

SPECIELLE BEWEGUNGSLEHRE

VON

PROF. A. FICK IN WÜRZBURG.

EINLEITUNG.

Die specielle Bewegungslehre müsste — so sollte man meinen — zu den alleranziehendsten biologischen Disciplinen gehören. In der That, sie bietet lauter Probleme dar, die verhältnissmässig leicht in mathematischer Form gelöst werden können, da das Phänomen der Muskelkontraktion in dieser Disciplin selbst nicht erklärt zu werden braucht, sondern als gegebener Erklärungsgrund benutzt wird. Keine andere wissenschaftliche Thätigkeit ist aber wohl so anziehend und befriedigend als die Beantwortung einer bestimmt gestellten Frage in der eleganten Form der Mathematik. Dazu kommt noch, dass kaum eine andere biologische Disciplin reichlicher Gelegenheit bietet, die bewundernswerthe Zweckmässigkeit der organischen Formen so klar zu durchschauen, als gerade die specielle Bewegungslehre, was gewiss auch zu den höchsten Genüssen gehört, welche die Wissenschaften bieten können. Gleichwohl hat diese Disciplin, die nach dem Stande der gegenwärtigen Hilfsmittel heutzutage schon als eine vollendete dastehen könnte, sehr wenig Bearbeiter gefunden. Der Grund dafür liegt wohl hauptsächlich darin dass die specielle Bewegungslehre eine eigenthümliche Mittelstellung zwischen der Physiologie und der beschreibenden Anatomie einnimmt, so dass jede dieser beiden umfassenderen Wissenschaften sie der anderen zuzuschreiben Gründe finden kann. So hat sich denn die Forscherthätigkeit der Physiologen in neuerer Zeit fast ganz von dem Gebiete der speciellen Bewegungslehre zurückgezogen und sich mit Vorliebe und wohl auch mit Recht auf die Untersuchung der Grundeigenschaften der funktionirenden Elementartheile wesentlich concentrirt. Die Vertreter der beschreibenden Anatomie andererseits pflegen schon seit längerer Zeit ihre Forscherthätigkeit überhaupt anderen Gebieten, insbesondere der Entwicklungsgeschichte, der vergleichenden Anatomie und Histologie zuzuwenden. So ist denn die specielle Bewegungslehre von beiden Seiten her sehr kurz gehalten.

Bei dieser zweifelhaften Mittelstellung zwischen Anatomie und Physiologie hat derjenige, welcher die specielle Bewegungslehre als Abschnitt der Physiologie darstellen soll, in weitestem Umfange

freie Hand bezüglich der Auswahl des Stoffes und der Art der Darstellung. Nur die Erörterung gewisser Bewegungsvorgänge pflegt in den Darstellungen der gesammten Physiologie nie zu fehlen. Mehrere derselben aber, wie die Bewegungen des Brustkorbes und des Augapfels, werden regelmässig bei der Funktion der Organe behandelt, welcher sie dienen. Der speciellen Bewegungslehre fällt daher nur die Beschreibung der Locomotion durch die Extremitäten und die Stimmbildung durch Kehlkopf und Mund zu. Diese beiden Abschnitte dürfen daher auch in diesem Handbuche nicht vermisst werden. Ihnen schicke ich voraus eine Erörterung der allgemeinen Grundsätze, wonach die Arbeit der Muskelkräfte an den Gelenkmechanismen zu beurtheilen ist. Ich werde mich dabei jedoch nicht an die Darstellung anderer Autoren halten.

Aus der Literatur über die specielle Bewegungslehre ragen zwei monumentale Werke hervor: BORELLI's grundlegendes Werk „De motu animalium“ und „Die Mechanik der Gehwerkzeuge“ von den Gebrüdern WEBER. Ihnen schliesst sich aus neuerer Zeit noch an: DUCHENNE's „Physiologie des mouvements“, ein Werk, das zwar mit den beiden genannten an bahnbrechendem Gedankeninhalt nicht zu vergleichen ist, dem aber die Gründlichkeit der Untersuchung und Vollständigkeit der Darstellung einen Platz unter den klassischen Werken dieses Gebietes sichert. Gleichwohl dürfte es heutzutage nicht geeignet sein, sich in der Darstellung der allgemeinen Grundsätze diesen Werken unmittelbar anzuschliessen. Was BORELLI betrifft, so kann von einem engeren Anschlusse schon darum nicht die Rede sein, weil zu seiner Zeit die Principien der Mechanik noch so wenig entwickelt waren, dass er viele Sätze der Muskelmechanik nur sehr schwerfällig darstellen und beweisen konnte, die man mit den gegenwärtigen Hilfsmitteln spielend beweist. In den andern genannten und manchen unerwähnt gebliebenen Schriften, wo es mehr auf Detailuntersuchung abgesehen ist, sind zwischen ihnen die allgemeinen Grundsätze theils versteckt, theils nur stillschweigend vorausgesetzt. Ich habe es daher vorgezogen, diese allgemeinen Grundsätze als unmittelbare Folgerungen der allgemeinsten mechanischen Principien hinzustellen. Von den Anwendungen auf einzelne Probleme, wie sie sich zahlreich in den schönen neueren Arbeiten von AEBY, ALBERT, HAUGHTON, HENKE, LANGER, MEYER und Anderen finden, habe ich im Ganzen abgesehen. Nur einige wenige besondere Anwendungen habe ich als erläuternde Beispiele aufgenommen, und zwar nur solche, die wegen ihrer präzisen numerischen Form kurz tabellarisch gegeben werden konnten.

ALLGEMEINER THEIL.

ERSTES CAPITEL.

Lehnsätze aus der allgemeinen Muskelphysiologie.

In dem Abschnitte über allgemeine Muskelphysiologie ist die fundamentale Eigenschaft der Muskelfaser erörtert, welche darin besteht, dass durch verschiedene — Reize genannte — äussere Einflüsse in derselben ein gewisser Process, der sogenannte Erregungsprocess, entsteht. Er hat seinen nächsten sichtbaren Ausdruck darin, dass die Spannung der Muskelfaser über den Werth steigt, der ihr bis dahin zukam. Es wird also zwischen der Spannung des Muskels und der Gegenkraft, welche ihr bis dahin Gleichgewicht hielt, ein solches nicht mehr bestehen können, vielmehr wird nunmehr die Spannung des Muskels diese Gegenkraft überwinden, der Muskel wird sich zusammenziehen. Man kann dies auch so ausdrücken: Durch den Erregungsprocess verwandelt sich der Muskel in einen elastischen Strang von kleinerer natürlicher Länge, als welche ihm im ruhenden Zustande zukam. Indem nun die Zusammenziehung des gereizten Muskels wirklich zu Stande kommt, leisten die elastischen Kräfte desselben Arbeit im Sinne der Mechanik, denn der eine frei gedachte Endpunkt des Muskels, welcher den Angriffspunkt der elastischen Kraft bildet, wird im Sinne dieser Kraft gegen den fest gedachten andern Endpunkt des Muskels verrückt.

Wenn man die Dehnungskurve des erregten Muskels kennt, kann man die Grösse der Arbeit, welche die elastischen Kräfte bei irgend einer gegebenen Zusammenziehung leisten, von vornherein berechnen. Sei z. B. $a_e b_e$ (Fig. 1) die Dehnungskurve des erregten Muskels, d. h. bei der Länge, die durch eine der senkrechten Ordinaten zwischen AB und $a_e b_e$ gemessen wird, übe der erregte Muskel eine Spannung von so viel Grammen aus, als die am Anfangspunkt dieser Ordinate

angeschriebene Zahl angiebt, also beispielsweise bei der Länge fg 300 grm. Zieht sich also jetzt der Muskel von der Länge fg bis zur Länge de zusammen, so kommen dabei alle Werthe der Spannung zwischen 300 grm. und 50 grm. zur Wirksamkeit und zwar jeder für

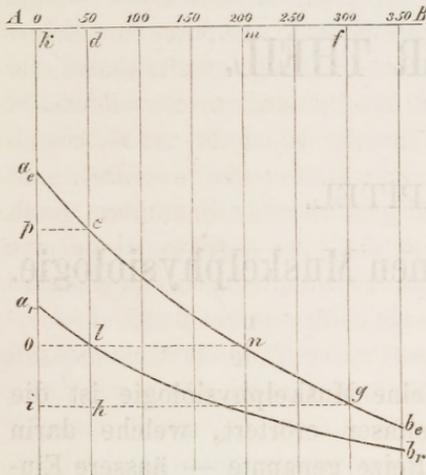


Fig. 1.

eine unendlich kleine, vom freien Endpunkte des Muskels zurückgelegte Wegstrecke; die Summe dieser unendlich kleinen Wegstrecken ist aber $he = ip$ und man hat daher in dem trapezoidischen Flächenraume $pegi$ ein Maass für die von den elastischen Kräften bei der gedachten Zusammenziehung geleistete Arbeit. Da die Linie ig 300, die Linie pe 50 grm. repräsentirt und $he = 21$ mm. ist, so beträgt der numerische Werth der Arbeit etwas weniger als $\frac{300 + 50}{2} \times 21$,

d. h. etwas weniger 3675 Grammillimeter. Diese Zahl selbst würde genau das Maass der Arbeit sein, wenn die Linie eg ganz gerade wäre. Wäre dem erregten Muskel gestattet, sich von der Länge fg bis zu völliger Entspannung, d. h. bis zur Länge ka_e zusammenzuziehen, so würde die Arbeit der elastischen Kräfte gemessen werden durch den dreieckigen Flächenraum $a_e igh$ (etwa 4200 Grammillimeter).

Das definirte Maass für die von den elastischen Kräften geleistete Arbeit kommt aber bei einer Muskelzusammenziehung nur dann zur Wirksamkeit, wenn der Erregungszustand sich vollständig entwickelt hat, noch ehe eine merkliche Verkürzung vom Anfangszustande aus hat stattfinden können. In wirklichen Fällen ist dies sehr häufig ausgeschlossen und dann berechnet sich der Werth der zur Wirkung kommenden Arbeit elastischer Kräfte möglicherweise bedeutend kleiner. Um dies klar einzusehen, wollen wir uns folgenden Vorgang an dem Muskel vorstellen, dessen Dehnungskurven in beiden Zuständen durch Fig. 1 dargestellt sind. Die Dehnungskurve des ruhenden Muskels sei $a_r lb_r$, die des erregten wie vorhin $a_e eng b_e$. Der ruhende Muskel sei durch eine Kraft von 50 grm., also zur Länge dl gedehnt. Doch sei die Kraft ausgeübt von einem Agens, das so gut wie masselos ist. Jetzt werde der Muskel gereizt. Entstände auf Reiz der erregte Zustand momentan, so würde momentan die Spannung von 200 grm. entstehen, welche dem vollständig erregten

Muskel bei der Länge $mn = dl$ zukommt. Selbstverständlich ist aber die Entstehung dieser Spannung ein stetiger Akt, der eine endliche, wenn auch noch so kurze Zeit erfordert. Es wird also im ersten Augenblicke nach der Reizung die Spannung nur ein ganz klein wenig über 50 grm. steigen. Dadurch ist aber das Gleichgewicht mit der Gegenkraft schon aufgehoben. Wenn keine erhebliche Masse in Bewegung zu setzen ist und die Gegenkraft konstant = 50 grm. bleibt, wird also die Zusammenziehung beginnen und bis zu der Länge gehen, wo für dieses Stadium der Erregung die Spannung 50 grm. ist. Nun entwickelt sich ein zweites Stadium der Erregung, in welchem für die erreichte Länge die Spannung wieder etwas über 50 grm. beträgt, damit aber tritt auch sofort wieder eine entsprechende Verkürzung ein, bis mit vollständiger Entwicklung des Erregungszustandes die Länge de bei der immer merklich gleich gebliebenen Spannung von 50 grm. erreicht ist. Die elastischen Kräfte haben also hier im Ganzen nur eine Arbeit geleistet, welche dem rechteckig begrenzten Flächenraum $pole = le \times pe = 14 \text{ mm.} \times 50 \text{ grm.}$ oder 700 Grammmillimetern gleich ist und nicht gleich $peno$ (= 1750). Dieses Minimum der Arbeitsleistung (der WEBER'schen Berechnung entsprechend) tritt nur dann ein, wenn der Endpunkt dem geringsten Spannungsüberschusse folgen kann, ohne dass eine neue Gegenkraft oder die Trägheit einer Masse Widerstand leistet. Die Spannung bleibt eben dann konstant auf ihrem anfänglichen Werthe und die ganze Zusammenziehung erfolgt in der Zeit, während sich der Erregungszustand entwickelt und ist mit der vollständigen Entwicklung desselben gerade beendet.

Die positive Arbeit der vom erregten Muskel bei seiner Zusammenziehung entwickelten elastischen Kräfte kann nun wie jede andere Arbeit zweierlei mechanischen Effekt nach aussen hervorbringen, entweder negative Arbeit entgegenwirkender Kräfte — Ueberwindung von Widerständen — oder Beschleunigung von Massen. Soll wenigstens die Möglichkeit theoretisch gegeben sein, dass die ganze bei einer vollständigen Zusammenziehung von einer gewissen Anfangslänge (z. B. fg) verfügbare Arbeit ($a_e ig$) zu einem äusseren mechanischen Effekt verwandt wird, dann muss, wie schon oben bemerkt, dafür gesorgt sein, dass vor Beginn der Verkürzung der Erregungszustand zur vollen Entwicklung kommt. Man muss also, nachdem der ruhende Muskel zu der erforderlichen Länge gedehnt ist, das Ende festhalten, bis die Erregung vollständig entwickelt ist und dann erst freilassen. Soll jetzt der Effekt ganz in Ueberwindung von Gegenkräften (negativer Arbeit) bestehen, so muss man dafür sorgen, dass

diese Gegenkraft nach Maassgabe der Zusammenziehung abnimmt. Im obigen Beispiel müsste sie z. B. im ersten Augenblicke des Freilassens 300 grm. betragen, dann sofort kleiner werden und z. B. in dem Augenblicke, wo der Muskel die Länge mn erreicht hat, = 200 grm. sein und so fort, bis sie Null werden müsste, wenn der Muskel auf die Länge da_e gekommen ist. Durch gewisse Maschinerien wäre dies erreichbar, wenn man die Dehnungskurve des Muskels zum Voraus kennte und die Maschinerie danach einrichtete. Es giebt auch im menschlichen Körper viele Fälle, wo die Zusammenziehung von Muskeln mit abnehmender Gegenkraft verläuft. Ganz genau kann man aber in Wirklichkeit nie die Bedingungen zu dem gedachten Vorgange erfüllen und es ist daher auch noch nicht ausgemacht, ob die aus der Dehnungskurve zu berechnende Arbeitsgrösse jemals ganz zur Hervorbringung mechanischer Effekte nach aussen wirksam werden kann.

Es giebt noch eine andere Art, die Muskelzusammenziehung stattfinden zu lassen, bei der theoretisch betrachtet ebenfalls die ganze verfügbare Arbeit mechanischen Effekt hervorbringen sollte. Man dehnt wieder den ruhenden Muskel zu der bestimmten Anfangslänge, verknüpft sein freies Ende mit einer theilweise äquilibrirten Masse, so dass die ganze Gegenkraft nur unbedeutend ist. Während der Reizung wird das Ende festgehalten und nach voller Entwicklung der Erregung losgelassen. Da jetzt die Spannung bedeutend grösser ist als die Gegenkraft, so wird die Arbeit der elastischen Kräfte zum grossen Theil zur Beschleunigung der Masse verwendet und sie kommen unter geeigneten Bedingungen hier auch ganz zur Verwendung, da vermöge der Bewegung der mit dem Muskel verknüpften Masse demselben gestattet wird, sich bis zur vollständigen Entspannung zu verkürzen. Das System wird schliesslich vermöge der erlangten Endgeschwindigkeit auch nach vollendeter Zusammenziehung noch weiter gehen, bis die negative Arbeit des Ueberschusses der Last die erlangte lebendige Kraft aufgehoben hat. Die Erhebung, welche durch diesen Wurf der Schwerpunkt des ganzen Systemes erleidet mit dem Ueberschusse der Last multiplicirt stellt hier den mechanischen Effekt dar, und sollte der ganzen aus der Dehnungskurve zu berechnenden Arbeit gleich sein. Bei derartigen Versuchen kann man sich von der Dehnungskurve eine hinlänglich genaue Kenntniss verschaffen, um eine Vergleichung zwischen der theoretisch zu erwartenden und der wirklich erzielten mechanischen Leistung auszuführen. In meinen Versuchen dieser Art betrug die letztere nie mehr als die Hälfte der ersteren. Es geht hieraus hervor, dass von den wirklich schon ent-

wickelten elastischen Spannkraften des Muskels wenigstens bei schneller Zusammenziehung immer ein grosser Theil zur Ueberwindung innerer Reibungswiderstände verbraucht wird.

Es ist nun die Aufgabe des hier vorliegenden Abschnittes der Physiologie, zu untersuchen, wie im lebenden Menschen die Arbeit der elastischen Kräfte der Muskeln zu mechanischen Leistungen verwandt werde. Die zu überwindenden Gegenkräfte mit Einschluss der Trägheit zu beschleunigender Massen greifen, wie die elastischen Kräfte der Muskeln selbst an den miteinander beweglich verbundenen Knochen des Skelettes an; denn die Fälle, wo der Muskelkraft hydrostatische Druckkräfte von Flüssigkeiten entgegenwirken, werden in anderen Abschnitten der Physiologie behandelt. Es ist also unsere nächste Aufgabe, die Beschaffenheit der Knochenverbindungen, durch welche der Muskelarbeit ihre besondere Richtung an jeder Stelle vorgezeichnet wird, zu untersuchen.

ZWEITES CAPITEL.

Die Knochenverbindungen.

