden sich abheben. Wohl aber ermöglicht

der Umstand, dass bei der Aktion der Beugemuskeln das Fussgelenk nach hinten ausweicht, die Erzeugung eines nach vorn oben gerichteten Widerstandes dann, wenn die Ferse dem Boden aufliegt. Von Nutzen für diese Wirkung ist die stärkere Entwickelung der Ferse. Die Beugemuskulatur wirkt nämlich genau wie eine Kraft, welche den Fersenhöcker vom Unterschenkel oder Knie wegtreibt. Bei energischer Aktion wird zwar auch hier die Fusspitze gehoben, dafür aber drückt hinten die Ferse um so stärker gegen den Boden. Die Ferse ist eine wunderbare Einrichtung, welche aus dem Fusse einen Winkelhebel macht und dem Menschen bei dem gewöhnlichen Stande auf der Sohle die Möglichkeit giebt, nach Belieben durch Aktion der Wadenmuskeln den Körper zurück-, durch Aktion der Beugemuskeln des Fussgelenkes den Körper über den Fuss vorwärts zu drehen. Der locomotorische Impuls der Beugemuskeln wirkt aber wesentlich nur dann nach vorn, wenn Knie und Körperschwerpunkt direkt über oder vor der Ferse liegen; am weiter vorgestellten Fusse erfolgt bei der Beugung entsprechend dem gegen die Ferse gerichteten Widerstande ein Impuls nach oben, ja nach hinten und oben*).

Die Gebrüder Weber haben angenommen, dass beim Menschen die locomotorische Kraft der Beine, die sie Streckkraft nennen, stets annähernd vom Fusse zum Schwerpunkt oder auch annähernd in einer geraden Linie vom Fusse zum Hüftgelenke (Borelli) gerichtet sei. Neuere Autoren haben festzustellen gesucht, in welcher Weise die Muskulatur der verschiedenen Gelenke jeweilen betheiligt sei, ja es wurde sogar der Versuch gemacht, diese Leistung genauer physikalisch zu bestimmen. Aber hiebei wurde der Fehler begangen, dass das ganze distale Ende der Extremität zwischen dem Gelenke, dessen Muskulatur Gegenstand der Betrachtung war, und dem äusseren Widerstande als fixirt angenommen wurde; nur der proximale Gelenkkörper und der proximal an ihn sich schliessende übrige Körper galt als beweglich.

---

*) Man kann diese Verhältnisse durch Versuche an sich selbst prüfen. Dabei ist zu beachten:

1. dass man es durch andauernde Uebung wohl dazu bringen kann, die Muskulatur irgend einer bestimmten Seite eines Gelenkes für sich allein in Thätigkeit zu setzen;

2. dass man dem modificirenden Einfluss der Schwere Rechnung zu tragen hat.

Stehe ich voll auf einem Fuss und contrahire ich meine Wadenmuskeln, so sinkt mein Körper hinten über; dies wäre aber an und für sich noch kein Beweis, dass ein locomotorischer Impuls nach hinten erfolgt ist; denn die Ferse ist gehoben worden und deswegen liegt jetzt mit einem Male der vorher unterstützte Schwerpunkt hinter der Unterstützungsfläche, welche nur noch durch die Spitze des Fusses gebildet ist. Stellen wir uns aber von vornherein so, dass der Schwerpunkt über den Zehen liegt, so fällt dieser Uebelstand weg. Geht jetzt bei der Aktion der Schwerpunkt nach hinten, so ist dies die Folge des locomotorischen Impulses.

So liegen aber in Wirklichkeit die Verhältnisse selten. Mitunter bleibt etwa bei der Aktion im Fussgelenke der Fuss in seiner Lage und Richtung, noch seltener der Unterschenkel, wenn Aktion im Kniegelenke stattfindet. Meist aber hebt sich zugleich die Ferse und geht das Knie vor- oder rückwärts nnd bei der Contraktion der Hüftgelenkmuskeln ist eine Lage- und Stellungsänderung des femur oder des ganzen Beines das Gewöhnliche.

Wenn wir den im letzten Abschnitte erörterten Verhältnissen gehörig Rechnung tragen, so gewinnen wir ein genaueres Verständniss der Kraftwirkungen bei der locomotorischen Thätigkeit. Ich will mich aber wesentlich darauf beschränken, das Gewonnene auf einige der gewöhnlichsten Bewegungen des Menschen anzuwenden.

Fassen wir zunächst den gewöhnlichen Gang ins Auge. Ich nehme an, dass die Folge der sichtbaren Erscheinungen, wie sie von den Gebrüdern Weber, von Meyer, Carlet und andern Forschern beobachtet und analysirt worden ist, genügend sicher und genügend bekannt ist.

1. Wenn das zuletzt vorgeführte Bein vorn auf den Boden gesetzt wird, so liegt zunächst der Körperschwerpunkt noch hinter der Fusssohle; er muss im Bogen nach vorn aufsteigen, um schliesslich von der Sohle annähernd unterstützt zu sein (hinterer Ergänzungsbogen H. Meyer). Diese Verschiebung wird nach H. Meyer bewirkt durch das Stemmen des zurückgestellten Beines; unterstützend können nach ihm wirken die Dorsalbeuger des Fussgelenkes*). Nun giebt aber diejenige Stellung, bei welcher der Körperschwerpunkt senkrecht über der Ferse steht, beinahe schon die hinterste Lage für diesen und für das Knie, bei welcher überhaupt noch die Beugung des Fussgelenkes einen locomotorischen Impuls nach vorn erzeugen kann. Aus diesem Grunde scheint die Mitwirkung der Dorsalbeuger nicht wahrscheinlich. Ferner zeigt der Versuch, beim Gehen im Momente, wo man den Fuss aufsetzt, die Ferse gegen den Boden zu drücken und die Fusspitze zu heben, dass eine solche Aktion nicht in Harmonie zu dem steht, was im Gewöhnlichen stattfindet. — Während dieser Ergänzungsbogen beschrieben wird, dreht sich allerdings der Unterschenkel im Fussgelenke nach vorn; aber diese Drehung muss, so weit es die Muskulatur des Fussgelenkes betrifft, wohl als eine passive aufgefasst werden. Während sie stattfindet, biegt sich zugleich das Knie bis zu einem Maximum.