I. Bau der Knochen.

Die Knochen sind den im normalen Lebensverlaufe auf sie wirkenden Kräften gegenüber im Allgemeinen als absolut starre Körper zu betrachten. Nur in einigen besonderen Ausnahmefällen erleiden die Knochen unter dem Einflusse dieser Kräfte unbedeutende Gestaltveränderungen, z. B. die Rippen. Es ist sehr merkwürdig, dass die Knochensubstanz zur Bildung der einzelnen Knochen mit äusserst zweckmässiger Sparsamkeit verwendet ist. Wenn nämlich auf einen starren Körper mehrere Kräfte wirken, die sich mittelst seiner Starrheit Gleichgewicht halten, so entstehen in dem Körper längs gewisser Kurvensysteme Spannungen und Pressungen, und zwar ist die Intensität dieser inneren Molekularkräfte, durch deren Vermittelung sich eben die äusseren Kräfte Gleichgewicht halten, längs mancher dieser Kurven gross, längs anderer klein. An den Stellen nun, wo nur ganz unmerkliche Spannungen und Pressungen zu Stande kommen würden, ist offenbar die Anwesenheit von starrer Masse für die Festigkeit ganz überflüssig, und es kann also ein theilweise hohler Körper unter Umständen in gewissen Richtungen auf ihn wirkenden äusseren

Kräften gerade so viel Widerstand leisten, als ein ganz massiver von derselben Oberfläche eingeschlossener und darum viel schwererer. Merkwürdigerweise ist erst vor wenigen Jahren von H. MEYER entdeckt worden, dass die Anordnung der Knochenlamellen in den grössten Knochen ganz diesen Anforderungen der theoretischen Mechanik an möglichst grosse Festigkeit bei möglichst geringer Masse entspricht. Bei einem langen, starren Körper, dessen Festigkeit besonders in der Längenrichtung in Anspruch genommen wird, sei es durch Zug-, sei es durch Druckkräfte, entwickeln sich die stärksten Spannungen und Pressungen in der Nähe der äusseren Oberfläche. Dies zeigt sich in der schon längst bekannten Thatsache, dass eine Röhre beinahe ebenso viel tragen kann wie ein solider Stab von gleichen Abmessungen aus demselben Material. Auch dem Zerknicken leistet eine Röhre fast denselben Widerstand wie ein solider Stab. Dem entspricht der Bau der langgestreckten Knochen im ganzen Skelette, welche bekanntlich in der Mitte röhrenförmig gebildet sind. In den angeschwollenen Gelenkenden aber ist das ganze Innere von Knochenlamellen durchzogen, während die äussere Schicht dichter Knochensubstanz hier sehr dünn ist. Es zeigt aber die mechanische Zergliederung auch wirklich, dass an den Enden eines langen Stabes die Kurven starker Spannung und Pressung nicht bloss in der Nähe der Oberfläche ver-

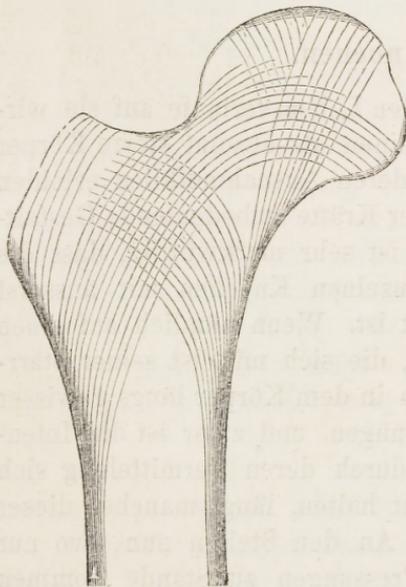


Fig. 2.

laufen. Gerade in diesen Gelenkenden hat aber MEYER näher nachgewiesen, dass die Anordnung der Knochenlamellen eine bis dahin gar nicht bemerkte Regelmässigkeit zeigt, welche sich mit überraschender Genauigkeit den Kurvenzügen anschliesst, nach welchen sich die am häufigsten auf diese Knochen wirkenden äusseren spannenden und pressenden Kräfte ins Innere fortpflanzen. Am ausgebildetsten ist diese Regelmässigkeit der Anordnung in den Knochen der unteren Extremität. Dies ist leicht zu begreifen, da gerade auf diese Knochen, welche hauptsächlich zur Unterstützung der Körperlast dienen, fast

immer dieselben Kräfte an denselben Angriffspunkten wirken, während auf die Knochen des Armes bald diese, bald jene Kraft wirkt.

Als Beispiel der regelmässigen Anordnung der Knochenlamellen in einem Gelenkende mag eine schematische Darstellung vom oberen Ende des Oberschenkels hier Platz finden, wie sie MEYER giebt. (Siehe Fig. 2.) Man sieht hier gewissermaassen vor Augen, wie sich der Druck der Körperlast vom Schenkelkopf aus in den Knochen hinein fortpflanzt und ebenso längs welcher Bahnen der Zug der am Trochanter angesetzten Muskeln in den Knochen eindringt. Ein tieferes Eingehen in diesen an sich von verschiedenen Gesichtspunkten aus sehr interessanten Gegenstand kann hier unterbleiben, da wir in unseren weiteren Entwicklungen doch keine Gelegenheit haben werden, darauf zurückzukommen. Bezüglich der Gestaltung der Lamellen in den verschiedenen Knochen muss daher auf die Originalabhandlung MEYER'S¹ verwiesen werden, wo eine genaue Erörterung einer grossen Anzahl gegeben ist.

II. Knochenverbindung durch Synchondrose.

Die Verbindungen der Knochen können wir vom mechanischen Gesichtspunkte aus eintheilen in solche, welche den beiden verbundenen Knochen eine bestimmte gegenseitige Gleichgewichtslage vorschreiben, und solche, welche das nicht thun. Bei der ersten Art der Verbindung kehren also die beiden verbundenen Knochen stets in jene bestimmte gegenseitige Lage zurück, sowie die fremden Kräfte, welche sie etwa in andere Lage gebracht hatten, aufhören zu wirken. Bei der andern Verbindungsweise giebt es allemal eine mehr oder weniger ausgedehnte stetige Reihe von Lagen, in deren jeder die Knochen liegen bleiben, wenn die Kräfte aufhören zu wirken, welche sie in dieselbe gebracht haben.

Diese Eintheilung der Knochenverbindungen nach mechanischem Gesichtspunkte deckt sich beinahe, wenn auch nicht vollständig, mit der Eintheilung nach dem anatomischen Bau in Synchondrosen und Gelenke. Alle Synchondrosen oder Symphysen nämlich gehören zu der ersten Klasse von Verbindungen mit fester Gleichgewichtslage, es gehören aber nicht alle Gelenke zur zweiten. Unter einer Synchondrose versteht man bekanntlich die Verbindung zweier Knochen durch Verklebung mittels einer Faserknorpelschicht. Die einzigen Synchondrosen, welche für uns hier in Betracht kommen, sind die der Wirbelkörper, da sie allein Bewegungen durch Muskelkräfte zulassen.

1 H. MEYER, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1867. S. 615.

Dass zwei durch Synchondrose verbundene Knochen eine feste Gleichgewichtslage besitzen müssen, ist ohne Weiteres klar, da der elastischen Zwischenscheibe eine bestimmte Gleichgewichtsfigur zukommt, welche ihren eigenen Endflächen, die zugleich die Endflächen der verklebten Knochen sind, bestimmte Lagen anweist. Aus der Gleichgewichtslage heraus können nun die Knochen in jeder geometrisch überhaupt denkbaren Weise bewegt werden, da der elastische Zwischenknorpel jede beliebige Gestaltänderung gestattet. Er kann gleichmässig gedehnt oder zusammengedrückt werden, wobei die Knochen einander so genähert oder von einander entfernt werden würden, dass ihre Punkte parallele Bahnen beschreiben. Der Knorpel kann auf der einen Seite gedehnt, auf der andern zusammengedrückt werden, dabei würde der eine Knochen, wenn der andere fest gedacht wird, eine Drehung um eine im Knorpel liegende Axe erleiden, welche jede beliebige, der Hauptflächenerstreckung des Knorpels parallele Richtung haben könnte. Endlich kann der Knorpel um eine zu seiner Flächenerstreckung senkrechte Axe auch torkelt werden, wobei der beweglich gedachte Knochen eine Drehung um eben diese Axe erfährt, endlich können die aufgezählten Bewegungsmöglichkeiten beliebig kombinirt werden, so dass keine geometrisch denkbare Art der Lageveränderung des beweglich gedachten Knochens vollständig durch die Verbindung ausgeschlossen ist. Alle Lageveränderungen können aber nur in sehr kleinem Betrage ausgeführt werden, da die Elasticitätsgrenzen des Knorpels schon bei sehr geringfügigen Gestaltveränderungen überschritten sein werden und also das gewaltsame Hervorbringen grösserer Lageveränderungen eine bleibende Schädigung des Apparates nach sich zieht, die nicht in den Bereich unserer Betrachtung fällt. Bei Gestaltveränderungen innerhalb der Elasticitätsgrenze der Knorpelschicht werden natürlich elastische Gegenkräfte wach gerufen, welche um so grösser sind, je weiter die Gestaltveränderung geht. Der unter allen Umständen sehr kleine Bewegungsumfang eines durch Synchondrose an einen zweiten fest gedachten gebundenen Knochens wird demnach abhängig sein von der Grösse der Kraft, welche darauf wirkt. Gleiche Kräfte vorausgesetzt, wird aber unter den vorhin aufgezählten Bewegungsarten die eine weiter gehen können als die andere, insbesondere sind jedesfalls die parallele Annäherung oder Entfernung äusserst beschränkt, etwas weniger die Torsion; am umfangreichsten ist die Dehnung um eine zur Dickenrichtung der Zwischenschicht senkrechte Axe. Auf die Wirbelsäule, als das einzige hier interessirende Beispiel angewandt folgt hieraus, dass ihre Bewegung im

Garzen hauptsächlich nur in Biegungen nach den verschiedenen Richtungen bestehen kann. Die Torsion ist nur in sehr geringem Maasse ausführbar und so gut wie ganz dürfte die Zusammendrückbarkeit und Dehnbarkeit der Länge nach fehlen. Von selbst versteht sich endlich noch, dass gleiche Kräfte vorausgesetzt der Bewegungsumfang einer Synchondrose nach jeder Richtung um so grösser ist, je dicker die Zwischenknorpelschicht ist und je kleiner ihre anderen Abmessungen sind.

III. Anatomisches Wesen der Gelenkverbindung.

Nach einem ganz andern Plane sind die „Gelenke“ gebildet. Die verbundenen Knochen kehren einander glatte freie Flächen zu. Eine solche Gelenkfläche ist die Oberfläche einer das Gelenkende des Knochens überziehenden Knorpelschicht. Vom Rande der einen Gelenkfläche springt an den Rand der andern ein aus Bindegewebe gebildeter Schlauch, die sogenannte Kapselmembran, über, welche somit beide Knochen verknüpft. Dieser Schlauch schliesst demnach mit den beiden Gelenkflächen zusammen eine Höhle, die „Gelenkhöhle“, vollständig ein, welche mit einer zähen Flüssigkeit, der Gelenkschmiere, gefüllt ist. Ausserhalb der Kapsel springen regelmässig noch Faserzüge sehniges Bindegewebes von dem einen Knochen zum andern über, die sogenannten Ligamenta accessoria. Ihre Befestigungspunkte an den verbundenen Knochen liegen oft weiter vom Rande der Gelenkfläche entfernt als die Befestigung der Kapsel. Das Schema der Gelenkeinrichtung ist in Fig. 3 zu sehen, der Binnenraum der Gelenkkapsel ist punktiert, *k, k* stellt die Kapselmembran dar und *a a* die Ligamenta accessoria.

Sind bei einem Gelenke die Ligamenta accessoria ringsum sehr straff und stark, so wird natürlich dem Gelenke eine bestimmte Gleichgewichtslage zukommen, denn die geringste Verschiebung nach der einen Seite wird die Bänder auf der andern Seite schon etwas dehnen und elastische Gegenkräfte in ihnen wachrufen, welche den verschobenen Knochen zurückführen, wenn die verschiebende Kraft aufhört zu wirken. Es wird auch nach irgend einer Seite nur soweit eine Verrückung des einen Knochens möglich sein, als es die Dehnbarkeit der Bänder auf der entgegengesetzten Seite zulässt, und die ganze Bewegung

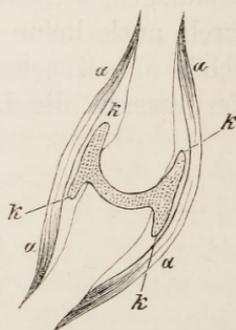


Fig. 3.

wird sich somit auf ein ganz unbedeutendes Wackeln nach allen Richtungen beschränken, ähnlich wie es bei einer Symphysenverbindung möglich ist. Diese Art von Gelenken wird also mit den Symphysen zusammen jene erste Gattung von Knochenverbindungen ausmachen, von deren Mechanismus hier keine weitere Zergliederung zu geben ist. Gelenke dieser Art, die in der Anatomie unter dem Namen Amphiarthrosen beschrieben werden, kommen vielfach im Körper vor, es gehören dahin beispielsweise die Gelenke zwischen den 3 mittleren Mittelhandknochen und der Handwurzel. In den Darstellungen der beschreibenden Anatomie werden übrigens oft noch manche andere Gelenke als Amphiarthrosen bezeichnet, die zwar einen kleinen Bewegungsumfang, aber doch einen ganz bestimmten Mechanismus haben, und die wir vom mechanischen Gesichtspunkte aus zu der anderen Gattung zählen müssen.

Von den durch die vorstehende Betrachtung ausgeschiedenen Fällen abgesehen können von zwei in einem Gelenke verbundenen Knochen alle diejenigen Stellungen eingenommen werden, welche geometrisch möglich sind, ohne dass der von der Kapsel eingeschlossene Raum verändert wird. Dieser Raum ist nämlich mit einer inkompressibeln Flüssigkeit erfüllt, deren Volum unveränderlich ist. Freilich könnte der Raum vergrößert werden, wobei dann neben der Flüssigkeit noch leerer Raum vorhanden wäre, doch wollen wir von diesem vielleicht in Wirklichkeit vorkommenden Falle einstweilen absehen. Wenn bei einer der geometrisch möglichen Lageänderungen die Kapsel und etwa vorhandene Gelenkbänder keine Dehnungen, sondern höchstens Entfaltungen erfahren, so werden da durch auch keine nennenswerthen elastischen Kräfte wach gerufen, welche die Knochen in eine ursprüngliche Lage zurückführen, wenn die äusseren, die Lage ändernden Kräfte aufhören zu wirken.

DRITTES CAPITEL.

Bewegungsmodus und Bewegungsumfang der Gelenke.

I. Allgemeines Princip.

Bei den grösseren für die Mechanik besonderes Interesse bietenden Gelenken des menschlichen Körpers ist das in Fig. 3 dargestellte Schema so verwirklicht, dass bei einer gewissen Stellung die eine Gelenkfläche sich mit einem ziemlich grossen Theile der andern in vollständiger Deckung befindet und die Gelenkkapsel legt sich ringsum — wonöthig gefaltet — überall aufs Engste den Knochen an, so dass der Binnenraum der Gelenkhöhle merklich gleich Null ist. Der oben ausgesprochene Grundsatz der Gelenkmechanik drückt sich dann so aus: Es sind nur solche und innerhalb gewisser Grenzen alle solche Stellungen der beiden Knochen möglich, bei denen der Binnenraum der Gelenkhöhle gleich Null ist. Dies kann aber offenbar nur dann stattfinden, wenn eben in allen Stellungen die eine Fläche mit einem Stücke der andern in Deckung ist. Sollen also die verschiedenen Stellungen durch stetige Fortbewegung des einen Knochens erzeugt werden, so kann diese Bewegung nur eine solche sein, bei welcher die eine Fläche auf der andern gleitet, ohne dass die Deckung jemals aufhörte. Hieraus folgt sofort, dass zu Gelenkflächen nur Flächen von ganz bestimmter geometrischer Natur verwendbar sind, nämlich von solcher Beschaffenheit, dass ein Stück derselben auf ihrem Ebenbilde oder Abdrucke in stetiger Bewegung schleifen oder gleiten kann, ohne dass an irgend einer Stelle ein Klaffen eintritt.

Es giebt nur eine einzige Gattung von Flächen, welche der soeben ausgesprochenen Forderung genügen, nämlich die Schraubenflächen. Eine Schraubenfläche wird in der Vorstellung folgendermaassen erzeugt: Man denke sich eine beliebige ebene Kurve und eine gerade Linie in der Ebene derselben. Man denke sich nun die Ebene um diese Linie als Axe gedreht und zugleich diese Linie, mit welcher die Ebene fest verbunden zu denken ist, in ihrer Richtung verschoben, so dass zwischen dem Drehungswinkel und der Verschiebungsstrecke beständig dasselbe Verhältniss besteht, dann beschreibt die Kurve eine Schraubenfläche.

Bei der gewöhnlichen Schraubenspindel mit scharfer Kante ist

die erzeugende Kurve die Zusammenstellung der beiden Schenkel eines gleichschenkligen Dreiecks, dessen Grundlinie als Axe dient.

Nimmt man von einer Schraubenfläche ein Stück und macht von einem Theile desselben einen Abdruck, so kann man diesen auf dem ersteren hin- und herschieben, ohne dass irgendwo ein Klaffen eintritt, wenn die Bewegung in derselben Weise geschieht, wie bei Erzeugung der Schraubenfläche, d. h. wenn die Bewegung sich aus Drehung um die Axe und aus Verschiebung längs der Axe in bestimmtem Verhältniss zusammensetzt. Die Strecke, um welche die Schraubenfläche bei dieser Bewegung längs der Axe fortschreitet, während eine volle Umdrehung vollendet wird, heisst die Ganghöhe der Schraube.

Da, wie gesagt, keine andere Gattung von Flächen existirt, welche der an Gelenkflächen zu stellenden Anforderung genügt, so müssen alle Gelenkflächen, zwischen denen eine umfangreiche Schleifbewegung möglich sein soll, Schraubenflächen sein, und die Bewegung im Gelenke kann nur eine schraubende sein, d. h. bestehen in Drehung um eine Axe und gleichzeitiges Fortschreiten längs dieser Axe.

Man sieht leicht, dass unter den Schraubenflächen eine Art besonders ausgezeichnet sein muss. Bei der Erzeugung einer Schraubenfläche kann nämlich das Verhältniss zwischen der Drehung und der Fortschreitung jedes beliebige sein, also kann auch die Fortschreitung gegen die Drehung verschwindend klein oder vollständig gleich Null sein, dann wird die Ganghöhe der Schraube unmerklich klein oder absolut Null. Diese besondere Art der Schraubenflächen nennt man „Rotationsflächen“. Die schleifende Bewegung eines Stückes einer solchen Fläche auf ihrem ruhend gedachten Ebenbilde oder Abdruck reducirt sich natürlich auf die blosse Drehung um eine Axe ohne Fortschreitung längs derselben.

Ein Gelenk, dessen beide maassgebende Flächen Abschnitte von solchen Rotationsflächen sind, wird ein Charniergelenk oder Ginglymus genannt.

Schraubengelenke und Charniergelenke haben das Eigenthümliche, dass bei der Bewegung in ihnen jeder Punkt des beweglich gedachten Knochens eine ganz bestimmte Kurve beschreibt und zwar beim Schraubengelenke eine Schraubenlinie, beim Charniergelenke einen Kreis. Ist also ein Punkt des beweglich gedachten Knochens durch eine Bewegung von einem Orte an einen anderen gebracht, so kann er zum Ausgangsorte nur zurückkommen, indem er genau dieselbe Bahn im umgekehrten Sinne durchläuft. Im Ginglymus wäre der Fall freilich geometrisch denkbar, dass der Punkt durch Vollen-

den eines ganzen Umlaufes zum ersten Orte zurückkehrte, dies ist aber aus anderen Gründen in keinem Gelenke wirklich ausführbar. Wegen dieser Eigenschaft der Schraubengelenke und Charniergelenke die jedem Punkte des beweglich gedachten Knochens eine bestimmte Bahn vorschreibt, kann man sie passend mit einem von REULEAUX in die Kinematik eingeführten Ausdrücke als „zwangläufige“ Vorrichtungen bezeichnen.

Unter allen denkbaren Rotationsflächen nimmt eine, nämlich die Kugelfläche, eine ganz besondere bevorzugte Stellung ein. Dieselbe Kugelfläche wird nämlich erzeugt durch Drehung eines Kreises um jeden beliebigen seiner Durchmesser als Axe. Ein Stück einer Kugelfläche bleibt daher mit seinem ruhend gedachten Ebenbilde in Deckung oder schleift auf seinem Abdrucke nicht bloss bei Drehung um eine bestimmte Gerade, sondern bei Drehung um jeden beliebigen Durchmesser der Kugel als Axe. Man kann natürlich auch die verschiedenen Durchmesser der Kugel bei einer stetigen Bewegung abwechselnd die Rolle der Axe spielen lassen, namentlich auch in der Art, dass in stetigem Wechsel andere Durchmesser Axen werden und jeder nur für eine unendlich kleine Drehung die Rolle der Axe spielt. Ist ein Gelenk durch Zusammenstossen zweier Kugelstücke gebildet, so nennt man es eine Arthrodie. Die Beweglichkeit in einer solchen muss nach den soeben in Erinnerung gebrachten Eigenschaften der Kugelfläche ganz besondere Eigenthümlichkeiten darbieten. Vor allem ist ersichtlich, dass ein solches Gelenk nicht zwangläufig ist. Ein Punkt des beweglich gedachten Knochens kann nämlich von einem Ort zu einem andern nicht bloss auf einem einzigen, sondern auf verschiedenen Wegen gelangen. Jeder Punkt des beweglich gedachten Knochens ist nämlich nur gezwungen, auf einer zur Gelenkkugel concentrischen Kugelfläche zu verbleiben, kann aber auf ihr jede beliebige Bahn beschreiben und mithin auf einem ganz andern Wege zu seinem Ausgangsorte zurückkommen, als auf welchem er ihn verlassen hat.

II. Bewegungsmodus der Arthrodie.

Für das Verständniss der möglichen Bewegungen in einem arthrodischen Gelenke, zu welchen auch die Bewegungen des Augapfels gehören, ist es von Wichtigkeit, einige geometrische Sätze über diese Art der Bewegung im Sinne zu haben, welche hier eingeschaltet werden sollen. Vor Allem ist hervorzuheben, dass die in Rede stehende Bewegung auch dadurch charakterisirt werden kann, dass ein

Punkt des beweglich gedachten Körpers an seinem Orte im absoluten Raume verbleiben muss und dass nur dieser an seinem Orte zu verbleiben braucht. Man nennt ihn beim arthrodischen Gelenke gemeinlich den Drehpunkt. Es ist gut zu bemerken, dass dieser Punkt nicht gerade nothwendig innerhalb der Grenzen des beweglich gedachten Körpers liegen muss. Wenn wir z. B. die Bewegungen des Schultergelenkes betrachten und das Schulterblatt beweglich, den Oberarm im absoluten Raume fest denken, so liegt der Drehpunkt nicht innerhalb der Grenzen des beweglichen Körpers, aber er kann und muss doch mit ihm in unveränderlicher Verbindung gedacht werden.

Wenn das beweglich gedachte Punktsystem aus einer ersten Lage in eine zweite auf irgend einem Wege übergeführt ist, so dass ein Punkt seinen Ort im absoluten Raume behauptet hat, so giebt es allemal eine gerade Linie in dem System, welche in der zweiten Stellung desselben wieder dieselbe Lage im absoluten Raume hat wie bei der ersten. Es kann also das Punktsystem aus der ersten in die zweite Lage auch gebracht werden durch einfache Drehung um eine

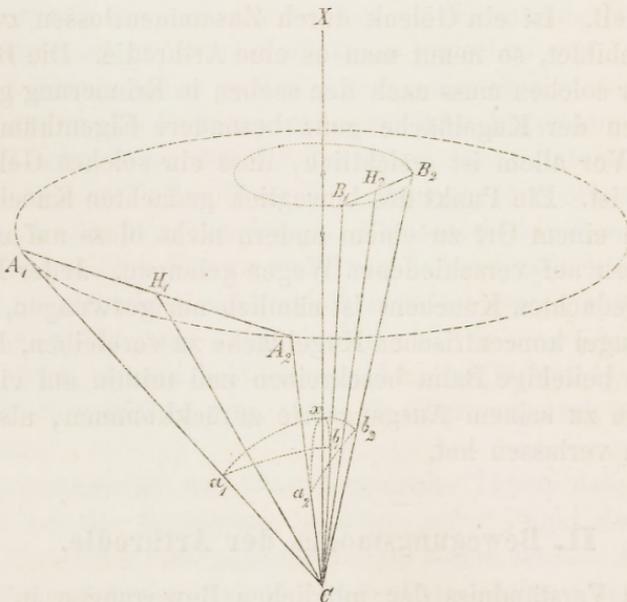


Fig. 4.

gewisse durch den festbleibenden Punkt gehende Gerade. Um diesen Satz zu beweisen bemerken wir zuerst, dass jede Lage des Systems bestimmt ist durch die Lage von zwei Punkten desselben, von

denen keiner mit dem festbleibenden Drehpunkt zusammenfällt. Es seien nun A_1 und B_1 die Orte zweier beliebiger Punkte des Systems in ihrer ersten Lage und $A_2 B_2$ die Orte derselben Punkte in der zweiten Lage, endlich C der Drehpunkt. Es ist also der Abstand $A_1 C = A_2 C$, ebenso $B_1 C = B_2 C$, sowie auch $A_1 B_1 = A_2 B_2$. Wir halbiren nun den Winkel $A_1 C A_2$ durch die Gerade CH_1 und den Winkel $B_1 C B_2$ durch die Gerade CH_2 . Längs CH_1 errichten wir auf der Ebene $A_1 C A_2$ eine zu ihr senkrechte Ebene, ebenso längs CH_2 eine zu $B_1 C B_2$ senkrechte Ebene, die Durchschnittlinie CX dieser beiden Ebenen ist die Axe, durch Drehung um welche das System aus der ersten in die zweite Lage gebracht werden kann. Erstens ist nämlich leicht zu sehen, dass durch irgend eine Drehung um die Axe CX die Linie CA_1 in die Lage CA_2 , also A_1 nach A_2 kommen muss, da CX durch C geht und einer Ebene angehört, zu der CA_1 und CA_2 symmetrisch liegen. Aus demselben Grunde kann durch eine bestimmte Drehung um CX CB_1 nach CB_2 kommen. Um aber einzusehen, dass dieselbe bestimmte Drehung um CX den Punkt B_1 nach B_2 bringt, welche A_1 nach A_2 versetzt, muss noch bewiesen werden, dass die Ebenen $[CX, CB_1]$ und $[CX, CB_2]$ denselben Winkel miteinander bilden wie die Ebenen $[CX, CA_1]$ und $[CX, CA_2]$. Dies beweist sich aber leicht aus der Congruenz zweier sphärischer Dreiecke. Die Seiten des einen sind die Winkel XCA_1 , XCB_1 und $A_1 CB_1$ (in Fig. 4 angedeutet durch die punktirten Bögelchen xa_1 , xb_1 und $a_1 b_1$), die Seiten des andern sind die Winkel XCA_2 , XCB_2 und $A_2 CB_2$ (angedeutet in der Figur durch xa_2 , xb_2 und $a_2 b_2$). Die letzteren drei Winkel sind aber den drei ersteren der Reihe nach gleich und zwar ist $XCA_1 = XCA_2$ und $XCB_1 = XCB_2$ zufolge der Kontraktion der Linie CX . $A_1 CB_1$ aber ist gleich $A_2 CB_2$, weil das Punktsystem als unveränderlich vorausgesetzt ist, die drei Punkte A_1 , C und B_1 also nach der Drehung noch dieselbe Lage gegeneinander einnehmen wie vorher. Da hiernach die zwei körperlichen Dreiecke, deren Kanten CA_1 , CX , CB_1 und CA_2 , CX , CB_2 sind, kongruent sein müssen, so ist auch der Winkel zwischen den Ebenen $A_1 CX$ und XCB_1 gleich dem Winkel zwischen $A_2 CX$ und XCB_2 . Zieht man nun von jedem dieser Winkel ab den Winkel zwischen den Ebenen $A_2 CX$ und XCB_1 , so zeigt sich, dass die Reste, nämlich der Winkel zwischen den Ebenen $A_1 CX$ und $A_2 CX$ einerseits und der Winkel zwischen $B_1 CX$ und $B_2 CX$ einander gleich sein müssen. Wird also eine Drehung vom Betrage dieses Winkels um die Linie CX als Axe vorgenommen, so kommt A_1 nach A_2 und gleichzeitig B_1 nach B_2 , also

das ganze System aus der ersten Lage in die zweite ganz willkürlich angenommene, was zu beweisen war.

Um eine durch den Drehpunkt gehende Gerade kann natürlich der Körper zweierlei Drehungen ausführen, bei denen allerdings jeder Punkt dieselben Orte durchläuft, aber in entgegengesetzter Reihenfolge. Damit nun mit der Richtung der Axe zugleich der Sinn der Drehung um dieselbe gegeben werden könne, hat man folgende Verabredung getroffen. Man giebt als Drehungsaxe nicht die ganze unendliche Gerade, sondern bloss die eine Hälfte vom Drehpunkt ausgehend nach der einen Seite ins Unendliche, und setzt fest, dass um eine solche Halbaxe nur eine Drehung in dem Sinne stattfinden soll, dass ein in dieser Halbaxe mit den Füßen im Drehpunkte stehender Beobachter die Drehung so sehe, wie er die Drehung der Uhrzeiger sieht, wenn er das Zifferblatt vor sich hat. Die Axe für die entgegengesetzte Drehung um dieselbe Richtung ist dann in der That von der ersteren unterscheidbar, denn sie ist die Verlängerung der ersteren über den Drehpunkt hinaus nach der andern Seite.

Es seien jetzt OA und OB (Fig. 5) zwei Drehungshalbaxen im absoluten Raume mit Rücksicht auf die soeben gemachte Festsetzung und der um O drehbare Körper sei zuerst um OA um einen Winkel 2α und dann um OB um einen Winkel 2β gedreht. Dann findet man die Linie des Körpers, welche zuletzt wieder ihre alte Lage im absoluten Raume einnimmt, welche nach dem soeben bewiesenen Satz immer existirt, sehr leicht als Durchschnitt zweier Ebenen. Die eine durch OA gelegt macht mit der Ebene OA, OB nach

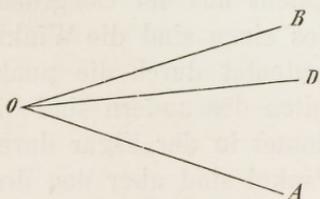


Fig. 5.

oben den Winkel α , die andere durch OB gelegt mit der Ebene OA, OB den Winkel β ebenfalls nach oben. Die Durchschnittslinie OD^1 dieser beiden Ebenen nämlich wird bei der ersten Drehung um OA ebenso tief unter die Ebene des Papieres gebracht, als sie zuerst über derselben lag, und dann bei der Drehung um die Axe OB wird sie wieder um ebensoviel über die Ebene der Zeichnung erhoben.

In dem körperlichen Dreiecke, dessen Kanten OA, OB, OD sind, gilt nach einem bekannten Satze der sphärischen Trigonometrie die Gleichung $\sin AOD : \sin BOD = \sin \beta : \sin \alpha$. Diese Beziehung, die von der Grösse der halben Drehungswinkel α und β ganz unabhängig ist, gilt also offenbar auch noch für unendlich kleine Werthe

¹ OD ist von O aus über die Ebene der Zeichnung hervorragend zu denken.

dieser Winkel. Für solche fällt aber die Axe OD merklich in die Ebene AOB und ihre Richtung ist dann offenbar diejenige der Diagonale eines Parallelogrammes, dessen anliegende Seiten in die Richtungen OA und OB fallen und deren Längen den Grössen $\sin \alpha$ und $\sin \beta$ proportional sind. In der That schliesst ja diese Diagonale OD (Fig. 6) mit OA und OB Winkel ein, deren Sinus sich nach dem bekannten Satze der ebenen Trigonometrie verhalten wie die gegenüberliegenden Seiten in dem Dreiecke, in welchem beide Winkel vorkommen, d. h.

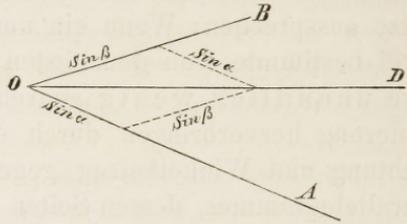


Fig. 6.

$$\sin AOD : \sin BOD = \sin \beta : \sin \alpha.$$

Da die Winkel α und β aber unendlich klein sind, können ihre Werthe selbst an die Stelle ihrer Sinus treten oder auch die eigentlich als Drehungsbeträge gedachten doppelten Winkel 2α und 2β .

Der Sinn der einen Drehung, welche die beiden successiven unendlich kleinen Drehungen um OA und OB ersetzen kann, ist durch die Richtung der Diagonale von O aus schon gegeben, es ist aber leicht, auch den Betrag dieser Drehung zu bestimmen. Wir denken uns zu dem Ende in der Axe OA (Fig. 7) einen Punkt J .

Er wird bei der Drehung um OA gar keine Lageänderung erleiden, sondern nur bei der Drehung um B senkrecht aus der Ebene AOB heraussteigen und etwa zu dem Punkte L gelangen. Ist JH senkrecht auf OB , so ist bei der Kleinheit des

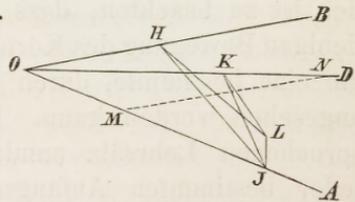


Fig. 7.

Drehungswinkels $2\beta = \frac{JL}{HJ}$. Soll die-

selbe Verschiebung von J angesehen werden als eine Drehung um OD als Axe, so muss der Winkelausschlag dieser Drehung, der

durch 2γ bezeichnet sein mag, $= \frac{JL}{JK}$ sein, wenn JK senkrecht

auf OD gezogen ist. Ziehen wir jetzt irgendwo eine Linie MN parallel zu OB , so gilt für das Dreieck OMN die Gleichung

$$ON : MN = \sin NMO : \sin NOM = \sin BOA : \sin DOA.$$

Andererseits ist

$$JK = OJ \cdot \sin DOA \text{ und } JH = OJ \cdot \sin BOA,$$

also

$$\frac{2\gamma}{2\beta} = \frac{\sin BOA}{\sin DOA} = \frac{ON}{MN}.$$

Der Betrag der einen Drehung, welche zwei successive unendlich

kleine Drehungen ersetzt, verhält sich also zu der einen wie die Länge der Diagonale des Parallelogrammes, zur Länge der einen Seite, wenn ein solches konstruiert ist, so, dass auf den Richtungen der beiden Axen Längen abgetragen werden, welche sich, wie die Drehungswinkel zu einander verhalten.

Das Resultat dieser Betrachtung können wir in folgendem Lehrsätze aussprechen: Wenn ein um einen Punkt drehbarer Körper um zwei bestimmte, von dem festen Punkte ausgehende Gerade successive unendlich wenig gedreht wird, so kann man dieselbe Lageänderung hervorbringen durch eine einzige Drehung, deren Axenrichtung und Winkelbetrag gegeben ist durch die Diagonale eines Parallelogrammes, dessen Seiten vom festen Punkte aus abgemessene Strecken der gegebenen Drehungsaxen sind, deren Längen den Beträgen der gegebenen unendlich kleinen Drehungen proportional sind. Man kann diesen Lehrsatz auch so ausdrücken, dass man sagt: Die zwei unendlich kleine Drehungen ersetzende eine Drehung findet sich geradeso wie die Resultirende zweier am selben Punkte angreifender Kräfte, wenn man eine Drehung als eine auf ihrer Axe abgemessene Strecke darstellt, deren Länge dem Drehungswinkel proportional ist.