2. Als zweite Periode können wir die kurze Spanne Zeit bezeichnen, in

*) G. H. Meyer, Statik und Mechanik. Leipzig 1873 pag. 308.

welcher das Knie annähernd wieder gestreckt wird. Von einer Wirkung der Beugemuskeln des Fussgelenkes kann deshalb kaum die Rede sein, weil das Knie gegenüber dem Fusse faktisch nach hinten rückt.

3. Erst in der folgenden Periode, welche so lange dauert, bis der Körperschwerpunkt über die Fussspitze des Standbeines hinaus nach vorn gerückt ist, ist die Möglichkeit gegeben, dass die Fussbeuger wirken und zwar mit locomotorischem Nutzen wirken können.

4. Ist der Körperschwerpunkt über die Länge des Fusses nach vorn gerückt, dann erst kann die Streckmuskulatur des Fusses vorwärtstreibend wirken. Wirklich beginnt sie erst jetzt ihre Thätigkeit, zunächst so, dass der Fuss gegenüber dem Unterschenkel fixirt wird und sich wie der Fuss einer Wiege vom Boden abrollt. Alsbald aber wird der Winkel der Fussbeuge vergrössert und die Ferse noch mehr gehoben; die Streckmuskeln müssen dabei eine bedeutende Anstrengung machen, weil in diesem Momente das Bein dieser Seite in sich und gegenüber dem Rumpfe noch annähernd starr ist und mit einem grossen Theile des Körpergewichtes auf dem Fussgelenke lastet.

5. Es folgt eine fünfte Periode, in welchem die Körperlast dem andern Beine zum grösseren Theile überlassen ist. Das bisher in Betracht gezogene Bein beginnt seine pendelartige Vorwärtsbewegung und zwar unter Mitwirkung von Muskelkräften. Zunächst wird der Oberschenkel — durch Mitwirkung der Beugemuskeln der Hüfte, wie schon Duchenne wahrscheinlich gemacht hat — vorgeführt. Diese Bewegung beginnt, während die Spitze des Fusses noch mit dem Boden Fühlung hat. Man bemerkt, dass in diesem Momente die Streckung des Fussgelenkes mit grosser Geschwindigkeit vor sich geht; dies ist deshalb möglich, weil der Widerstand, der von oben her der Streckung entgegensteht, geringer geworden ist: das Bein ist nicht mehr gesteift, das Knie kann nach vorn ausweichen. Die Streckung des Fussgelenkes, zuletzt der Zehengelenke giebt dem unteren Ende des Oberschenkels annähernd in der Richtung des Unterschenkels einen Impuls, welcher sehr geeignet ist, die Drehung des Beines im Hüftgelenke und seine Vorführung zu begünstigen. Es ist möglich, dass Gerdy diese Aktion gemeint hat, indem er sagte, dass ein Stoss, den das Bein sich selber ertheile, zu seiner Vorführung mitwirke.*) Diese Mitwirkung kann von uns nach Belieben verstärkt oder vermindert werden.

*) W. und E. Weber, Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Göttingen 1836. (pg. 412).

Eine Anstrengung der Fussgelenkbeuger könnte also für die Locomotion ernstlich in Frage kommen höchstens in der dritten Periode; man kann in derselben willkürlich die Ferse stärker an den Boden drücken, während im nächsten Augenblicke der Zehenballen stärker auf die Unterlage gepresst wird. Die Fussspitze hebt sich bei einer Aktion der ersten Art leicht vom Boden etwas ab; die Ausführung ist uns unstreitig ziemlich unbequem und ich glaube nicht, dass wir eine solche Anstrengung der Fussgelenkbeuger für gewöhnlich benutzen, auch nicht einmal beim gravitätischen Gange.

In der ersten Aktionsperiode vollzieht sich eine Beugung des Kniegelenkes, in der zweiten Periode folgt die Streckung. Nur in besonderen Fällen, wo die Aktion des Kniestrecker besonders ausgeprägt ist, so bei der gewöhnlichen Gangart vieler Bergbewohner, ist diese Streckbewegung von längerer Dauer; sie ist dann kaum beendet, während die Ferse schon den Boden verlässt. Wir bemerken, dass die Streckmuskeln des Knies, in Sonderheit der Rectus femoris schon in der ersten Aktionsperiode in Spannung gerathen und dass diese Spannung im selben Momente nachlässt, in welchem die Streckung des Knies vollendet ist. Es ist daher nicht zu bezweifeln, dass diese Muskelspannung ganz ähnlich derjenigen einer Sprungfeder dazu dient, das Einknicken des femur gegen den Unterschenkel zu hemmen, die Bewegung, welche die Hüfte dem Fusse nähert, allmählig zu anulliren und in die umgekehrte Bewegung umzuwandeln (1. u. 2. Periode). Die Vorwärtsbewegung der Hüfte und des Rumpfes wird in der ersten Periode durch das schräg vorgestellte Bein gehemmt, obschon dasselbe nicht vollkommen starr ist, sondern, einem Federapparate gleich, elastisch einknickt, und obschon das Bein mit seinem oberen Ende vorwärts getrieben und über den Fuss gedreht werden kann. Aber auch die Wiederausdehnung der zusammengedrückten Säule vermindert nochmals die Vorwärtsgeschwindigkeit und verlangsamt die Drehung des Beines über den Fuss. Erst bei viel stärkerer Vorbeugung des Körpers, als dies beim Gange vorkommt, würde die Streckung des Knies einen nach vorn gerichteten locomotorischen Impuls bewirken.