Mit Hülfe der ausgesprochenen Sätze kann man von einer beliebigen endlich ausgedehnten Bewegung eines um einen Punkt drehbaren Körpers eine sehr klare Anschauung gewinnen. Erstens nämlich ist zu beachten, dass ein unendlich kleines Element einer beliebigen Bewegung des Körpers jedesfalls als unendlich kleine Drehung um eine bestimmte, durch den festen Punkt gehende Linie als Axe angesehen werden kann. Dies geht schon aus dem S. 255 ausgesprochenen Lehrsatz unmittelbar hervor, wonach der Körper aus jeder bestimmten Anfangsstellung in jede bestimmte Endstellung auch durch Drehung um eine bestimmte Axe gebracht werden kann. Ist die Endlage von der Anfangslage aber nur unendlich wenig verschieden, so kann man die ausgesprochene Behauptung auch auf das soeben erwiesene Princip der Zusammensetzung unendlich kleiner Drehungen begründen. Sei nämlich durch die ganz beliebige unendlich kleine Lageänderung der Punkt A_1 nach A_2 und der Punkt B_1 nach B_2 gekommen, während der Drehpunkt O an seinem Orte geblieben ist. Diese Lageänderung konnte nun offenbar durch zwei unendlich kleine Drehungen hervorgebracht werden, indem man zuerst den Körper um die Durchschnittslinie der beiden Ebenen OA_1B_1 und OA_2B_2 soweit drehte, bis die erste mit der zweiten zusammenfällt, und dann um eine zu OA_2B_2 in O senkrechte Gerade soweit, bis der Punkt A_1 mit A_2 und B_1 mit B_2 zusammenfällt. Diese

beiden unendlich kleinen Drehungen kann man aber nach dem vorhin erwiesenen Satze durch eine unendlich kleine Drehung um eine gewisse Axe ersetzen. Eine aus ganz beliebigen successiven unendlich kleinen Lageänderungen bestehende endliche Lageänderung des Körpers kann demnach aufgefasst und dargestellt werden als eine Reihenfolge unendlich kleiner Drehungen, von denen im Allgemeinen immer die folgende um eine andere Linie des Körpers als Axe geschieht, als die vorhergehende. Die Linie, welche bei einer unendlich kleinen Drehung die Rolle der Axe spielt, nennt man die augenblickliche Drehungsaxe.

Es ist sehr wichtig, zu beachten, dass allemal, wenn beim folgenden elementaren Drehungsakt eine andere Linie des bewegten Körpers die Rolle der augenblicklichen Drehungsaxe übernimmt, diese auch im absoluten Raume eine andere Lage hat und vice versa. In der That rückt ja während des elementaren Drehungsaktes keine andere Linie des bewegten Körpers an die Stelle des absoluten Raumes, welche die augenblickliche Drehungsaxe einnahm, wenn also im folgenden Augenblicke eine andere Linie des Körpers Drehungsaxe sein soll, so muss sie auch eine andere Lage im absoluten Raume haben. Ebenso ist andererseits klar: soll die neue augenblickliche Drehungsaxe eine andere Lage im absoluten Raume haben, so muss es auch eine andere Linie des Körpers sein, denn die Linie des Körpers, welche im vorhergehenden Augenblicke Drehungsaxe war, ist ja eben als solche an ihrer Stelle im absoluten Raume geblieben. Zwei aufeinanderfolgende Lagen der augenblicklichen Drehungsaxe im absoluten Raume schliessen denselben Winkel miteinander ein, welchen die beiden Linien des bewegten Körpers miteinander machen, welche einander in der Rolle der augenblicklichen Drehungsaxe ablösen. In der That sei OA bei der ersten Elementardrehung die augenblickliche Axe und sei OB die Linie des Körpers, welche hernach zur augenblicklichen Drehungsaxe werden soll, in ihrer ursprünglichen Lage vor dem ersten Drehungsakte, dann ist AOB der Winkel, welchen die Linien des Körpers miteinander bilden, welche nacheinander augenblickliche Drehungsaxen werden. OB übernimmt aber diese Rolle nicht in ihrer ursprünglichen Lage sondern nachdem sie durch Drehung um OA an eine andere Stelle des absoluten Raumes, z. B. nach OB_1 gekommen ist. AOB_1 ist also der Winkel, den die beiden aufeinanderfolgenden Lagen der augenblicklichen Axe im absoluten Raume miteinander bilden, und dieser Winkel ist offenbar gleich AOB , da OB_1 nur eine neue Lage der Linie OB des bewegten Körpers ist. Man kann den soeben be-

wiesenen Satz auch kurz so ausdrücken: die augenblickliche Drehungsaxe schreitet im bewegten Körper und im absoluten Raume stets mit derselben Winkelgeschwindigkeit fort.

Man kann hiernach jeder endlichen Bewegung eines um einen Punkt drehbaren Körpers zwei Systeme von Linien zuordnen, die alle durch den Drehpunkt gehen und von denen das eine mit dem Körper fest verbunden zu denken, alle diejenigen Linien desselben enthält, welche nacheinander die Rolle der augenblicklichen Drehungsaxe spielen. Das andere System ist im absoluten Raume fest zu denken und besteht aus den aufeinanderfolgenden Lagen der augenblicklichen Drehungsaxe im absoluten Raume. Jedes dieser Liniensysteme bildet eine Kegelfläche. Schneiden wir beide durch eine um den Drehpunkt beschriebene Kugelfläche, so müssen die abgeschnittenen Stücke der Kegelmäntel denselben Flächenraum haben, da bei Ausführung der Bewegung nach der Reihe jede Seite des einen Kegels einmal mit einer Seite des anderen zur Deckung kommt. Man kann sich also die ganze Bewegung vorstellen, indem man die Mantelfläche des mit dem Körper fest verbunden zu denkenden Kegels an der Mantelfläche des im absoluten Raume festen ohne Gleiten abrollt. Bei einer Bewegung, die aus endlichen Drehungen um einzelne Axen, die auch in endlichem Winkelabstand voneinander liegen können, so verwandeln sich die beiden Kegel in zwei Pyramiden mit endlichen Kanten- und Flächenwinkeln.

Der wirkliche Vorgang einer Bewegung eines arthrodisch verbundenen Gliedes durch alle seine Phasen hindurch kann nicht wohl anders vorgestellt werden als auf Grund der vorstehend mitgetheilten, von POINSOT entwickelten Lehren. Gilt es aber bloss die durch eine solche Bewegung hervorgebrachte Lage des Gliedes mit der Anfangslage in Beziehung zu setzen, so kann man sich auch noch auf andere Arten eine deutliche Vorstellung machen. Am einfachsten scheint dies möglich zu sein mit Hilfe des weiter oben bewiesenen Satzes, wonach man jede irgendwie entstandene Lageänderung auch hervorgebracht denken kann durch Drehung um eine bestimmte Axe. Man brauchte also nur die Lage einer Axe und die Grösse eines Drehungswinkels zu geben, um die Beziehung der schliesslichen Lage auf eine bestimmte Anfangslage darzustellen. Nun ist aber die Vorstellung von der Richtung einer Linie im Raume schon einigermaßen schwierig festzuhalten und es wird also diese Art der Darstellung keine sehr zweckmässige sein. In der That haben auch die Anatomen schon seit längerer Zeit einer anderen Darstellungsweise den Vorzug gegeben, die freilich meines Wissens nirgend präcis ausgesprochen ist,

die aber stillschweigend bei der auf arthrodische Gelenke bezüglichen Namengebung vorausgesetzt ist. Schon vor Jahren habe ich in meiner medicinischen Physik eine strenge Fassung dessen vorgeschlagen, was den Urhebern der anatomischen Namengebung vorgeschwebt zu haben scheint. Es besteht in Folgendem: Man denkt sich das arthrodisch bewegliche Glied in einer an sich willkürlich zu wählenden, ein für allemal bestimmten Anfangslage. Für Oberarm und Oberschenkel, auf die sich das hier zu sagende vorzugsweise bezieht, würde es sich empfehlen, diejenige Lage als Anfangslage zu wählen, welche die Schwere dem hängenden Gliede bei aufrecht gestelltem Rumpfe anweist. Jetzt denke man sich durch den Drehpunkt drei aufeinander senkrechte Linien, die „Hauptaxen“. Ihre Wahl ist wie die der Anfangslage an sich willkürlich, doch empfiehlt sich auch hier eine gewisse Lage besonders. Vor Allem wird man bei der länglichen Gestalt der vorzugsweise in Betracht kommenden beiden Knochen geneigt sein, zur einen Hauptaxe eine Linie zu wählen, in welcher die Längenerstreckung derselben zu messen wäre, etwa die Linie, welche den Drehpunkt mit dem Schwerpunkt des Knochens verbindet. Die beiden andern Hauptaxen liegen alsdann wagrecht und da wird man denn endlich noch die eine zur symmetrisch theilenden Mittelebene des Körpers senkrecht, die andere ihr parallel ziehen. Drehung genau um die Verticalaxe nennt man in der Anatomie „Rotation“ schlechthin, Drehung um die sagittale Axe „Ab- oder „Adduction“ und Drehung um die frontale Axe „Flexion“ oder „Extension“, je nach dem Sinne, in welchem sie geschieht. Man kann nun jede Lage des beweglichen Gliedes genau charakterisiren durch drei Winkelgrößen, nämlich folgendergestalt: aus der Anfangslage wird das Glied in die neue Lage gebracht durch successive Flexion (resp. Extension), um den Winkel α Abduktion (resp. Adduktion) um den Winkel β und Rotation (nach Aussen oder Innen) um den Winkel γ . Sollen aber die drei Winkel α , β , γ zur Bestimmung der Lage des Gliedes genügen, so sind noch zwei Festsetzungen zu machen, die sich aus dem Sprachgebrauche der Anatomie nicht gerade mit voller Bestimmtheit herausdeuten lassen. Erstens nämlich muss festgesetzt werden, ob man die drei Hauptaxen im absoluten Raume oder in dem beweglich gedachten Gliede fest denken will. Wenn ich den Sprachgebrauch der Anatomen richtig verstehe, so scheint mir demselben besser die Annahme zu entsprechen, dass man die Hauptaxen mit dem Gliede unveränderlich verbunden denkt, wenigstens was die sogenannten Rotationen betrifft, scheint es mir unzweifelhaft, dass die Anatomen unter einer Rotation des flektirten Schenkels lieber eine

Drehung desselben um die neue Lage der Längsrichtung desselben verstehen werden als eine Drehung um die im Becken fest gebliebene Vertikale, bei welcher die Längsrichtung des Schenkels einen Kegel beschreiben würde. Ich möchte daher vorschlagen, die Hauptaxen mit dem beweglich gedachten Gliede unveränderlich verbunden zu denken.

Es muss aber zweitens ein für allemal die Reihenfolge festgestellt sein, in welcher die drei Hauptbewegungen in bestimmtem Betrage auszuführen sind, um die Endlage herbeizuführen, denn wenn man zuerst um β^0 abducirt, dann um α^0 flektirt, so kommt schon das Glied in eine andere Lage, als wenn man zuerst um α^0 flektirt und dann um β^0 abducirt. Hierüber lässt sich nun gar nichts aus dem Sprachgebrauche der Anatomie entnehmen, da dieselbe die von ihr an die Hand gegebenen Vorstellungen noch nie zu exakten Bestimmungen verwendet hat. Ich mache also ganz willkürlich und unmaassgeblich den Vorschlag, die Drehung um die sagittale Axe voranzustellen, dann die um die frontale und zuletzt die um die vertikale folgen zu lassen.

Es ist vielleicht gut, hier besonders vor dem Missverständnisse zu warnen, dass die Darstellung der Lage eines arthrodisch bewegten Knochens durch Drehungen um drei 3 aufeinander senkrechte Axen irgend etwas zu thun hätte mit der später zu erörternden Zerlegung des Momentes eines auf ein solches Gelenk wirkenden Muskels in drei komponirende Momente um die drei Hauptaxen.

Eine andere Art, die Lage eines arthrodisch beweglichen Körperteiles auf eine willkürlich gewählte Primärlage zu beziehen, ist folgende. Man zeichnet eine Linie des Körpers als Axe besonders aus und denkt sich in der Primärlage die zu ihr durch den Drehpunkt senkrecht gelegte Ebene. Man kann nun offenbar jede mögliche Lage des Körpers hervorbringen, indem man ihn zuerst um eine in der soeben definirten Ebene gelegene Axe dreht und sodann um die vorhin ausgezeichnete Hauptaxe in ihrer durch die erste Drehung erlangten Lage. Bei dieser Lagebestimmung wie bei jeder der andern ist die Kenntniss von drei Winkelgrössen erforderlich und ausreichend, hier erstens der Winkel, welchen die in der zur Hauptaxe senkrechten Ebene gelegene Axe mit einer willkürlich zu wählenden festen Linie bildet zweitens der Winkelausschlag der ersten Drehung um diese Axe und drittens der Winkelausschlag der zweiten Drehung um die Hauptaxe in ihrer neuen Lage.

Die zuletzt beschriebene Art der Definition einer beliebigen Lage des beweglichen Körpers wird bekanntlich häufig gebraucht zur De-

definition der Stellungen des Augapfels, der ja ganz wie in einem arthrodischen Gelenke beweglich ist. Bekanntlich sind die Augenstellungen, welche wir faktisch hervorbringen können, dadurch ausgezeichnet, dass bei ihnen der Winkelausschlag der Drehung um die Hauptaxe (die Sehaxe) die sogenannte Raddrehung immer nahezu gleich Null ist.

III. Sattelgelenk und Ovalgelenk.

Wie oben hervorgehoben, kann in aller geometrischen Strenge nur von einer Schraubenfläche (einschliesslich Rotationsfläche und Kugelfläche) ein Stück auf seinem ruhend gedachten Ebenbilde gleiten, ohne dass die vollständige Deckung aufhört. Sehr annähernd können dies aber auch kleine Stücke von Flächen anderer Natur in beschränktem Umfange. Da nun bei den Gelenken des menschlichen Körpers überall eine ganz vollkommene Deckung der sich berührenden Flächen nicht erforderlich ist und in Wirklichkeit nicht stattfindet, so ist es denkbar, dass grössere Gelenke mit ansehnlichem Bewegungsumfang gebildet sind durch Zusammenstossen andersartiger Flächen, deren Gestalt einen andern Bewegungsmodus bedingt als den der Schraubenbewegung resp. Drehung um eine Axe oder um einen Punkt. In der That kommen zwei solche Gelenkformen am menschlichen Skelette vor, das Sattelgelenk und das Ovalgelenk.

Die Möglichkeit dieser beiden Arten von Gelenken erhellt aus folgender Betrachtung. Man denke sich einen Kreisbogen ab von mässigem Centriwinkel (höchstens etwa 45°). Dreht man ihn um eine in seiner Ebene gelegene Axe AB , welche nicht durch seinen Mittelpunkt c geht, so entsteht eine Rotationsfläche, welche wesentlich verschiedene Gestalt zeigt je nachdem die Axe auf der konvexen oder auf der konkaven Seite des Bogens liegt. Betrachten wir zunächst den ersten durch Fig. 8 anschaulich gemachten Fall. Die durch volle Umdrehung erzeugte Fläche gleicht dem mittleren Streifen eines einschaligen Rotationshyperboloides. Sticht man aus dieser Fläche ein Stück

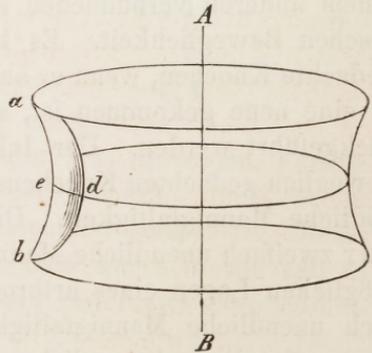


Fig. 8.

heraus durch einen Cylinder, dessen Axe die Gerade ce ist, so erhält man ein sattelförmiges Flächenstück. Die vordere Hälfte seiner Umfangslinie würde etwa wie adb verlaufen und seine Modellirung ist durch leichte Schattirung in der Figur angedeutet. Die hintere Hälfte der Umfangslinie ist durch das undurchsichtig gedachte Flächenstück verdeckt.

Ein Flächenstück von der beschriebenen Form kann auf seinem ruhend gedachten Ebenbilde in aller geometrischen Strenge schleifen wenn man es dreht um die Axe AB , die ja die Axe der Rotationsfläche ist. Es kann aber zweitens auch schleifen, ohne dass ein erhebliches Klaffen eintritt, wenn man es dreht um eine Linie als Axe, welche in dem Punkte c senkrecht zur Ebene der Zeichnung steht, und folglich die Axe AB senkrecht überkreuzt. Bei den wirklichen Gelenken, welche nach diesem Schema gebildet sind, hat natürlich keine der beiden einander überkreuzenden Axen einen Vorzug vor der anderen, da absolut geometrisch strenge Deckung der Gelenkflächen im wirklichen Körper überall nicht stattfindet.

Solche sattelförmige Flächenstücke können aber nicht bloss aus einer bestimmten Anfangslage heraus um zwei Axen gedreht werden, ohne dass die Deckung aufhört. Vielmehr kann auch, nachdem um die eine Axe eine Drehung erfolgt ist, um die andere in der neuen Lage, welche sie durch die erste Drehung erlangt hat, wieder eine Drehung erfolgen, ohne dass ein störendes Klaffen eintritt. Es erhält dadurch die ganze Beweglichkeit eines durch ein Sattelgelenk mit einem anderen verbundenen Knochens Aehnlichkeit mit der arthrodischen Beweglichkeit. Es kann nämlich auch hier der beweglich gedachte Knochen, wenn er auf einem Wege aus der Anfangsstellung in eine neue gekommen ist, auf einem anderen Wege in jene zurückgeführt werden. Der Inbegriff aller möglichen Stellungen des beweglich gedachten Knochens ist also eine mindestens zweifach unendliche Mannigfaltigkeit. Dieser Inbegriff ist aber hier auch eine nur zweifach unendliche Mannigfaltigkeit, während der Inbegriff aller möglichen Lagen eines arthrodisch beweglichen Knochens eine dreifach unendliche Mannigfaltigkeit ist. Denkt man sich nämlich in dem arthrodisch beweglichen Knochen eine bestimmte, durch den Drehpunkt gehende Gerade, so bildet der Inbegriff ihrer möglichen Lagen offenbar schon eine zweifach unendliche Mannigfaltigkeit. Für jede dieser Lagen giebt es aber noch unendlich viele Stellungen des arthrodisch beweglichen Knochens, die bei Drehung desselben um diese Gerade als Axe durchlaufen werden. Stellt man sich in dem durch ein Sattelgelenk verbundenen beweglich gedachten Knochen

eine bestimmte Gerade vor, etwa diejenige, welche die beiden Axen in der Anfangsstellung senkrecht schneidet, so ist die Mannigfaltigkeit ihrer möglichen Lage im Raume ebenfalls eine zweifach unendliche Mannigfaltigkeit, aber damit ist auch die ganze Mannigfaltigkeit der möglichen Stellungen des Knochens erschöpft, da die Lage dieser Linie die Stellung des im Sattelgelenke beweglichen Knochens vollständig bestimmt, indem um sie in diesem Gelenke keine Drehung ohne Klaffen ausführbar ist.

Einen ganz ähnlichen Bewegungsmechanismus erhält man, wenn man ein verhältnissmässig kleines Stück einer durchaus konvexen Ringfläche nebst seinem konkaven Abdruck zur Bildung des Gelenkes verwendet. Die geeignete Ringfläche erhält man, wenn man wieder einen Kreisbogen aeb dreht um eine in seiner Ebene gelegene Gerade als Axe, die nicht durch seinen Mittelpunkt c geht, die aber diesmal nicht auf der konvexen, sondern auf der konkaven Seite des Bogens liegt, etwa wie AB in Fig. 9. In dieser Figur ist eine perspektivische Zeichnung der ganzen Ringfläche angedeutet und ein um den Punkt e herumliegendes, herausgeschnittenes Stück ist durch Schraffirung etwas kräftiger hervorgehoben, adb ist der vordere Theil seines Umfanges, der hintere Theil desselben ist als verdeckt unsichtbar.

Ein solches Flächenstück gleicht einem Abschnitte eines Rotationsellipsoides, genommen in der Gegend des grössten Kreises. Es kann wie die Sattelfläche auf seinem ruhend

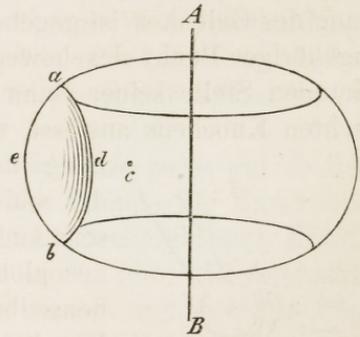


Fig. 9.

gedachten Ebenbilde schleifen bei Drehungen von mässigem Winkelanschlag um zwei Axen, die einander rechtwinkelig überkreuzen, nur dass hier diese beiden Axen auf derselben Seiten der Fläche liegen. In unserer Figur würde AB die eine Axe sein die andere wäre ein in c auf der Ebene der Zeichnung errichtetes Perpendikel.

Ein Gelenk kann auch aus mehreren getrennten Stücken derselben, ihren geometrischen Eigenschaften nach geeigneten Fläche gebildet sein, deren jedes an seinem Abdrucke schleift, wenn die Bewegung nach dem für die Fläche charakteristischen Modus erfolgt sowie ein Thürflügel in den beiden getrennten Angeln sich dreht, welche getrennte Abschnitte derselben Cylinderfläche darstellen.

Bei manchen Gelenken wird der Bewegungsmodus durch biegsame Schaltstücke beeinflusst, die zwischen den Endflächen der verbundenen Knochen gelagert sind. Hierüber lassen sich indessen keine allgemeinen Sätze aufstellen, sondern es muss durch Untersuchung des einzelnen Falles der Bewegungsmodus ermittelt werden.

IV. Bewegungsumfang der Gelenke.

Der Bewegungsumfang eines Gelenkes oder die Grenzen, innerhalb deren dem Bewegungsmodus gemäss Stellungen stetig aufeinander folgen können, wird bestimmt durch verschiedene Nebenumstände, welche mit der den Bewegungsmodus bedingenden geometrischen Natur der Gelenkflächen in keinem Zusammenhange stehen. Man kann die Umstände, welche der Bewegung Grenzen setzen, füglich die Hemmungen der Gelenke nennen. Es lassen sich sofort zwei Arten von Hemmung unterscheiden, welche wir als absolute und relative Hemmungen passend bezeichnen können. Eine absolute Hemmung des Gelenkes ist gegeben, wenn ein nicht der gleitenden Fläche angehöriger Punkt des beweglich gedachten Knochens bei einer bestimmten Stelle seiner Bahn angelangt, an einen Punkt des fest gedachten Knochens anstösst, wie z. B. der Punkt *a* (Fig. 10) bei Drehung im Sinne des Pfeiles, bald an den Punkt *b*



Fig. 10.

des andern Knochens anstossen würde. In diesem Augenblicke hört die Bewegung des Gelenkes plötzlich auf, da eine Weiterbewegung nach demselben Modus durch die Starrheit der beiden Knochen, die sich weder durchdringen noch zusammendrücken können, absolut verhindert ist. Eine Kraft, welche in einiger Entfernung vom

Gelenke auf den beweglichen Knochen wirkend ihn noch weiter zu führen strebt, würde nunmehr ihn um den neuen Berührungspunkt als Hypomochlion zu drehen streben und daher entweder durch die das Gelenk befestigenden Kräfte (Luftdruck und Bandspannungen) im Gleichgewichte gehalten oder sie würde die Gelenkflächen von einander abheben, d. h. das Gelenk verrenken.

Diese absolute Hemmung würde sich natürlich bei jedem Gelenke in irgend einem Punkte jeder beliebigen Bahn einstellen. Bei den meisten ist aber dieser Punkt gar nicht erreichbar, weil schon vorher die zweite Art der Hemmung, die relative, durch Anspannung fibröser Bänder eintritt, welche vom einen Knochen zum andern überspringen. Es sind nämlich meist solche vorhanden, deren Ansatz sich

vom Ursprung entfernt, wenn eine dem Modus gemässe Bewegung im einen Sinne geschieht. In einem gewissen Stadium der Bewegung wird also das vorher etwa in Falten gelegene Band entfaltet sein und nun kann die Bewegung nicht weiter gehen, ohne dass eine Dehnung desselben stattfindet, der sich seine elastischen Kräfte widersetzen. Die Bewegung in dem gedachten Sinne wird also jetzt so weit gehen, bis die elastischen Kräfte des gedehnten Bandes der bewegenden Kraft Gleichgewicht halten. Die Grenze des Bewegungsumfanges wird also in diesem Falle abhängen von der Grösse der die Bewegung bewirkenden Kraft, und wir können darum diese Hemmungsart die relative nennen. Sehr gross wird indessen meistens der Spielraum nicht sein, welchen eine solche relative Hemmung an der Grenze des Bewegungsumfanges gewährt. Die Hemmungsbänder der Gelenke sind nämlich meist kurze Gebilde von sehr geringer Dehnbarkeit oder mit andern Worten von grosser Elasticität. Sind sie bei der betreffenden Bewegung also einmal entfaltet, so wird eine Weiterführung derselben um einen kleinen Betrag schon eine Dehnung des Bandes um einen solchen Bruchtheil der Gesamtlänge erfordern, dass dadurch elastische Kräfte wach gerufen werden, welche auch den grössten an dem Gelenke überhaupt zulässigen bewegenden Kräften Gleichgewicht halten.

Man kann sich die soeben entwickelten Sätze recht gut an den eigenen Fingern anschaulich machen. Man spanne die Extensoren der Finger einer Hand, deren Vola auf einem Tische aufliegt, kräftig an. Die Finger werden sich alsdann ein wenig über die wagrechte Ebene emporrichten. Die Spannung der volaren und lateralen Bänder der Metacarpophalangalgelenke ist jetzt im Gleichgewichte mit dem Zuge der Streckmuskeln. Drückt man nun aber mit Hülfe der andern Hand gegen die Volarseite eines der Finger aufwärts, so kann durch diese grössere Kraft die Dorsalflexion noch ein wenig weiter getrieben werden, aber bald hat auch bei der grösseren Kraft die Bewegung ein Ende, wenn nicht der normale Zusammenhalt des Gelenkes zerstört werden soll.

Da es sich bei den Gelenkbewegungen im Grossen und Ganzen um Drehungen handelt, so ist der Bewegungsumfang als Winkelgrösse anzugeben. Bei einem zwangsläufigen Gelenke genügt eine einzige Winkelgrösse, um den Bewegungsumfang vollständig zu definiren. So z. B. hat das Ellenbogengelenk einen Bewegungsumfang von etwa 120° , welcher beiderseits durch absolute Hemmungen begrenzt wird. Die geringste Kraft ist im Stande, den beweglich gedachten Knochen an beide Grenzen zu führen und die grösste überhaupt zulässige Kraft

vermag nicht, ihn darüber hinaus zu führen. Ist der Bewegungsumfang des zwangläufigen Gelenkes durch relative Hemmungen begrenzt, so ist noch der Spielraum anzugeben, welcher durch die Verschiedenheit der bewegenden Kräfte bedingt ist.

Bei einem freien Gelenke hat natürlich jede Bewegungsrichtung ihre besondere Begrenzung und die erschöpfende Definition des ganzen Bewegungsumfanges würde hier eine sehr verwickelte Aufgabe sein. Bei Sattel- und Eigelernen würde eine kegelähnliche Regelfläche¹ anzugeben sein, welche den Inbegriff aller extremen Lagen einer willkürlich im beweglich gedachten Knochen angenommenen geraden Linie bildet.

Bei der Arthrodie könnte es scheinen, als ob zur erschöpfenden Angabe des Bewegungsumfanges ein bestimmter Kegelmantel genüge, welcher die extremen Stellungen enthielte, bis zu welchen eine durch den Drehpunkt im beweglich gedachten Knochen festgelegte Gerade in den verschiedenen Richtungen geführt werden kann. Eine solche Kegelfläche kann aber, wie man leicht sieht, gar nicht bestimmt gegeben werden, da die mit dem beweglich gedachten Knochen fest verbundene Gerade in derselben Richtung mehr oder weniger weit geführt werden kann, je nachdem der Knochen um diese Gerade im einen oder andern Sinne mehr oder weniger gedreht ist. So kann z. B. offenbar das nach aussen rotirte Femur weit weniger nach hinten gestreckt werden als das nach innen rotirte.

Man wird sich bei den freien Gelenken und besonders bei den Arthrodeen mit der Angabe einiger besonderer Grenzen des Bewegungsumfanges begnügen müssen und auf eine erschöpfende Definition desselben verzichten.

VIERTES CAPITEL.

Zusammenhalt der Gelenke.

Da die normale Bewegung in einem Gelenke stets in einem Schleifen der Gelenkflächen aufeinander besteht, so muss die resultirende Kraft, welche sie beschleunigt oder verzögert, stets tangential zur Gelenkfläche gerichtet sein. Es muss also jede normal zur Ge-

¹ Unter Regelfläche versteht man eine Fläche, auf welcher durch jeden Punkt eine Gerade gezogen werden kann.

lenkfläche gerichtete Komponente irgend einer wirksamen Kraft durch eine gleich grosse entgegengesetzt gerichtete normale Komponente einer andern Kraft aufgewogen sein. Wenn wir von einer Beschleunigung oder Verzögerung der Bewegung absehen, also das Gelenk in Ruhe oder in Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit betrachten, so ist die Resultirende aller Kräfte = 0. Es ist von Interesse, dies Gleichgewicht aller auf ein Gelenk wirksamen Kräfte zu untersuchen, weil darauf die Vorstellung vom Zusammenhalt derselben beruht oder von dem Drucke, mit welchem die Gelenkflächen gegeneinander gepresst werden. Um übrigens von einem doch nicht genau berechenbaren Reibungswiderstand absehen zu dürfen, wollen wir das Gelenk bloss im Ruhezustande betrachten. Wir wollen ferner bloss kugelförmige Gelenkflächen in Betracht ziehen, weil sich für anders gestaltete die Untersuchung zu sehr verwickeln würde, und weil für die Orientirung in den Hauptgesichtspunkten die Betrachtung des Kugelgelenkes genügt.

Unter den auf das Gelenk wirkenden Kräften soll zunächst der Luftdruck erörtert werden. Bekanntlich ist die Resultirende des Luftdruckes gleich Null, wenn derselbe auf die ganze geschlossene Oberfläche eines Körpers wirkt. Wird nun von einem unendlich kleinen Elemente der Oberfläche der Luftdruck abgehalten, so wird eine Kraft wirksam, welche normal zu diesem Elemente von innen nach aussen gerichtet ist und deren Grösse gleich ist dem Druck auf die Flächeneinheit multiplicirt mit der Ausdehnung des Flächenelementes. Es sei jetzt der Luftdruck von einem endlich ausgedehnten Oberflächenstücke abgehalten, das einen irgendwie begrenzten Theil einer Kugeloberfläche bildet. Dann werden die sämmtlichen auf die einzelnen Elemente dieses Flächenstückes von innen nach aussen normalen Kräfte, mithin auch ihre Resultante durch den Mittelpunkt der Kugel gehen.

In dem beschriebenen Falle befindet sich nun ein durch eine Arthrodie verbundener Knochen — denken wir z. B. an den Oberschenkel. In der That auf die ganze übrige Oberfläche desselben wird sich durch die leicht beweglichen Weichtheile hindurch der Luftdruck fortpflanzen können, aber auf den von der Pfanne (d. h. von der wirklich überknorpelten Pfanne ¹) bedeckten Theil des Gelenkkopfes kann der Luftdruck nicht wirken. Wenn dies Kugelstück

1 Auf den der *Incisura acetabuli* entsprechenden Theil des Femurkopfes pflanzt sich durch die Weichtheile von aussen her der Luftdruck ebenso gut fort, wie auf die übrigen Theile der Knochenoberfläche. Dies ist in überzeugendster Weise theoretisch und experimentell erwiesen von A. EUGEN FICK, Zur Mechanik des Hüftgelenkes. Arch. f. Anat. u. Physiol. Anat. Abtheil. 1878. S. 519 ff.

genau gegeben ist, so kann die durch den Gelenkmittelpunkt gehende Resultirende des Luftdrucküberschusses gefunden werden, welche den Gelenkkopf gegen die Pfannenfläche drückt. Wir denken uns, um das Princip dieser Rechnung anschaulich zu machen, die Hüftpfanne in der Lage, die sie bei einem aufrecht stehenden Menschen einnimmt, und wählen folgendes Koordinatensystem: Den Ursprung der

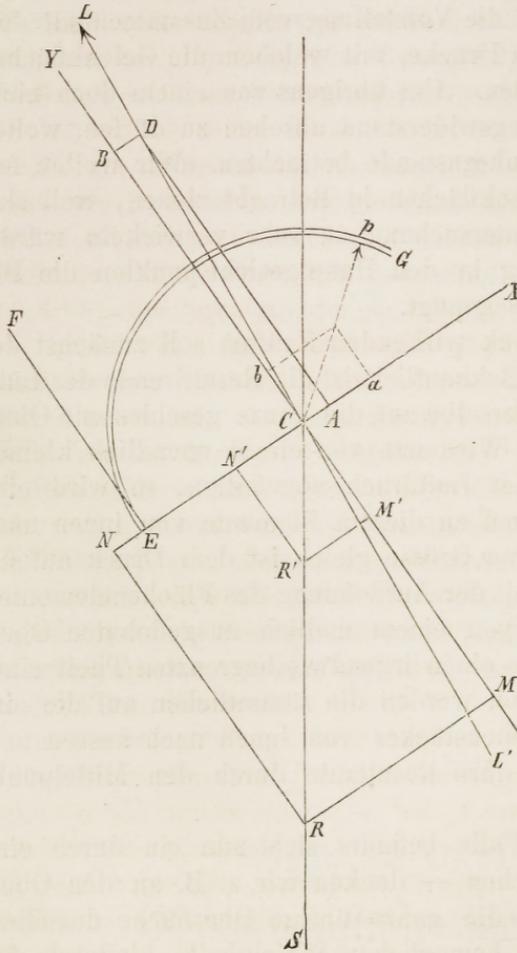


Fig. II.

Koordinaten legen wir in den Mittelpunkt des Gelenkes C (Fig. 11), zur XY -Ebene machen wir eine Vertikalebene, welche den überknorpelten Theil der Pfanne möglichst symmetrisch halbt. Der Schnitt dieser Ebene mit der Gelenkkugel sei der Kreisbogen EpG . Am tiefsten Punkte E desselben (der übrigens im Bereich der Incisura liegen kann) ziehen wir eine Tangente EF und ihr parallel durch C die Y -axe, CY . Die X -axe CX steht in der gewählten Ebene senkrecht auf EF oder CY und endlich wird die Z -axe in C auf CY und CX , also auf der Ebene der Zeichnung senkrecht errichtet. Wir denken uns nun um einen beliebigen Punkt p der überknorpelten Pfanne (welcher natürlich nicht

in der Ebene der Zeichnung zu liegen braucht) herum ein Flächenelement $d\omega$. Ist nun P der Luftdruck auf die Flächeneinheit, so ist $Pd\omega$ die Grösse der Kraft, welche in der Richtung Cp wirkt. Ihre Komponenten in der Richtung der Ordinatenachsen sind

$$Pd\omega \cos(pCX), \quad Pd\omega \cos(pCY), \quad Pd\omega \cos(pCZ).$$

Die drei Komponenten des resultirenden Druckes auf die ganze Fläche

erhält man also durch Integration über die ganze überknorpelte Oberfläche: $Pfd\omega \cos(pCX)$; $Pfd\omega \cos(pCY)$; $Pfd\omega \cos(pCZ)$.