Wodurch wird nun aber der Verlust an Vorwärtsgeschwindigkeit wieder ersetzt? Wie kommt überhaupt die periodische Aktion der Gangbewegung zu Stande? Von den Momenten, welche nach H. Meyer (pag. 310 u. 311 seiner Statik und Mechanik) als die Triebkräfte bei der Ausführung des „Hauptbogens“ angesehen werden können, stehen zwei, der Einfluss der Schwere und die stemmende Wirkung des zurückgestellten Beines, ausser Beziehung zu der Aktion an den Gelenken desjenigen Beines, welches den Hauptbogen ausführt. Als drittes Moment wird angeführt: eine Thätig-

keit der Muskeln des Kniegelenkes und des Fussgelenkes in verschiedener Kombination. Von einer Möglichkeit, dass die Hüftgelenkmuskulatur mitwirkt, wird nicht gesprochen.

Erläutern wird zunächst die allgemeinen Verhältnisse des Ganges durch den Vergleich mit dem Fluge einer Schwalbe. Dieser Vogel fällt auf der schrägen Ebene seiner Flügel in schräger Richtung, erwirbt dahei eine Vorwärtsgeschwindigkeit und steigt vermittelst derselben wieder in die Höhe, zuletzt in fast senkrechter Richtung. Doch erreicht er in Folge verschiedener unterwegs erlittener eigentlicher Verluste von Bewegungsmenge das frühere Niveau vermöge der beim Falle erworbenen Geschwindigkeit nicht wieder. Es muss zuletzt eine hebende locomotorische Thätigkeit des Körpers einsetzen, welche für die Verluste Ersatz bringt und den Körper um das fehlende Stück noch in die Höhe hebt. Diese hebende locomotorische Kraft kann zugleich noch die Vorwärtsgeschwindigkeit vollkommen anulliren, also nach hinten und oben gerichtet sein, und trotzdem wird sich nun von Neuem eine Aktionsperiode abspielen können. So bewegt sich der Vogel mit periodisch schwankender, aber constanter mittlerer Geschwindigkeit vorwärts; er oscillirt in verticaler Richtung um eine mittlere, sich gleich bleibende Höhe, und das Alles allem Anscheine nach nur vermöge der einzigen locomotorischen Anstrengung, welche seinen Körper am Ende jeder Periode nach oben und hinten treibt.

Die Verhältnisse beim Gang lassen sich hiermit sehr leicht in Parallele stellen durch folgende Momente: Ablenkung der Fallbewegung des Rumpfes in eine andere Richtung, in eine schräge Bewegung an dem oberen Ende einer über einem Punkte des Bodens vorwärts sich drehenden, annähernd starren Leitstange; Unmöglichkeit, ohne besondern activen, locomotorischen Impuls an einer zweiten Leitstange bis zur maximalen Höhe, der ursprünglich eingenommenen, wieder emporzusteigen. Es liegt nun nahe, anzunehmen, dass gerade die Streckung des Kniegelenkes der locomotorische Akt ist, welcher den Körper in die nothwendige Höhe emporhebt, indem er dabei vielleicht einen Theil der vom Körper erworbenen Vorwärtsgeschwindigkeit vernichtet. Wäre dies die einzige active, locomotorische Thätigkeit beim Gang, dann wäre die Analogie mit dem oben geschilderten Verhalten der Schwalbe vollkommen. Das einzig vorwärts treibende Moment wäre dann, um mich so auszudrücken, der Widerstand, der beim Vornüberfallen des als Leitstange dienenden Beines den Fuss am Ausweichen nach hinten hindert, oder mit andern Worten die Schwere. Die Streckung des Kniegelenkes wäre, weil durch organische

Kräfte des Körpers bewirkt, im Gegensatze hierzu als das active locomortorische Prinzip beim Gang zu bezeichnen. Seine Wirkung geht im Allgemeinen nach oben.

Nehmen wir an, dass in der zweiten Aktionsperiode die Strecker des Fussgelenkes sich mit den Streckern des Kniegelenkes in der Wirkung combiniren, was thatsächlich nicht der Fall ist, so würde dieses locomotorische Prinzip etwas mehr nach oben und hinten wirken, und nehmen wir an, dass eine Combination der Wirkung der Kniestrecker mit derjenigen der Dorsalbeuger des Fusses stattfindet, was ebenfalls nicht wahrscheinlich ist, so würde der locomotorische Impuls etwas mehr nach vorn oben gerichtet sein.

Es wäre also a priori denkbar, dass durch diese zwei Momente allein eine geregelte Gangbewegung zu Stande kommen könnte, vorausgesetzt dass wir von dem Mechanismus der Vorführung des freien Beines absehen. Einzig die Drehung des Körpers durch die Schwere wäre ein bedenklicher Uebelstand, der nothwendig auf irgend eine Weise corrigirt werden müsste.

In Wirklichkeit gesellt sich nun zu der Kniestreckung und zu der Wirkung der Schwere jedenfalls noch ein drittes Moment: der Impuls, der von der Verlängerung des zurückgestellten, stemmenden Beines herrührt, und dieses Moment unterstützt ebensowohl die Vorwärtsbewegung als die Hebung des Körpers; seine Wirkung ist am stärksten im Momente, wo das andere Bein vorn auf den Boden aufgesetzt wird. Wenn die zwei ersten Momente für sich allein eine geordnete Gehbewegung zu unterhalten vermöchten, so ist dies natürlich um so besser möglich, wenn alle die drei von H. Meyer angeführten Momente zusammen wirken: die Schwere, die Streckung am Kniegelenke des Beines, das den Hauptbogen ausführt, und die Streckung des zurückgestellten Beines. Es ist auch klar, dass die Einknickung und Streckung des Knies weniger umfänglich zu sein braucht, wenn das letzte der drei Momente erheblich mitwirkt. Diese drei Momente sind thatsächlich alle miteinander von Bedeutung, aber sie sind es nicht allein; der drehende Einfluss der Schwere ist z. B. durch ihr Zusammenwirken noch immer nicht corrigirt. Von der allergrössten Bedeutung ist meiner Ansicht nach die Streckmuskulatur des Hüftgelenkes.