Die drei Integrale $\int d\omega \cos(pCX)$ etc. sind aber der Reihe nach die Projektionen der ganzen überknorpelten Oberfläche auf die YZ ebene, die XZ ebene und die XY ebene. Wenn aber diese letztere in der That, wie angenommen wurde, die Pfannenfläche symmetrisch theilt, so ist das dritte Integral und mithin die Komponente in der Z richtung Null. Bei der Hüftgelenkpfanne, die (mit Einschluss der Fossa acetabuli) etwa eine Halbkugel bildet, fällt die XZ ebene ungefähr mit der Ebene des Pfannenrandes zusammen. Die Projektion der Knorpeloberfläche auf diese Ebene spielt daher mit Recht, wie sich gleich zeigen wird, eine Rolle in der Betrachtung des Gegeneinanderwirkens von Luftdruck und Schwere. Wir wollen uns nämlich jetzt einen Schenkel an dem in der gedachten Stellung fixirten Becken hängend vorstellen, dann wird sein Schwerpunkt senkrecht unter C liegen und die Schwere wird in der Richtung der Vertikalen CS senkrecht abwärts wirken. Diese Kraft durch die Länge CR dargestellt, zerlegen wir nach der Y - und X richtung in zwei Komponenten CM und CN . Es ist alsdann leicht zu sehen, wann Gleichgewicht zwischen der Schwere und dem Luftdruck stattfinden würde. In der That die Resultirende des Luftdruckes würde unter den gemachten Annahmen etwa die Richtung CL haben und wenn wir ihre Grösse durch die Länge CD darstellen, so sind CA und CB ihre Komponenten in der X - und Y richtung. Bei den Gestalt- und Lageverhältnissen des Hüftgelenkes, das uns als Beispiel dient, dürfte die Komponente in der X axe wohl, wie in der Figur angenommen ist, von C nach aufwärts gerichtet und ziemlich klein sein, so dass die in dieselbe Axe fallende und abwärts nach E gerichtete Komponente der Schwere auch bei kleiner Belastung des Femur grösser sein wird. Die Summe beider Komponenten hat demnach sicher die Richtung von C nach E zu und wird stets durch den elastischen Gegendruck des Pfannenrandes im Gleichgewicht gehalten. Es wird also zur Herstellung des Gleichgewichtes im Ganzen genügen, wenn die Komponente des Luftdruckes CB der entgegengesetzten Komponente der Schwere CM gleich ist.

Es folgt also der Satz: der im Hüftgelenke hängende Oberschenkel wird durch den Luftdruck festgehalten und wird erst dann von der Schwere herausgezogen (wobei der Mittelpunkt nur in der Richtung CM sich zu bewegen anfangen kann), wenn durch Belastung des Schenkels die mit der Tangentenrichtung EF parallele Komponente der Schwere der in dieselbe Richtung fallenden Komponente des

Luftdruckes überlegen ist, d. h. unter den besonderen Verhältnissen des Hüftgelenkes einer Quecksilbersäule von der Barometerhöhe, die zur Grundfläche die Projektion des überknorpelten Pfannentheiles auf die Pfannenrandebene hat. Dieser Satz ist in der oben citirten Abhandlung von A. EUGEN FICK auch experimentell bewiesen. Im Falle des soeben beschriebenen Gleichgewichtes, wo $CB = CM$ muss offenbar der hydrostatische Druck der zwischen den Gelenkflächen enthaltenen Flüssigkeitsschicht gleich Null sein. Es ist vielleicht nicht unnütz, ausdrücklich zu bemerken, dass dieses Nullwerden des Druckes im Innern doch immerhin ein minimales Auseinanderrücken der Gelenkflächen zur Voraussetzung hat. Da nämlich die tropfbaren Flüssigkeiten doch nicht absolut inkompressibel sind, so muss die Gelenkflüssigkeit, wenn sie den hydrostatischen Druck Null ausüben soll, ein etwas grösseres Volum einnehmen, als wenn sie irgend einen anderen Druck ausübt.

Der Schenkel kann aber im Gleichgewicht am Hüftgelenke offenbar auch noch hängen, wenn die Schwere kleiner ist als CR . In einem solchen Falle wird der Ueberschuss des äusseren Luftdruckes über die Schwere den Schenkelkopf noch etwas gegen die Pfanne andrücken, so dass ein positiver hydrostatischer Druck im Innern der Gelenkhöhle zu Stande kommt, welcher aber nicht die volle Höhe des äusseren Atmosphärendruckes erreicht, und der dann mit der Schwere zusammen dem letzteren Gleichgewicht hält. Noch sachgemässer liesse sich dies ausdrücken, indem man sagt: die Schwere wird alsdann den Schenkelkopf nicht ganz so weit aus der Höhle herausziehen, dass der Druck der Gelenkflüssigkeit nicht ganz auf Null herabsinkt.

Wenn alle nöthigen Data bekannt wären, würde sich leicht berechnen lassen, welchen Werth der positive Druck in der Gelenkhöhle haben würde. Sei z. B. die Schwere CR' statt CR , so dass ihre Komponente in der Y richtung $CM' < CB$ ist, dann wird sich ein hydrostatischer Gegendruck in der Gelenkflüssigkeit entwickeln müssen, der sich zum ganzen Atmosphärendruck P verhält $= MM:CM$ oder $= MM:CB$. In der That die Resultirende des hydrostatischen Gegendruckes wird wie die des Luftdruckes in die Richtung CL , jedoch in entgegengesetztem Sinne von C nach I' hin fallen, und wenn also der hydrostatische Druck auf die Flächeneinheit $= P \cdot \frac{MM}{CB}$ ist, so wird die Komponente des gesammten Gegendruckes in der Y richtung gerade $= MM$ sein, wie es das Gleichgewicht fordert. Es ist nämlich alsdann in der Y richtung Gleichgewicht zwischen

der Komponente des Luftdruckes CB und der Summe der Komponente CM' der Schwere und $M'M$ des hydrostatischen Gegendruckes. In der X Richtung ist Gleichgewicht der Komponente der Schwere CN' der Komponente CA des Luftdruckes der (in Fig. 11 nicht bezeichneten) Komponente des hydrostatischen Gegendruckes der Gelenkflüssigkeit und endlich dem elastischen Gegendrucke des Pfannenrandes bei E .

Wir wollen uns jetzt ausser dem Luftdruck und der Schwere noch beliebige elastische Spannungen von Bändern und Muskeln auf das Gelenk wirksam denken. Dann ist vor Allem klar, dass von Gleichgewicht überhaupt nur die Rede sein kann, wenn die Resultirende dieser sämtlichen Kräfte durch den Mittelpunkt geht. Hätten sie nämlich entweder gar keine Resultirende oder ginge dieselbe nicht durch den Mittelpunkt, so würde ein drehend wirkendes Paar vorhanden sein.

Es sei jetzt beispielsweise CR (Fig. 12) die Resultirende der gedachten Kräfte, durch denselben Punkt C geht aber auch die Resultirende des hydrostatischen Gegendruckes der Flüssigkeit im Gelenkkinnern, sie sei dargestellt durch CL' . Man sieht nun, dass zwischen den äusseren Kräften und dem inneren Gegendruck nur dann Gleichgewicht stattfinden kann, wenn auch die Resultirende der äusseren Kräfte in dieselbe ein für allemal bestimmte Linie fällt, in welcher die Resultirende des hydrostatischen Druckes der Gelenkflüssigkeit liegt. Fiele jene Resultirende in diese

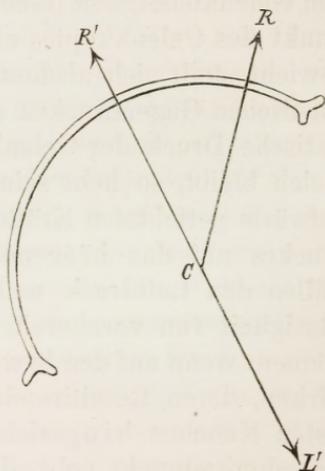


Fig. 12.

Richtung nach entgegengesetzter Seite wie CR' , so würde sich allerdings die Bedingung der Gleichheit beider Resultirenden an absolutem Werthe allemal von selbst herstellen, vorausgesetzt, dass die Gelenkhöhle absolut abgeschlossen und von konstantem Rauminhalt wäre, denn so lange CR' grösser wäre als CL , würde der Gelenkkopf tiefer in die Pfanne eingepresst, die Gelenkflüssigkeit würde komprimirt, bis ihr hydrostatischer Druck hinlänglich angewachsen wäre, um eine CR' gleiche Resultirende zu ergeben. Bei der bekannten Beschaffenheit der tropfbaren Flüssigkeiten würde aber diese Zusammendrückung nur einen ganz unmerklichen Betrag ausmachen. Man sieht also, dass äusseren Kräften, welche einen Gelenkkopf in die Pfanne zu drücken streben, durch einen hydrostatischen Gegen-

druck der Flüssigkeit in einer absolut geschlossenen Höhle nicht im Allgemeinen Gleichgewicht gehalten werden kann.

Faktisch liegen aber die Verhältnisse nicht ganz so, wie soeben vorausgesetzt wurde. Die Gelenkhöhle ist nämlich nicht überall von absolut undehnbaren Wänden umgeben. Am Rande ist sie von der jedesfalls nicht ringsum straffen Gelenkkapsel begrenzt, so dass hier stets nach irgend einer Seite ein wenig aus dem Zwischenraume zwischen den Gelenkflächen verdrängte Flüssigkeit in Ausbuchtungen der Kapsel entweichen kann. Es kann daher der hydrostatische Druck im Inneren der Gelenkhöhle niemals merklich steigen über den Druck, unter welchem die Tränkungsflüssigkeit der das Gelenk umgebenden Gewebe, welchen wir etwa dem Luftdruck gleichsetzen dürfen. Wenn also die Resultirende der sämtlichen übrigen Kräfte nach oben gerichtet ist, so hebt sich das Glied unter Verdrängung von Gelenkflüssigkeit (nicht unter Kompression derselben), bis ein Punkt des Gelenkkopfes einen Punkt der Pfanne berührt, das Gleichgewicht stellt sich alsdann sofort her durch Entstehung des nöthigen elastischen Gegendruckes der festen Pfanne. Da hierbei der hydrostatische Druck der Gelenkflüssigkeit dem äusseren Luftdrucke stets gleich bleibt, so hebt seine Resultirende stets gerade die unter den aufwärts gerichteten Kräften mitgezählte Wirkung des äusseren Luftdruckes auf das hängende Glied auf. Man wird also in solchen Fällen den Luftdruck und den hydrostatischen Druck der Gelenkflüssigkeit von vornherein ganz aus der Rechnung lassen und sagen können: wenn auf den beweglichen Knochen Schwere und Spannungen wirken, deren Resultirende im Ganzen gegen die Gelenkfläche am festen Knochen hingerichtet ist, so wird, wenn dieselbe durch den Gelenkmittelpunkt geht, der eine Knochen gegen den andern mit der ganzen Kraft dieser Resultirenden angedrückt und wird dieselbe lediglich durch den elastischen Gegendruck des andern Knochens aufgewogen.¹

Diese Entwicklung widerspricht keineswegs der vorhergehenden, wo dem Luftdrucke eine wesentliche Rolle für den Zusammenhalt des Gelenkes zugeschrieben wurde. Die Gelenkkapsel wirkt nämlich ventilartig dergestalt, dass sie das Eindringen neuer Flüssigkeit von aussen hindert, nicht aber das Entweichen nach aussen. Es kann also sehr wohl der hydrostatische Druck im Gelenkinnern unter

¹ Ich möchte ausdrücklich vor dem Missverständniss warnen, dass die im Text vorgetragene Lehre übereinstimme mit den Erörterungen BUCHNER's (Arch. f. Anat. u. Physiol. 1877. S. 22), welche dem Luftdruck die Bedeutung für den Zusammenhalt der Gelenke absprechen. Diese sind meines Erachtens vollständig widerlegt von EUGEN FICK (Arch. f. Anat. 1878. S. 222).

den Druck der umgebenden Gewebeflüssigkeiten resp. den Luftdruck sinken, nicht aber über diesen Werth hinaus steigen.

Wenn sehr gewaltige Kräfte an einem Knochen wirken in dem Sinne, dass sie ihn aus der Gelenkpfanne herauszuziehen streben, dann kann der Luftdruck für den Zusammenhalt keine sehr bedeutende Rolle spielen, denn der Luftdruck entspricht beim grössten Gelenke dem Hüftgelenke im Ganzen nur einer Kraft von noch nicht 22 kg., wenn er also auch der luxirenden Gewalt genau entgegenwirkt, so brauchte diese doch nur den geringen Betrag von 22 kg. zu erreichen, um ihn zu überwinden. Den Oberarm würde man also in wagrechter Richtung mit noch weit geringerer Kraft von der Schulterpfanne abreißen können, so dass in der Gelenkhöhle ein Vacuum entsteht. Beiläufig mag noch erwähnt sein, dass von einer Bedeutung der Adhäsion für den Zusammenhalt der Gelenke gegenüber äusseren Gewalten vollends nicht die Rede sein kann, wie SCHMID¹ experimentell erwiesen hat.

Wenn also eine bedeutende Gewalt auf ein Gelenk wirkt, welche die Flächen von einander zu entfernen strebt, so kann dieselbe, wofern nicht schon starke Bänder ausgespannt sind, nur durch Muskelspannungen im Gleichgewicht gehalten werden. Es tritt uns aber hier noch eine Schwierigkeit entgegen, wenn wir die grosse Dehnbarkeit der Muskeln bedenken. Um es mit bestimmten Vorstellungen zu thun zu haben, stellen wir uns einen Arm in wagrecht ausgestreckter Lage vor und es ziehe an demselben eine Kraft in seiner Längsrichtung, welche den Humeruskopf senkrecht von der Schulterpfanne zu entfernen strebt. Den Luftdruck auf die Pfannenfläche wird man etwa zu 10 kg. schätzen dürfen. Ist also die luxirende Kraft unter 10 kg., so kann sie ohne alle Beihülfe von Muskelspannungen vom Luftdrucke oder einem Theil desselben aufgewogen werden, da ja die Kapsel auch hier ventilartig von aussen nach innen abschliesst. In Wirklichkeit wird nun von Seiten der das Gelenk umgebenden Muskeln wohl immer eine gewisse Spannung ausgeübt werden, vermöge deren nicht nur der hydrostatische Druck in der Gelenkhöhle auf die Höhe des äusseren Luftdruckes gebracht wird, sondern die Gelenkflächen auch noch gegeneinander gepresst werden. Dies wird vermuthlich selbst dann statthaben, wenn die Muskeln sämmtlich im Ruhezustande sind. Sei beispielsweise die zur Gelenkfläche normale Resultirende der Muskelspannungen = 5 kg., dann wird die luxirende Kraft bis zu diesem Betrage wachsen kön-

1 SCHMID, Deutsche Ztschr. f. Chirurgie V.

nen, ohne dass der hydrostatische Druck im Innern der Gelenkhöhle unter den Luftdruck herabsinkt, vielmehr wird dann erst die Pfanne entlastet sein und keinen elastischen Gegendruck mehr auszuüben brauchen. Wächst die luxirende Kraft über 5 kg. hinaus, so sinkt wegen des ventilartigen Abschlusses der Kapsel der hydrostatische Druck im Innern der Gelenkhöhle und der Ueberschuss des Luftdruckes + 5 kg. Muskelspannung hält der ziehenden Kraft Gleichgewicht. Das kann der Fall sein bis die letztere auf 15 kg. angewachsen ist. Bis zu diesem Punkte sind die Gelenkflächen nur um den unmerklichen Betrag verrückt worden, welcher der elastischen Ausdehnung des gepresst gewesenen Gelenkknorpels und der Ausdehnung der Gelenkflüssigkeit bei Druckminderung entspricht. Wächst aber jetzt die luxirende Kraft bedeutend über 15 kg. hinaus — sagen wir auf 20 kg. —, so muss offenbar ein erhebliches Auseinanderweichen der Gelenkflächen unter Bildung eines Vacuum in der Gelenkhöhle erfolgen, sofern nicht der Zustand der Muskeln eine Aenderung erfährt. Denn es müsste jetzt die Resultirende der Muskelspannungen etwa 10 kg. betragen, nämlich 20 kg. vermindert um den Betrag des Luftdruckes, den wir zu 10 kg. angeschlagen haben. Offenbar können aber die Muskeln bei unverändertem Zustande diese Spannung nur durch Dehnung um wenigstens einige Millimeter erlangen, wenn die Spannung 5 kg. betrug bei der Länge der Fasern, welche ihnen zukam, so lange die Gelenkflächen in Kontakt lagen. Es dürfte die Mühe lohnen, diese unabweisliche Folgerung aus der Betrachtung der auf ein Gelenk wirkenden Kräfte experimentell zu prüfen, denn die voraussichtlich zu erwartende Auseinanderweichung der Gelenkflächen ist so gross, dass sie sich schwerlich der Beobachtung entziehen könnte.

Bei kleineren Gelenken, z. B. bei den Metacarpophalangalgelenken, kann man das einige Millimeter betragende Auseinanderweichen der Gelenkflächen unter dem Einflusse starken Zuges ganz leicht sehen. Dabei muss auch offenbar ein Vacuum im Innern des Gelenkes entstehen.

Die in den vorstehenden Capiteln entwickelten Grundsätze genügen, um wenigstens in erster Annäherung die Wirkung der Muskeln auf die grossen Gelenke zu beurtheilen. Es versteht sich aber wohl von selbst, dass die vorgetragenen Sätze nicht mit voller mathematischer Strenge gelten können, da die Gelenkflächen alle den als Typen hingestellten geometrischen Formen nicht ganz genau entsprechen. Man hat sich in jüngster Zeit vielfach bemüht, durch genaue Messungen solche Abweichungen der wirklichen Gelenkflächen

von der schematischen Form, z. B. der Hüftgelenkflächen von der Kugelgestalt zu ermitteln. Wenn nun auch jede exakte Messung in der Naturwissenschaft in sich einen gewissen Werth hat, so dürfte es doch beim gegenwärtigen Zustande der speciellen Bewegungslehre noch für lange Zeit lohnender sein, unter Annahme der schematischen Formen der Gelenke an der Auffindung der allgemeinen Grundgesetze zu arbeiten, als schon an die kleinen Abweichungen zu denken, deren Bedeutung schwerlich sobald erkennbar sein wird. Es sei erlaubt, diese Behauptung durch einen Vergleich mit einer andern Wissenschaft zu stützen. In der Physik hat man gewiss mit Recht sich früher mit den wichtigen Folgerungen aus dem MARIOTTES-GAY LYESSAC'schen Gesetze beschäftigt, ehe man die kleinen Abweichungen der wirklichen Gase von dem Verhalten eines idealen Gases untersuchte.

FÜNFTES KAPITEL.

Die Arbeit der Muskelkräfte an den Gelenken.

I. Die entwickelte Muskelspannung kommt ganz zur Wirkung.

An die Spitze der Lehre von der Muskelwirkung sei es erlaubt, einen Satz zu stellen, welcher allerdings eigentlich selbstverständlich ist, der aber doch besonders ausgesprochen und bewiesen zu werden verdient, da er vielleicht noch nicht hinlänglich eingedrungen ist in das Bewusstsein aller derer, welche sich mit Problemen der speciellen Muskelphysiologie zu beschäftigen haben. Dieser Satz lautet so: Wenn eine an irgend einem Gelenke angeknüpfte Muskelfaser sich wirklich zusammenzieht, so hat die gesammte Arbeit, welche ihre elastischen Kräfte nach Maassgabe der S. 241 u. folg. dargestellten Grundsätze dabei leisten, auch wirklich bewegendem Erfolg, sei es zur Beschleunigung, sei es zur Ueberwindung irgend welcher entgegenwirkender Kräfte, der Muskel mag angesetzt sein wie er wolle, nahe beim Drehpunkt resp. der Drehaxe oder weit davon, sie mag liegen in der Drehungsebene oder schräg dazu. Von einer günstigeren oder weniger günstigen Lagerung oder Angriffsweise eines Muskels kann gar nicht die Rede sein, sofern es sich um den dynamischen Erfolg handelt. Die Worte günstigerer oder weniger günstiger Ansatz eines Muskels haben, wofern man ihnen überall Sinn beilegen

will, einen solchen nur, wo es sich um bestimmte Gleichgewichtsprobleme handelt. Die Einschränkung der Beweglichkeit des Gelenkes auf gewisse Bahnen mindert den bewegenden Effekt der Muskelarbeit in keiner Weise. Dieser Effekt ist genau so gross, als wenn die am Ende des Muskels angeknüpfte Masse in der Richtung der Muskelfasern selbst folgen könnte. Natürlich gilt der Satz nur unter der Voraussetzung, dass der Reibungswiderstand unberücksichtigt bleibt, der übrigens in der That sehr gering ist.

Eines besonderen Beweises bedarf wie gesagt dieser Satz eigentlich nicht, da er eine ganz unmittelbare Folgerung aus dem Principe der Erhaltung der Energie ist. Um indessen jedes entgegenstehende Vorurtheil auch durch die unmittelbare Anschauung zu zerstreuen, soll hier der Satz für den Fall direkt bewiesen werden, wo vielleicht am ersten ein Zweifel erhoben werden könnte. Es ziehe sich nämlich eine Muskelfaser zusammen und dabei drehe sich das Gelenk in einer Ebene, zu welcher die Richtung der Faser schräg läuft, sei es, dass andere gleichzeitige Muskelzüge die Bahn bestimmen (wenn es ein freies Gelenk ist), sei es, dass wir es mit einem zwangläufigen

Gelenke zu thun haben, das nur in jener Ebene überhaupt Drehung zulässt. Wir könnten uns z. B. eine der Fasern des Supinator brevis denken, von denen viele sehr schräg zur Drehungsebene laufen. Wir wählen zur Xaxe eines Koordinatensystems die Axe der faktischen Drehung zur Yaxe das Perpendikel vom Ansatzpunkte L der Faser am beweglichen Knochen auf die Drehaxe und zur Zaxe eine auf die beiden vorigen senkrechte Gerade. (S. Fig. 13.) Der Ursprung der Muskelfasern am festen Knochen sei M und die Koordinaten dieses Punktes $OA =$

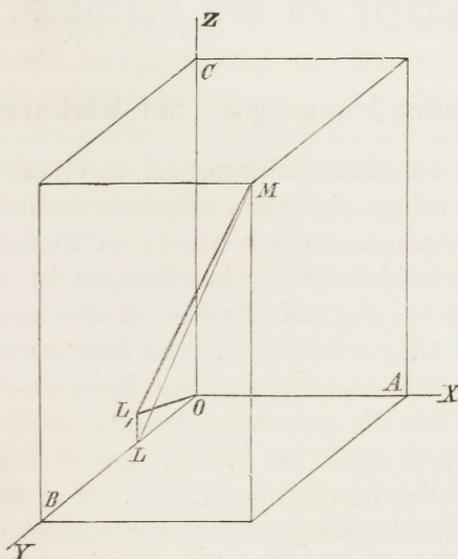


Fig. 13.

x ; $OB = y$; $OC = z$. Die Koordinaten des Ansatzpunktes sind $x_1 = 0$; $y_1 = r$; $z_1 = 0$, wenn wir die Länge LO durch r bezeichnen. Die Länge der Muskelfaser ist demnach

$$R = \sqrt{x^2 + (y - r)^2 + z^2}.$$

Ihre elastische Spannung bei dieser Länge sei P und es erfolge jetzt

eine unendlich kleine Zusammenziehung um die Grösse dR , während welcher die Spannung konstant $= P$ gedacht werden darf, dann ist PdR die positive Arbeit der elastischen Kräfte bei diesem Akte und es ist zu beweisen, dass die negative Arbeit der Kräfte, welche am beweglichen Knochen der Zusammenziehung entgegenwirken, bei diesem Akte gerade so gross ist. Um der Spannung P mittels des Gelenkes Gleichgewicht zu halten, müsste bei L eine parallel zu OZ abwärts gerichtete Kraft angebracht sein, gleich der Projektion von P auf die Z axe oder $= P \frac{z}{R}$. Ist also der Knochen schon aufwärts in Bewegung, so wird er dem Muskelzuge weiter aufwärts folgen ohne Beschleunigung und es wird im nächsten Zeitdifferential die Gegenkraft $P \frac{z}{R}$ eine negative Arbeit leisten $= P \frac{z}{R}$ multiplicirt mit der Wegstrecke, welche der Punkt L in der Richtung dieser Kraft zurücklegt. Dieser Punkt kann sich aber nach der Voraussetzung nur um O drehen in der Ebene OYZ . Er sei durch die unendlich kleine Drehung um den Winkel $L_1OL = d\omega$ in die Lage L_1 gekommen, dann ist $P \frac{z}{R} \cdot \overline{LL_1}$, oder $P \frac{z}{R} \cdot rd\omega$ die gesuchte negative Arbeit der widerstehenden Gegenkraft. Um nun die positive Arbeit der Muskelspannung PdR hiermit zu vergleichen, beachten wir, dass $dR = ML - ML_1 = \frac{dR}{dz_1} dz_1$ sein muss, da durch die Verrückung des Punktes L nach L_1 nur die Koordinate z_1 des Ansatzpunktes eine Aenderung erlitten hat, während x, y, z, x_1, y_1 konstant bleiben. Nun ist aber $\frac{dR}{dz_1} = \frac{z - z_1}{R}$ oder da z_1 in unserem Falle $= 0$ ist, $= \frac{z}{R}$ und dz_1 ist $= LL_1 = rd\omega$, also $PdR = \frac{z}{R} \cdot rd\omega$, d. h. die negative Arbeit der überwundenen Kräfte ist genau gleich der bei der Zusammenziehung um den Betrag dR geleisteten positiven Arbeit der Muskelspannung $= PdR$, was zu beweisen war. Ist die Gegenkraft die blossе Trägheit, so erfolgt durch die Zusammenziehung eine Winkelbeschleunigung, welche mit dem Trägheitsmoment multiplicirt der ganzen Arbeit entspricht, soweit nicht die Arbeit, wie oben (S. 244) erwähnt wurde, bei schneller Zusammenziehung im Muskel selbst unter dem Einflusse innerer Widerstände Wärme erzeugt. Der Gelenkapparat thut auch in diesem Falle der äusseren Wirkung der Arbeit keinen Abbruch. Was hier für ein Arbeitsdifferential bewiesen ist, gilt ohne weiteres für jede end-

liche Zusammenziehung, während welcher die Spannung und die Gegenkraft (resp. Beschleunigung) beliebig variiren können.

Wenn man von der genauen mathematischen Vergleichung absehen will, so kann man den vorstehend streng bewiesenen Satz der Anschauung näher bringen durch die Bemerkung, dass, wenn die Muskelspannung schräg gegen die Drehungsebene wirkt, sie zwar nur eine kleinere Gegenkraft überwinden kann, diese aber durch eine um so grössere Wegstrecke überwindet, welche den Betrag der Muskelverkürzung bedeutend übertrifft.

II. Einfluss der Gelenke auf die Entwicklung der Muskelspannung.

Die Anknüpfung der Muskeln an Knochen und die Zusammenfügung der letzteren durch Gelenke hat also, wie gezeigt ist, keinerlei bestimmenden Einfluss auf den Betrag der Arbeit, welche die einmal als solche auftretenden elastischen Spannkkräfte der Muskeln bei der Zusammenziehung leisten, wohl aber kann diese Verknüpfung Einfluss darauf haben, wie viel elastische Spannung bei einer bestimmten Zusammenziehung überhaupt zur Entwicklung kommt. In der That wurde ja S. 242 nachgewiesen, dass nur ganz geringe Spannungswerthe überhaupt zur Entwicklung kommen, wenn die Zusammenziehung schon erfolgen kann während der Zeit, während welcher der Uebergang aus dem ruhenden in den erregten Zustand stattfindet; dass dagegen die höchsten möglichen Spannungswerthe entwickelt werden, wenn in der Zeit während welcher der Muskel in den erregten Zustand übergeht noch gar keine Verkürzung stattfinden kann. Je nachdem das eine oder das andere geschieht, leistet dann eine Verkürzung um den gleichen Betrag mehr oder weniger Arbeit. Wenn z. B. der in Fig. 1 S. 242 gedachte Muskel von der Länge ko sich verkürzt auf die Länge kp , so kann die geleistete Arbeit in einen Falle dem Rechteck $olep$, im andern Falle dem Trapez $onep$ gleich sein. Ob das Eine oder das Andere oder ein Mittleres geschieht, hängt, wie gezeigt wurde, von äusseren Umständen ab, so dass hierauf die natürliche Verknüpfung des Muskels mit Knochen Einfluss haben kann.

Unter den für den Muskel äusseren Umständen, welche bei seiner Zusammenziehung im lebenden Körper auf die Arbeitsleistung Einfluss haben, ist zuvörderst noch einer zu erwähnen, welcher mit den Gelenkeinrichtungen nicht in Zusammenhang steht nämlich die Art der Erregung durch das Nervensystem. Diese kann nämlich

sehr allmählich geschehen, so dass die Zeit des Ueberganges aus dem ruhenden Zustand in den vollständig erregten eine sehr lange wird. Wenn in einem solchen Falle ausser der Trägheit des Gliedes keine andere Gegenkraft sich der Zusammenziehung widersetzt, so ist die geleistete Arbeit nicht viel von Null verschieden. Dies wäre z. B. der Fall, wenn wir den Vorderarm in einer Horizontalebene ganz langsam beugen. Ganz gleich Null kann freilich die geleistete Arbeit im lebenden Körper niemals sein, weil eine Gegenkraft ganz unvermeidlich ist, nämlich die Spannung der bei der Bewegung des Gliedes zu dehnenden Muskeln. Sind aber diese im ruhenden Zustande, so ist diese Arbeit nur unbedeutend, da bei der grossen Dehnbarkeit der Muskelfaser die Spannung eines Muskels selbst bei der Lage des Gelenkes, wo sein Ansatz vom Ursprunge am weitesten entfernt ist, im ruhenden Zustande nicht gross sein wird.

Der Muskel kann aber im lebenden Körper vom Nervensysteme aus auch eben so schnell in den erregten Zustand versetzt werden, wie durch einen künstlichen — etwa einen elektrischen — tetanisirenden Reiz, so dass der ganze Uebergang nur Bruchtheile einer Sekunde dauert. In diesem Falle hat die Gelenkeinrichtung grossen Einfluss auf die Entwicklung der höheren Spannungsgrade. Bei den grösseren Gliedmassengelenken ist in diesen Fällen schon die blosse Trägheit der Entwicklung der höheren Spannungsgrade günstig. Die auf diese Gelenke wirkenden Muskeln sind nämlich alle mindestens mit einem Ende sehr nahe der Drehaxe oder dem Drehpunkte des Gelenkes befestigt. Eine kleine Verkürzung der Fasern erfordert also immer schon eine grosse Drehung im Gelenk. Andererseits ist aber bei der langgestreckten Gestalt der Gliedmassen ihr Trägheitsmoment in Bezug auf die Axen des Gelenkes verhältnissmässig gross. Es wird daher die Winkelbeschleunigung durch kleine Spannungen der Muskeln sehr gering ausfallen, und ein Glied wird in den ersten Bruchtheilen einer Sekunde, in welchen sich der erregte Zustand entwickelt, dem schwachen Zuge, auch wenn keine Gegenkräfte wirksam sind, noch nicht weit gefolgt sein können. So kommt also im Allgemeinen der erregte Zustand bei energischer plötzlicher Reizung durch das Nervensystem zu nahezu vollständiger Entwicklung noch ehe die Länge des Muskels erheblich abgenommen hat, d. h. es kommen nahezu die höchsten möglichen Spannungswerthe zur Geltung, fast so als ob die Muskeln während der Entwicklung des vollen Erregungszustandes ganz an der Verkürzung verhindert worden wären. So erklärt es sich, dass dann hernach bei der wirklichen weiteren Verkürzung eine sehr bedeutende Arbeit

geleistet werden kann, deren Effekt in einer enormen Winkelbeschleunigung des Gliedes besteht, wie man recht augenfällig bei einem geschickten Steinwurf sehen kann. Natürlich geht aber bei dieser Art der Verwendung der Muskelkraft ein Theil der Arbeit durch Erzeugung von Wärme unter dem Einfluss der inneren Reibung in dem sich sehr schnell zusammenziehenden Muskel für den äusseren Effekt verloren (S. 244).

Bei manchen Bewegungen der grossen Gliedmassen haben die Gelenkeinrichtungen auch den Erfolg, dass die Muskeln sich nach dem weiter oben (S. 244) erörterten Entlastungsprincipe zusammenziehen, so dass der höchste theoretisch mögliche mechanische Effekt

einer Tetanisirung wenigstens sehr annähernd erreicht wird. Um ein Beispiel davon zu geben, betrachten wir die Erhebung des Körpers aus nieder-kauernder Stellung auf die Zehen und zwar zunächst die Wirkung der Extensores cruris. In Fig. 14 ist ein menschlicher Körper in drei Phasen der fraglichen Bewegung skizzirt. Wenn, wie wir voraussetzen wollen, der Fuss von Anfang an hohl steht, so muss das Loth durch den Schwerpunkt S von Anfang bis zu Ende des Aktes durch die Metatarsusköpfchen gehen, da mit weder nach vorn noch nach hinten der Körper überfällt. Auf das Kniegelenk wirkt nun die Schwere in der über A gezeichneten Lage an dem sehr grossen Hebelarm KQ , wenn in K die Axe des Kniegelenkes die Ebene der Zeichnung schneidet. Die Schwere übt also im Anfang ein sehr grosses Moment aus und die Kontraktion der Extensoren kann nicht eher wirklich beginnen, als bis ihr Moment dem entgegengesetzt drehenden der Schwere gleich geworden ist. Da aber die Resultante der Extensoren an einem viel kleineren Hebelarm wirkt, so setzt dies eine sehr grosse Spannung voraus und es kann

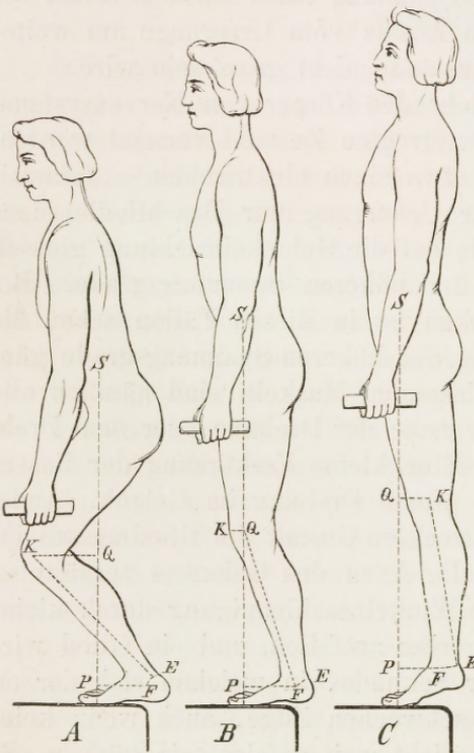


Fig. 14.

Die Schwere übt also im Anfang ein sehr grosses Moment aus und die Kontraktion der Extensoren kann nicht eher wirklich beginnen, als bis ihr Moment dem entgegengesetzt drehenden der Schwere gleich geworden ist. Da aber die Resultante der Extensoren an einem viel kleineren Hebelarm wirkt, so setzt dies eine sehr grosse Spannung voraus und es kann

also die wirkliche Zusammenziehung erst beginnen, nachdem der Tetanus vollständig entwickelt ist. Sowie aber dies der Fall ist, beginnt auch die Entlastung der Strecker. In der That wird ja der Hebelarm der Schwere am Kniegelenk im Verlaufe der Streckung immer kleiner. Schon in der über *B* dargestellten Lage des Körpers ist er (*KQ*) fast Null geworden und das Moment der Schwere wird also ebenfalls immer kleiner. Da aber der Hebelarm, an welchem die Strecker wirken, wohl annähernd konstant bleibt, so kann die Spannung derselben abnehmen, wie es der einfach elastischen Zusammenziehung bei gleichbleibendem Erregungszustande entspricht, ohne dass das Uebergewicht der streckenden Muskelwirkung über die beugende Wirkung der Schwere aufhört. Im letzten Stadium der Bewegung (s. *C* Fig. 14) geht sogar das Loth durch den Schwerpunkt vor der Axe des Kniegelenkes vorüber, so dass die Strecker desselben vollständig erschlafft sein dürfen, da ihnen gar kein Moment der Schwere mehr zur Last fällt. In der That kann man auch an einem aufstehenden Menschen leicht fühlen, dass nach vollständiger Erhebung die Kniescheibe ganz locker sitzt, d. h. die Strecker völlig entspannt sind.