Die Streckung des Hüftgelenkes vollzieht sich während der 2ten, 3ten und 4ten der oben aufgestellten Aktionsperioden des Beines derselben Seite. Sie beginnt zugleich mit der Streckbewegung des Kniegelenkes und es ist wahrscheinlich, dass letztere, zum Theil wenigstens, durch die Thätigkeit der Hüftgelenkstrecker herbeigeführt wird, wie ich weiter unten zeigen werde. Man überzeugt sich an sich selbst durch Befühlen der Muskeln leicht von der Thatsache, dass sowohl die zweige-

lenkigen, bis zum Unterschenkel reichenden als die eingelenkigen Muskeln während der ganzen Dauer jener drei Perioden mehr oder weniger gespannt sind. Was die Mitwirkung der langen Muskeln hinten am Oberschenkel betrifft, so kann hierüber kaum ein Zweifel herrschen. Wohl aber wurde von Duchenne eine erhebliche Thätigkeit des Glutaeus max. beim Gang in Abrede gestellt.*) Duchenne tritt der Annahme entgegen, dass dieser Muskel beim aufrechten Stande und beim Gang auf horizontaler Ebene eine erhebliche Rolle spiele. Betastung lehre, dass er unter diesen Umständen vollkommen erschlafft bleibe, und klinische Fälle bewiesen, dass trotz der Atrophie des Muskels sowohl das aufrechte Stehen als auch der Gang auf horizontalem Plane ohne Beeinträchtigung der aufrechten Haltung des Oberkörpers möglich sei.

Man kann sich nun aber im Gegentheil davon überzeugen, dass beim gewöhnlichen Gang namentlich die hintere, untere Randportion des Muskels immer deutlich im Momente, wo der Fuss vorn aufgesetzt wird, an der Hüfte derselben Seite sich spannt und eine Weile gespannt bleibt, dass aber jedesmal, wenn wir mit Absicht dem Körper einen stärkeren Impuls nach vorn geben, die Spannung des Muskels zunimmt; immer hält sie so lange an, bis das Hüftgelenk annähernd gestreckt ist. Jene klinischen Befunde aber widersprechen der Annahme, dass der Muskel beim gewöhnlichen Gange von Bedeutung ist, deswegen nicht, weil der Glutaeus max. nicht der einzige Muskel ist, der das Hüftgelenk streckt. Auch kann im Nothfalle die Aktion des Hüftgelenkes beim Gang sehr zurücktreten.

Man wird, wie ich glaube, recht erfreut sein, in der Bedeutung, welche die Streckmuskulatur des Hüftgelenkes, namentlich des Glutaeus max. für die andauerndste unserer Bewegungen hat, einen neuen Erklärungsgrund für die Massenentwickelung der Gesässmuskeln zu finden.

Die Streckung des Hüftgelenkes wirkt nun folgendermassen locomotorisch: Sie treibt den Körper mit der Hüfte nach vorn und dreht den Oberkörper über die letztere rückwärts. Wie das Uebermass dieser Drehung corrigirt wird, habe ich schon besprochen.

Es ist keine Frage, dass die Aktion im Hüftgelenke ausserdem noch durch die Rückwärtsbeuger der Wirbelsäule, durch den Musc. sacro-lumbalis unterstützt werden kann. Dass diese Muskeln beim Gehen thätig sind, hat bereits Gerdy beobachtet; man fasste sie auf als Rückwärtszieher des Oberkörpers; aber man hat

*) Duchenne, Physiologie des mouvements. Paris 1867 pag. 338 (§ 318) und pag. 365.

übersehen, dass ihre Aktion dazu dienen muss, den Körper-Schwerpunkt nach vorn zu treiben. Wenn von diesen Muskeln und den Hüftgelenkstreckern mit Recht gesagt werden kann, dass sie den Oberkörper gegenüber der Schwere in seiner Lage halten, so kann man mit ebensoviel Recht das Verhältniss umgekehrt formuliren: Diese Muskeln stossen den Körper vorwärts, die Schwere aber corrigirt die Rückwärtsdrehung, welche von ihnen dem ganzen Körper ertheilt wird.

Das vorgesetzte Bein wirkt also beim Gang als Ganzes wie ein Ruder oder ähnlich demjenigen Zahn einer Berglocomotive, welche eben erst in die Zahnstange eindringt. Es erzeugt einen Widerstand, der im Mittel nach vorn und meist etwas nach oben gerichtet ist.

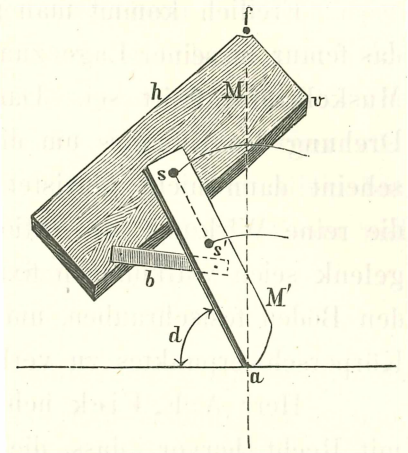
Ein Impuls, wie ihn die Streckung des Hüftgelenkes dem Körper ertheilt, kann, so scheint es a priori, in verschiedener Weise in den Mechanismus der Locomotion, wie wir ihn oben im Vergleich mit der Schwalbe schematisirt haben, eingreifen. Wie die Schwalbe, anstatt sich direkt durch Flügelschläge um das fehlende Stück der Höhe emporzutreiben, auch ihre Horizontalgeschwindigkeit an irgend einer Stelle des beschriebenen Bogens durch Flügelschläge vergrössern und dadurch die nöthige lebendige Kraft erwerben kann, um zur früheren Höhe wieder aufzusteigen, so könnte beim Gang activ erworbene Horizontalgeschwindigkeit zum Aufsteigen verwendet werden.

Nun fällt aber die Thätigkeit der Hüfte einer Seite in die Zeit, während welcher der Körper mit dem Beine dieser Seite über den Fuss nach vorn sich dreht und der Körperschwerpunkt den einen, höhern der beiden von ihm während einer Periode ausgeführten Bogen beschreibt. Die Richtung des durch die Hüftmuskeln allein hervorgerufenen Widerstandes geht annähernd parallel der Tangente dieses Bogens durch den Körperschwerpunkt; sie zielt fast immer nicht direkt nach vorn, sondern nach vorn oben und trägt deshalb nicht indirekt, sondern unmittelbar zur Hebung des Körperschwerpunktes bei.

Folgender einfache Versuch dient zur Bekräftigung dieses letzten Punktes. M und M' (Fig. 9) seien 2 Holzleisten, M sei etwa doppelt so gross als M'; s' sei der Schwerpunkt von M'; der Schwerpunkt s von M werde so mit dem Ende von M'' verbunden, dass die beiden Holzleisten sich hier um eine senkrecht zu den Breitseiten der Leisten stehende Axe mit ziemlichem Reibungswiderstande gegeneinander drehen können. Auf der einen Seite, die ich als Hinterseite (h) bezeichnen will, seien beide Massen durch einen leichten, elastischen Zug b gegen-

einander gehalten; das System werde so aufgestellt, dass die Bewegungsebene und die annähernd damit zusammenfallenden, breiten Seitenflächen der Massen vertical stehen; b sei gespannt; a, das untere Ende von M' soll vor s liegen und gegen den Boden sich stemmen; eine subtile Sperrvorrichtung in f halte das System in dieser Lage, wie sie Fig. 9 zeigt, niedergedrückt. Der gemeinschaftliche Schwerpunkt liegt nun bei jeder Stellung der Partialmassen zueinander annähernd in demselben Punkte der in ihrer Länge gleich bleibenden, geraden Linie $s\,s'$, vorausgesetzt dass wir das Gewicht des elastischen Bandes für sehr gering anschlagen. Das System kann sich gegen eine vertikale, glatte Wand leicht anlehnen. Löst man nun die Sperrvorrichtung f, so geschieht Folgendes: M' dreht sich über sein unteres Ende a nach vorn, während das elastische Band sich verkürzt; s' erreicht die durch a gehende Vertikale, und gleich darauf kippt der ganze Apparat nach vorn über. Sowohl s als s' als der gemeinschaftliche Schwerpunkt S bewegt sich dabei in einem aufwärts convexen Bogen, es wird also entgegen der Schwere Arbeit geleistet; der Winkel α zwischen dem Hebelarm M' und dem Boden ist vergrössert worden, obschon die Kraft b am Hebelarm selbst nach hinten zieht; am höchsten Punkte der Bahn hat S ausserdem noch eine erhebliche Vorwärtsgeschwindigkeit. Ich will hier nicht versuchen, die Art, in welcher die Bewegungen von zwei gelenkig verbundenen, starren Massen durch einander und durch einen äusseren Widerstand beeinflusst werden, zu erörtern, und beschränke mich darauf, die Thatsache hervorzuheben, dass Kräfte, die am Gelenk S wirken, streckend, um mich so auszudrücken, auf die Gelenkverbindung a einwirken. Es handelt sich auch hier um eine ruderartige Funktion des Hebels M'.

Fig. 9.



Die Analogie mit Verhältnissen, wie sie bei der Gehbewegung des Menschen vorkommen, liegt auf der Hand. Man denke sich an Stelle von M den Rumpf, statt M' die gestreckt vorgesetzte untere Extremität oder auch bloss das femur, welches an dem oberen Ende der Tibia einen mehr oder minder vollständigen Widerstand findet, an Stelle des elastischen Zuges b setze man die Streckmuskeln der Hüfte; — dann erkennt man, dass diese Muskulatur zur Dorsalbeugung im Fussgelenke oder zur Streckung im Kniegelenke beitragen kann. Der Rumpfschwerpunkt aber hebt sich gegenüber der Hüfte und erhält ausserdem einen Impuls, welcher ihn mit sammt der Hüfte im Bogen über den Widerstandspunkt hinüber zu werfen sucht. Die ganze

Körpermasse wird also nicht nur vorbewegt, sondern erhält auch einen vertikalen Impuls entgegen der Schwere.*)

Freilich kommt man zu ganz anderen Resultaten, wenn man annimmt, dass das femur in seiner Lage zum Unterschenkel, der letztere gegenüber dem Fusse durch Muskelkräfte fixirt sei. Dann besteht die ganze Wirkung der Hüftstrecker in der Drehung des Rumpfes um die Hüfte; eine erhebliche Arbeit gegenüber der Schwere scheint dann nicht geleistet zu werden. Man hat hierin aber nichts weniger als die reine Wirkung der Aktion im Hüftgelenke, und gesetzt auch, Fuss- und Kniegelenk seien vollkommen fixirt, müsste man nicht schliesslich noch den Fuss gegen den Boden festschrauben, um bei energischer Aktion in der Hüfte das Ansteigen des Körperschwerpunktes zu verhindern?

Herr A. E. Fick hebt in seiner Arbeit: Ueber zweigelenkige Muskeln**) mit Recht hervor, dass die Anhäufung der Muskelmassen am Hüftgelenk bei den schnell laufenden Landthieren den grossen Vortheil habe, die Beine zu entlasten und die zu der Vorbewegung derselben nothwendige Anstrengung zu vermindern. Dies behält auch dann Geltung, wenn man die Einschränkung macht, dass die Vorführung der Beine ein locomotorischer Effekt ist. Um nun zu erklären, dass durch die Hüftgelenkmuskeln die für die Hebung des Körperschwerpunktes so wichtige Streckung des Kniegelenkes gefördert werden könne, legt jener Autor namentlich auf die Wirkung des Musc. rectus femoris Gewicht; durch diesen Muskel soll wie durch ein Zugseil bewirkt werden, dass durch Fixation des Hüftgelenkes das Kniegelenk in bestimmter Stellung fixirt wird.

Durch die vorangehende Betrachtung sind wir nun in den Stand gesetzt, für die Bedeutung der Hüftgelenkstrecker bei der Steigebewegung und bei der Loco-

---

*) War aber das Kniegelenk beim Beginne der Aktion noch nicht vollständig festgestellt, so kann man sich zunächst vorstellen, dass die Muskelkräfte bloss den oberen Abschnitt des Beines bewegen; es wird dann das untere Ende des femur nach unten hinten gedrängt; dabei findet aber eine Einwirkung auf die Tibia statt, in Folge deren dieser Knochen einmal gegen seinen unteren Stützpunkt stärker angepresst, zugleich aber über denselben nach hinten gedreht wird. Die Bewegung des femur wirkt also streckend am Kniegelenk und streckend am Fussgelenke, aber von vornherein nicht ohne Widerstand. In Sonderheit muss am Knie die beugende Wirkung der zweigelenkigen, zum Unterschenkel gehenden Hüftstrecker überwunden werden. Schliesslich wird durch diese Wechselwirkung das Kniegelenk festgestellt und das Bein stellt nun einen starren einarmigen Hebel dar, welcher am Fusse seinen wesentlichen Widerstandspunkt hat. Dass bei der Streckung des Knies die Hüftgelenkmuskulatur eine Rolle spielen kann, ist von H. Meyer in seiner Statik und Mechanik pg. 332 angedeutet worden.

**) Arch. f. Anat. u. Physiol. Anat. Abth. 1879 pag. 201 u. ff.

motion überhaupt noch ein neues Moment geltend zu machen. Wir sehen, dass die Hüftmuskulatur nicht bloss zur Aequilibration dient oder indirekt, so weit es die Zugseilvorrichtung der M. rectus femoris gestattet, am Kniegelenk hebend auf die Körpermasse wirkt, sondern ganz direkt, ohne solche Uebertragung, gleichsam durch den Ruderschlag des femur oder des ganzen Beines die Körpermasse nach vorn in die Höhe hebt. Andere Einflüsse können dem entgegen wirken; es ist daher gut, wenn man untersucht, welche Wirkung die Aktion an dem einzelnen Gelenke für sich allein hat, um nachher durch Combination der Einzeleffekte der verschiedenen Gelenkactionen und der Wirkung der Schwere die resultirende Wirkung zu ermitteln.

Im Allgemeinen wird freilich die Wirkung des Hüftgelenkes namentlich da hervortreten, wo es sich um grössere Vorwärtsgeschwindigkeit handelt, so namentlich bei sehr eiligem Gang, beim Lauf, Eillauf, Sprunglauf und beim Sprung nach vorn. Beim Sprung in die Höhe dagegen und beim Steigen wird das Kniegelenk eine grössere Rolle spielen. Möchte es nicht hiermit zusammenhängen, dass Bergbewohner, welche an starke Thätigkeit der Kniestrecker gewöhnt sind, auch beim gewöhnlichen Gange mehr durch Fall aus grosser Höhe sich vorwärts bewegen und durch Kniestreckung wieder sich heben, also bedeutend in die Kniee einsinken und die Streckmuskeln des Knies sehr gebrauchen, dabei aber ihre Hüfte weniger kraftvoll nach vorn durchdrücken, — während die Bewohner der Ebene weniger in die Knie sinken, weniger steile Bogen mit der Hüfte beschreiben, die Beinlänge weniger ändern, dafür aber die Strecker des Hüftgelenkes kraftvoller wirken lassen und mit strammen Beinen den Boden gleichsam nach hinten unter sich zurückschieben?

IX.

Maass der locomotorischen Leistung; Principielles. Die locomotorische Leistung in den 3 Dimensionen des Raumes. Ersatz locomotorischer Aktion durch passive Widerstände; Gang; Streckkraft der Gebrüder Weber. Neue Ziele und Gesichtspunkte.

Es ist mir, wie ich hoffe, durch die vorangegangene Besprechung spezieller Verhältnisse der Locomotion gelungen, zu zeigen, dass die Probleme der Locomotion etwas allgemeiner und mechanisch correkter formulirt werden können, als dies bis jetzt geschehen ist, und dass eine solche mehr analytische Betrachtung neues Licht auf den Gegenstand wirft. Neue Schwierigkeiten wachsen dabei gleichsam vor unseren Augen aus dem Boden. Doch ist dies eher ein Beweis dafür, dass die neue Behandlungsweise der in Rede stehenden Fragen keine verfehlte ist.

Wenn ich es zum Schlusse noch unternehme, die Prinzipien zu erörtern, nach welchen die Grösse der locomotorischen Leistung im Allgemeinen zu beurtheilen ist, so weiss ich sehr wohl, dass gerade dieser Gegenstand ein sehr schwieriger ist.

Es möchte vielleicht nicht auffallend erscheinen, dass in der ganzen bisherigen Betrachtung immer nur von locomotorischer Kraft, von locomotorischem Impulse, von locomotorischer Thätigkeit, nicht aber von potentieller und kinetischer Energie oder von locomotorischer Arbeit die Rede war. Mich leitete dabei die Ueberzeugung, dass es möglich sein muss, aus der Kenntniss der in jedem Zeitmoment wirkenden innern und äussern Kräften des Systemes und aus der Configuration und dem Bewegungszustande desselben in diesem Momente auf die Aenderungen zu schliessen, welche seine innere und äussere Bewegung erfahren muss. Die Kenntniss des locomotorischen Widerstandes und der äusseren Kräfte ermöglicht die Beurtheilung der resultirenden Einwirkung auf die Gesammtmasse. Ferner giebt die durchschnittliche Spannkraft eines arbeitenden Muskel das beste Maass für die Grösse des stattfindenden chemischen Umsatzes und endlich steht die Grösse der locomotorischen Leistung im Ganzen oder die der einzelnen Muskeln im Besondern in relativ einfachem Abhängigkeitsverhältnisse zu der Grösse der Anstrengung resp. der chemischen Prozesse in den thätigen Muskeln. Die vom einzelnen Muskel oder die am ganzen Körper geleistete mechanische Arbeit aber giebt für diese Anstrengung durchaus keinen Maassstab. Für den einzelnen Muskel ist dies von den Physiologen genügend sicher experimentell nachgewiesen. Und dass z. B. ein Vogel, obschon dabei die locomotorische Anstrengung seiner Muskulatur eine erhebliche ist, gegenüber der Schwere keine Arbeit leistet, wenn er sich in derselben Höhe hält, gilt nach der gewöhnlichen Auffassung als sicher. Zu alle dem kommt noch hinzu, dass die ganze Art und Weise, nach welcher die Arbeitsfähigkeit der thierischen Organismen gemessen wird, einer Revision und Kritik unterzogen werden müsste, und dies kann hier nicht meine Aufgabe sein.

Begnügen wir uns mit der Thatsache, dass die Beurtheilung der Muskelanstrengung und ihres Effektes in klarer und einfacher Weise möglich ist, wenn wir die Spannkraft des Muskels und die locomotorische Krafteinwirkung auf die Gesammtmasse für die einzelnen Phasen der Bewegung ins Auge fassen und die Zeit der Wirkung aufmerksam in Betracht ziehen.

Um die locomotorische Leistung von recht allgemeinen Gesichtspunkten aus zu beurtheilen, thun wir gut, dieselbe in ihre Componenten nach den 3 Hauptdimensionen des Raumes zu zerlegen. Der Fisch braucht im Allgemeinen in verticaler

Richtung nicht locomotorisch thätig zu sein, weil er vom Wasser getragen wird. Wenn aber ein Vogel nicht gleichsam als starrer, innerlich gefestigter Körper schräg-abwärts und dann wieder fast bis zur ursprünglichen Höhe emporschwebt, sondern durch Flügelschläge sich in derselben Höhe hält, so muss er durch locomotorische Thätigkeit der Wirkung der Schwere auf seinen Körper (= G) das Gleichgewicht halten. Die locomotorische Kraft F müsste $= G$ sein, wenn sie continuirlich einwirkt; wenn sie nur in der Hälfte der Zeit (periodisch) und in den einzelnen Perioden constant wirkt, so muss $F = 2G$ sein, kurz für eine längere Zeit T oder für die Zeit einer Periode muss

$$F.T = G.T \text{ sein.}$$

Nehmen wir nun an, dass der Vogel sich des Schwebens bedient, dass er dabei durch Bänderspannung und Knochenkontakt gefestigt ist und ohne Anstrengung eine Zeit lang von der Luft getragen und in der Fallbewegung gehemmt wird, dann darf ofienbar, G für voll angenommen,

$$F.T < G.T \text{ sein,}$$

und trotzdem wird das Thier am Schluss einer längeren Periode wieder in derselben horizontalen Höhe anlangen. Es ist einleuchtend, dass in diesen Fällen die locomotorische Leistung in horizontaler Richtung eine sehr verschiedene sein kann, beim Vogel z. B. je nach dem im einem Falle eine Vorwärtsbewegung durch die Fallbewegung auf schiefer Ebene ohne locomotorische Thätigkeit des Thieres herbeigeführt worden ist, im anderen nicht.

Bei der Bewegung auf der Erdoberfläche ist im Allgemeinen die verticale locomotorische Kraft F ebenfalls im Durchschnitt $< G$,

$$F.T. < GT.$$

Ein Theil des Gewichtes wird nämlich durch solche innere Widerstandskräfte des Beines getragen, die wir in dem ersten Kapitel als passive bezeichnet haben. Bei der Locomotive, beim Velociped, beim Dampfschiff ist die verticale locomotorische Arbeit annähernd $= 0$. Beim Gange des Menschen giebt es eine Zeit, in welcher der Körper von dem soeben vorn aufgesetzten Beine nur unvollkommen gestützt wird und unter Einknickung desselben fällt; aber die Fallbeweguug ist dabei verlangsamt. In der dritten der von uns aufgestellten Aktionsperioden ist das Bein im Grossen und Ganzen starr und trägt wieder einen Theil des Körpergewichtes. Geben wir zu, dass in beiden Perioden die Muskelthätigkeit zur Fixirung der Säule mitwirken muss, und lassen wir es vorläufig dahingestellt, in welcher Weise diese Muskelthätigkeit zu beurtheilen ist, ob als locomotorische Kraft oder nicht als solche,

so ist doch jedenfalls Folgendes klar: wenn durch blosse Aktion der Muskeln auf irgend eine Weise dieselbe Wirkung in verticaler Richtung entgegen dem Gewichte des Körpers zu Stande kommen sollte, wie jetzt durch die Combination von Skelet und fixirenden Muskeln, so müsste die Anstrengung der Muskulatur eine viel grössere sein. Die passiven Widerstände übernehmen also auch hier einen Theil der Gegenwirkung gegen die Schwere.

Die Gebrüder Weber verstehen unter der „Streckkraft“ der Beine im Grunde die Summe aller Widerstandskräfte, welche vom Boden aus auf den Körper einwirken. Sie behaupten nämlich, dieselbe müsse so beschaffen sein, dass sie allen übrigen äussern, auf den Körper wirkenden Kräften, der Schwere und dem Widerstande der Luft das Gleichgewicht halten, damit der Körper in derselben mittleren Vorwärtsgeschwindigkeit und in demselben mittleren, horizontalen Niveau verharren könne. — Die vom Boden ausgehenden Widerstände können zum Theil locomotorischer Natur zum Theil durch den Druck der Schwere bedingt sein; so scheint es wenigstens nach dem, was wir oben auseinandergesetzt haben. Dies ist aber nicht die Ansicht der Gebrüder Weber. Diese nehmen an, dass es sich bei der „Streckkraft“ nur um Kräfte von locomotorischer Natur handle; sie zeigen dies schon durch die Definition ihrer „Streckkraft“, sodann indem sie weiterhin deduciren, dass in der Zeit, in welcher beide Beine auf dem Boden aufruhen, die Streckkraft nur vom vordern Beine ausgeübt werden könne; sie nehmen an, dass in einem bestimmten Momente des Ganges die Streckkraft des einen, soeben aufgesetztenBeines = 0 sei. Dabei konnten diese Forscher doch kaum annehmen, dass von dem am Boden aufgesetzten Beine, das keine Streckkraft ausübt, kein Bruchtheil der Körperlast getragen werde, und eine solche Annahme müsste jedenfalls irrig sein. Unterscheidet man aber zwischen der Streckkraft als dem durch die Thätigkeit der Muskulatur erzeugten Widerstande nach oben und zwischen den passiven Widerständen, so darf man nicht mehr annehmen, dass es die Streckkraft allein sei, welche der Schwere und dem Luftwiderstande das Gleichgewicht halte. Der durchschnittliche active, locomotorische Impuls wird eine andere Grösse sein und kann eine andere Richtung haben als die Resultirende jener beiden äussern Einwirkungen. — Es scheint uns daher, dass die Gebrüder Weber in der Analyse der Kräfte beim Gang nicht ganz glücklich gewesen sind. Man sieht auch nicht ein, warum die Natur sich nicht die passive Unterstützung des Körpers durch seine Beine zu Nutze gemacht haben sollte, ja sich zu Nutze machen musste.

Wir haben oben nur flüchtig die Frage berührt, wie diejenige Muskelthätigkeit aufzufassen ist, welche an Stelle eines passiven Widerstandes bloss zur Fixirung der Lage der Partialmassen gegeneinander dient und nicht zur wirklichen Configurationsänderung führt. Wir dürfen der Beantwortung dieser Frage nicht aus dem Wege gehen.

Soll man eine strenge Gränze ziehen zwischen der Thätigkeit einer Muskulatur, welche den äusseren Einflüssen auf den Körper gerade das Gleichgewicht hält, und derjenigen, welche trotz der äusseren Kräfte eine Configurationsänderung herbeiführt, so z. B. zwischen der Thätigkeit der Kniegelenkstrecker, wenn sie den Rumpf in derselben Höhe halten, und ihrer um ein Minimum energischer gewordenen Thätigkeit, wenn sie den Rumpf zu heben vermögen? Soll im ersten Falle der gesammte Widerstand des Bodens, der gleich dem Gewichte des Körpers ist, als nicht locomotorisch betrachtet werden, im zweiten Falle der etwas grössere Widerstand als ein locomotorischer? Soll man die Muskelkräfte, welche das Einsinken in das Knie zwar unvollkommen, aber doch einigermassen hemmen, von der Betrachtung ausschliessen, wenn man die locomotorische Thätigkeit der einzelnen Gelenkmuskulaturen feststellt?

Sehen wir genauer zu, so finden wir, dass es sich bei der tetanischen Contraktion des Muskels gerade so um einzelne Stösse im Kleinen handelt, wie bei den Flügelschlägen des Vogels im Grossen; nur dass diese Stösse durch sehr kleine Oscillationen bewirkt sind, sehr schnell hintereinander, zum Theil auch gleichzeitig erfolgen und sich zu einer continuirlichen Wirkung ausgleichen, ganz ähnlich wie man sich vorstellt, dass der Druck eines Gases auf die umschliessende Wand das Resultat einer Summe einzelner Stösse der Gasmoleküle sei.

Wir haben es für zweckmässig befunden, zur besseren Würdigung aller Verhältnisse der activen Locomotion genau zu unterscheiden zwischen dem locomotorischen Effekte, den die Aktion innere Kräfte für sich allein haben würde, zwischen den durch diese Aktion direkt hervorgerufenen, äusseren Einflüssen und zwischen dem Effekte anderer, nicht durch unmittelbare Aktion des Körpers veranlasster äusserer Kräfte. Die resultirende Bewegung selbst konnte uns nicht als massgebend erscheinen für das, was wir als locomotorische Thätigkeit des Körpers bezeichnen wollten. Mit dieser Sonderung verschafften wir uns die Möglichkeit, die auf die Gesammtmasse statthabenden Einwirkungen im Groben zu analysiren. Der Vogel, der sich durch Flügelschläge an derselben Stelle hält, erschien uns als locomotorisch thätig trotz des Paradoxen der Bezeichnung.

Bei den einzelnen Muskelactionen des Körpers wird ebenfalls eine genaue Analyse nicht möglich sein, ohne dass wir den Effekt jeder einzelnen für sich allein betrachten. Ohne die Wirkung der Streckmuskeln des Knies z. B. würde der Gesammtschwerpunkt sinken, das Knie würde nach vorn ausweichen, die Hüfte würde nach unten und hinten sinken, der Widerstand am Boden würde kleiner sein als das Körpergewicht und schräg gerichtet, insofern als der Fuss bei der Drehung des Unterschenkels nicht ausgleitet; durch die Aktion der Streckmuskeln aber wird dieser Bewegungszustand nicht zugelassen, der Widerstand des Bodens wird vergrössert und in einen senkrecht nach oben gerichteten umgewandelt; die Aktion dieser Muskeln bewirkt, dass der Körper langsamer oder gar nicht sinkt, ja dass er aufsteigt. Hat nicht in allen diesen Fällen die Streckanstrengung am Knie einen locomotorischen Effekt auf den Körperschwerpunkt entgegen der Schwere geleistet? ist nicht der Unterschied nur ein quantitativer?

Wenn man diese Betrachtungsweise acceptirt, so erscheinen die Fälle, in welcher vollkommenes Gleichgewicht der äusseren Kräfte gegenüber inneren, „fixirenden“ Muskelkräften zu bestehen scheint, nur noch als besondere spezielle Fälle der locomotorischen Thätigkeit, das statische Gleichgewicht als ein besonderer Fall eines allgemeineren, dynamischen Problemes. Da nun aber dieses Problem erst in seinen gröbsten Zügen im Vorhergehenden dargelegt worden ist, und wir von seiner vollkommenen Lösung noch weit entfernt sind, so kann hier nur vermuthungsweise ausgesprochen werden, dass man bei der speziellen Analyse der einzelnen Muskelaktionen und inneren und äusseren Wechselwirkungen von einem verallgemeinerten Begriffe der locomotorischen Thätigkeit wird Gebrauch machen müssen. Es soll damit auf eines der Ziele in der Lehre der thierischen Locomotion hingewiesen sein.

Man mag vorderhand noch eine Gränze ziehen zwischen der Muskelthätigkei, welche eine positive Configurationsänderung des Körpers ganz offenbar bewirkt, und derjenigen, welche den Körper oder Theile desselben fixirt hält; man wird aber stets im Auge zu behalten haben, dass diese Gränze eine künstliche ist.

Breslau im August 1880.

Halle, Druck von E. Karras.