Aehnlich wie die Strecker des Kniegelenkes verhält sich bei dieser Bewegung der *Musculus soleus*, dessen Zugrichtung etwa in die Gerade vom Fersenhöcker nach der Drehaxe des Kniegelenkes (*KE* Fig. 14) fallen mag. Das Moment seiner Spannung muss am Sprunggelenke (dessen Axe mit *F* in Fig. 14 angedeutet ist) dem Moment der Schwere Gleichgewicht halten resp. es überwinden. Nun bleibt der Hebelarm der Schwere am Sprunggelenk *FP* offenbar konstant, so lange der Fuss wagrecht steht, aber in diesem Stadium der Bewegung wird der Hebelarm der Muskelspannung (*FE*) grösser, da sich die Achillessehne vom Sprunggelenke etwas abhebt, und aus diesem Grunde muss anfangs die Spannung sehr gross sein, so dass sich der Tetanus vor der Verkürzung vollständig entwickelt und sie darf dann abnehmen, ohne dass das Moment verkleinert würde. Wenn dann im weiteren Verlaufe der Bewegung die Ferse erhoben wird, so wird der Hebelarm der Schwere (s. *FP* in der über *C* gezeichneten Lage) kleiner und aus diesem Grunde nimmt das Moment der Schwere selbst ab, so dass die Spannung des *Soleus* noch kleiner werden kann, ohne von der Schwere überwunden zu werden. Ganz Null darf allerdings die Spannung des *Soleus* auch am Schlusse der Bewegung nicht werden, wie dies bei den Kniestreckern der Fall war.

III. Zweigelenkige Muskeln.

Bekanntlich überspringen viele Muskeln der Gliedmassen zwei oder sogar mehr als zwei Gelenke und können somit auf sie drehend wirken. Diese Einrichtung findet sich so durchgängig bei allen Wirbelthieren mit reichgegliederten Extremitäten, dass ihr unzweifelhaft eine besondere teleologische Bedeutung zukommen muss. Es bieten sich in dieser Richtung verschiedene Erwägungen dar. Erstens ist die einfache Thatsache, dass derselbe Motor abwechselnd für zwei verschiedene Bewegungen gebraucht werden kann, ein grosser Vortheil, wie aus folgender Betrachtung erhellt. Wenn verlangt wird, dass bei Streckung des Hüftgelenkes einerseits und bei Beugung des Knies andererseits an einem bloss mit eingelenkigen Muskeln versehenen Bein ebenso viel Arbeit verfügbar sein sollte, so müsste offenbar erstens am Hüftgelenk ausser seinen wirklich vorhandenen eingelenkigen Muskeln noch eine dem Semitendinosus, Semimembranosus und langen Bicepskopfe gleiche Muskelmasse vorhanden sein, da ja die zu leistende Arbeit der ganzen Muskelmasse — nicht etwa bloss dem Querschnitte — proportional ist und andererseits müsste auch am Kniegelenk neben den eingelenkigen Beugern eine jenen drei Muskeln gleiche Masse noch einmal eingelenkig angebracht sein. Die ganze Muskelmasse des Beines wäre also um den ganzen Betrag der zweigelenkigen Beuger zu vergrössern. Freilich könnten jetzt die Kniegelenkmuskeln vollständig ruhen, während das Hüftgelenk zu strecken ist und die Hüftgelenkmuskeln könnten ruhen, während das Kniegelenk gebeugt wird. Da aber jeder Muskel wie eine zum Gebrauch bereit stehende Dampfmaschine auch während der Ruhezeit einen fortwährenden Aufwand von Brennmaterial erfordert, so würde die Einrichtung, ganz abgesehen von der Erschwerung und Vergrösserung des Gliedes auch eine Verschwendung von Brennmaterial herbeiführen. Man könnte allerdings hiergegen einwenden, dass, wenn ein zweigelenkiger Muskel nur am einen Gelenke arbeiten soll, sein Moment am andern Gelenke durch Spannung von eingelenkigen Antagonisten im Gleichgewichte gehalten werden muss, was im Allgemeinen wohl nie ohne einige Erregung und folgeweise Steigerung des Materialverbrauches über den in der Ruhe stattfindenden Werth hinaus geschehen kann. Wenn z. B. Semimembranosus, Semitendinosus und Biceps lediglich streckend am Hüftgelenk wirken sollen, so muss ihr Moment am Kniegelenk durch Spannung der Vasti aufgewogen werden. Nun ist aber sicher der Materialverbrauch zur blossen Aufrechterhaltung einer gewissen Span-

nung sicher bedeutend kleiner als der Verbrauch bei wirklicher Arbeitsleistung. Es kann daher wohl sein und ist sogar sehr wahrscheinlich, dass dieser Aufwand zur Aequilibrirung der zweigelenkigen Muskeln am ruhig bleibenden Gelenke im Grossen und Ganzen doch weit zurücksteht hinter dem, welcher durch die Vermehrung der gesammten Muskelmasse eingeführt würde, welche erforderlich sein würde, wenn lediglich eingelenkige Muskeln an jedem Gelenke dieselbe Arbeit sollten leisten können. Dieser Vermuthung kommt noch der Umstand zu Hülfe, dass die eingelenkigen Antagonisten, die ja doch einmal für andere Zwecke vorhanden sein müssen, im Allgemeinen kürzere Fasern haben und also schon bei geringer Dehnung bei mässiger Erregung eine grosse Spannung erreichen. Mit Hülfe der neueren myothermometrischen Methoden dürfte es wohl gelingen, diesen Betrachtungen auch eine numerische Grundlage zu verschaffen.

Wichtig für die teleologische Bedeutung der zweigelenkigen Muskeln ist jedesfalls auch der Umstand, dass die Spannung, welche ihnen durch Stellung des einen Gelenkes ertheilt wird, auf das andere Gelenk wirken kann. Dieser Umstand ist schon von BORELLI beachtet. Er zeigt (prop. 28 u. 29), dass man bei senkrecht gehaltenem Femur und wagrechter Tibia an der Ferse ein grösseres Gewicht tragen kann, wenn das Becken im Hüftgelenk vorn übergebogen ist, als wenn der Rumpf aufrecht steht. Im ersten Falle sind nämlich die zweigelenkigen Flexores genu mehr gedehnt und haben also bei gleichem Erregungszustande eine grössere Spannung. Dieser Umstand kann möglicherweise auch für die dynamische Ausnutzung der Arbeit von Bedeutung werden. Der dynamische Erfolg der Zusammenziehung eines Muskels ist nämlich um so grösser, von je grösserer Länge die Zusammenziehung ausgeht. Nun könnten gewisse periodisch wiederholte Bewegungen so verlaufen, dass bei einem Akte derselben zweigelenkige Muskeln im ruhenden Zustande durch sehr geringfügige Arbeit anderer Muskeln an einen Gelenke gedehnt werden und dass sie sich dann von dieser gedehnten Länge aus im zweiten Akte mit um so grösserer Energie kontrahirten. Auf diese Art könnten z. B. die Gastrocnemii beim Gehen sehr zweckmässig¹ als zweigelenkige Muskeln verwendet werden, wenn sich zeigen liesse, dass dieselben im ersten Stadium der Ausstreckung des Schenkels, wo sich die Streckung auf das Kniegelenk beschränkt, noch im ruhenden Zustande wären. Dann würde in diesem Stadium

¹ A. FICK, Untersuchungen über Muskelarbeit S. 39. Basel 1867.

ein ganz kleiner Bruchtheil der Arbeit der Schenkelstrecker auf ihre Ausdehnung verwandt werden und sie könnten dann mit um so viel grösserer Kraft hernach im zweiten Stadium bei Streckung des Sprunggelenkes mitwirken. Ihr grosses Moment am Kniegelenk würde in diesem Stadium der Bewegung nicht einmal mehr den Schenkelstreckern zur Last fallen, sondern durch die Schwere aufgewogen werden, da zu dieser Zeit der Schwerpunkt des Körpers schon vor die Kniegelenkaxe fällt.

So beginnt man z. B. auch einen Steinwurf mit pronirtem Vorderarm. Dadurch wird nämlich der Biceps mehr ausgedehnt und kann also energischer bei der Adduktion des Humerus mitwirken.

Die zweigelenkigen Muskeln haben aber auch eine zweckmässige Verwendung — was auf den ersten Blick als eine Paradoxie erscheint — bei solchen Bewegungen, wo das eine Gelenk im Sinne einer Zusammenziehung, das andere im Sinne einer Ausdehnung derselben gedreht wird. Wenn dabei die Längenänderungen in entgegengesetztem Sinne durch die beiden Gelenkdrehungen gleich viel betragen, so leistet der zweigelenkige Muskel keine Arbeit, sondern wirkt wie ein rein physikalisch elastischer Strang. Diese Wirkung besteht nämlich darin, dass ein Theil der Arbeit, welche gewisse, bloss das eine Gelenk überspringende Muskeln leisten, durch die Spannung des Stranges auf das andere Gelenk übertragen wird. Es könnte nun vom teleologischen Standpunkt scheinen, als liesse sich in dieser Funktion der zweigelenkige Muskel durch einen blossen biegsamen und möglichst wenig dehnbaren Faden — etwa einen Sehnenstrang — mit Vortheil ersetzen, da ein solcher jeden erforderlichen Spannungsgrad durch geringfügige Dehnung gleichsam von selbst annimmt und behauptet, ohne dass ein Verbrauch von Brennmaterial zur Erhaltung der bestimmten Spannung wie beim Muskel erforderlich ist. In der That wäre auch unzweifelhaft die Verwendung eines bloss physikalisch elastischen Stranges zweckmässig, wenn es sich um einen Mechanismus handelte, bei dessen Gebrauch mit einer gewissen Stellung des einen Gelenkes immer dieselbe Stellung des andern verknüpft sein dürfte. Ein solcher elastischer Strang von grossem Elasticitätsmodulus nämlich lässt bei einer gewissen Stellung des einen Gelenkes nur gewisse Stellungen des andern zu, die eben keine merkliche Dehnung des Stranges verlangen. Solche Einrichtungen sind (wenn ich nicht irre) in den Extremitäten der Vögel, wo es es auf eine ganz einseitige Leistung abgesehen ist, vielfach verwirklicht. Soll aber der Mechanismus eines vielseitigeren Gebrauches fähig sein, so kann der Erfolg einer Uebertragung der

Arbeit nur erzielt werden durch zweigenkige Muskeln, d. h. durch elastische Stränge, welche die Fähigkeit haben, bei sehr verschiedener Länge in weiten Grenzen jeden beliebigen Spannungsgrad annehmen und aufrecht halten zu können.

Der vorstehende Gedankengang ist in einer besonderen Untersuchung von EUGEN FICK¹ mit Bezug auf den Rectus femoris genau numerisch durchgeführt. Vor Allem ist durch Beobachtung am lebenden Menschen festgestellt, dass dieser Muskel bei gleichzeitiger Ausstreckung des Hüft- und Kniegelenkes, wie sie zur Erhebung des Rumpfes aus kauender Stellung geschieht, wirklich im erregten Zustande ist. Weiter ist durch Messungen festgestellt, dass dabei die Länge des Muskels kaum merklich geändert wird, er also selbst zu der Arbeit der Erhebung des Schwerpunktes unmittelbar fast nichts beiträgt. Dahingegen wird gezeigt, dass eine sehr bedeutende Arbeit durch seine Vermittelung von Seiten der Hüftextensoren (Glutaeus etc.) am Kniegelenke geleistet wird. Sie wird auf etwa $\frac{1}{12}$ der ganzen zur Erhebung des Schwerpunktes erforderlichen Arbeit geschätzt. In der citirten Abhandlung wird endlich noch der Vortheil erörtert, den der Organismus davon hat, wenn die Hauptmotoren mehr um die centraler gelegenen Gelenke angehäuft sind, wie es eben durch die Uebertragung ihrer Arbeit auf weiter peripherisch gelegene Gelenke ermöglicht wird. Wäre z. B. kein zweigenkiger Strecker vorhanden und statt dessen ein entsprechender Theil der Hüftgelenkmuskeln eingelenkig am Kniegelenk angebracht, so würde die Kniegegend erschwert werden und es müsste also bei jedem Schritt auf ansteigender Bahn eine grössere Last vergeblich um den Betrag erhoben werden, um welchen eben die Kniegegend beim Aufsetzen des Fusses wieder sinkt. Dieser Erwägung kann noch die hinzugefügt werden, dass, je weiter peripheriewärts eine Muskelmasse an der Extremität angebracht ist, desto grösser ihr Trägheitsmoment bezüglich der Drehaxen des centralsten Gelenkes ist, was also rasche Bewegungen hervorzubringen und zu hemmen erschweren würde.

IV. Maass der möglichen Arbeit des Muskels am Gelenke.

Um sich von der ganzen Arbeit, welche ein Muskel an einem Gelenke zu leisten vermag, eine annähernde Vorstellung zu verschaffen, muss man vor allen Dingen wissen, um welchen Betrag sich derselbe vermöge des Bewegungsumfanges des Gelenkes zusam-

1 EUGEN FICK, Arch. f. Anat. u. Physiol. Anat. Abth. 1879. S. 201.

menziehen kann oder mit andern Worten, durch welche Wegstrecke der Angriffspunkt seiner Spannung dieser Spannung folgen kann. Man müsste zu diesem Ende erstens dem Gelenke diejenige Stellung geben, bei welcher der Ansatz des Muskels von seinem Ursprunge möglichst fern ist und die Entfernung messen; dann müsste man die Stellung suchen, bei der Ansatz und Ursprung einander möglichst nahe sind und diese kleinste Entfernung müsste von der grössten abgezogen werden. Die Differenz wäre die gesuchte Wegstrecke oder die mögliche Kontraktionsgrösse. Am bequemsten kann die Bestimmung dieser Grösse auf folgende Art ausgeführt werden: Man steckt an einem Gelenkpräparate in die Ansatzstelle des Muskels ein Häkchen und bindet daran einen Faden, der durch ein an der Ursprungsstelle befestigtes Ringelchen gezogen ist; dieser Faden geht nun über eine an dem den Ursprungsknochen tragenden Stative befestigte Rolle und wird durch ein an seinem Ende angebrachtes mässiges Gewicht in Spannung erhalten. Man sucht jetzt durch Probiren diejenige Stellung des Ansatzknochens, bei welcher das den Faden spannende Gewicht am höchsten steht, und hierauf diejenige, bei welcher es am tiefsten steht. Die Differenz dieser beiden Höhen, welche an einem Maassstabe ohne Weiteres abgelesen werden kann, ist offenbar die gesuchte Differenz zwischen der grössten und kleinsten möglichen Länge des Muskels.

Exakte Messungen dieser Art sind vor Kurzem von EUGEN FICK¹ an einigen Schulter und Ellenbogenmuskeln ausgeführt worden und mögen ihre Zahlenergebnisse in den nachstehenden Tabellen Platz finden, die ohne weitere Erklärung verständlich sein dürften.

Bewegungen im Schultergelenk.

| Name des Muskels. | Lage des Humerus, wenn der Muskel maximal verkürzt ist. | Lage des Humerus, wenn der Muskel möglichst gedehnt ist. | Unterschied zwischen der grössten u. kleinsten Länge des Muskels. |
|---------------------------|---|--|---|
| 1. Coracobrachialis . . . | flex., add., rot. n. innen | ext. abd. rot. n. aussen (spur.) | 76 mm. |
| 2. | I. flex. (wenig) abd. (max.) rot. aus | ext. (wenig) abd. (wenig) rot. in. | 61 |
| 3. Infraspinatus . | II. flex. (wenig) abd. (viel) rot. aus. | ext. abd. rot. in. | 65 |
| 4. | III. flex. u. abd. (etwa 35°) rot. aus. | — abd. rot. in. | 64 |

¹ Arbeiten aus dem physiologischen Laboratorium der Würzburger Hochschule. Herausgegeben von A. FICK. IV. Würzburg 1878.

Bewegungen im Schultergelenk.

| Name des Muskels. | Lage des Humerus, wenn der Muskel maximal verkürzt ist. | Lage des Humerus, wenn der Muskel möglichst gedehnt ist. | Unterschied zwischen der grössten u. kleinsten Länge des Muskels. |
|--------------------------------|---|--|---|
| 5. Teres major | I. ext.(wenig) add. (spur) | flex.(max.)abd. (etwas) | 112 mm. |
| 6. | II. rot. in. | rot. aus. | 116 |
| 7. Supraspinatus | I. flex. (max.) abd. | ext. (max.) add. rot. | 54 |
| 8. | II. (wenig) rot. in. | in. (aber weniger) | 55 |
| 9. | I. rot. in. | rot. aus. | 58 |
| 10. Subscapularis | II. rot. in. | ext. abd. (wenig) rot. | 57 |
| 11. | III. aus. | aus. | 52 |
| 12. | IV. ext. abd. (etwa 30°) | flex. abd. (90°) rot. | 73 |
| 13. Cap. long. bicip. | rot. in. | aus. | 40 |
| 14. Cap. brev. bicip. | flex. add. rot. in. | ext. add. rot. aus. | 64 |
| 15. Cap. long. tricip. | ext. | flex. abd. (s. wenig) | 68 |
| | | rot. aus. (wenig.) | |

Bewegungen im Ellenbogengelenk.

| Name des Muskels. | Mögliche Verkürzung durch Beugung und Streckung bei | | Mögliche Verkürzung durch Pro- und Supination bei | | |
|-------------------------------|---|-------------------|---|---------------------------------|--------------------------|
| | pronirtem Radius | supinirtem Radius | gestrecktem Unterarm. | rechtwinkl. gebeugtem Unterarm. | ganz gebeugtem Unterarm. |
| 1. Cap. breve bicip. | 77 mm. | 81 mm. | 2 mm. | 13 mm. | 8 mm. |
| 2. Cap. long. bicip. | 77 | 82 | 3,5 | 16,5 | 11 |
| 3. Cap. long. tricip. | | 43 | — | — | — |
| 1. Cap. breve bicip. | 85 | | 8 | 25 | 14 |
| 2. Cap. long. tricip. | | 51 | — | — | — |

Schon im Jahre 1851 hat ED. WEBER¹ ähnliche Messungen und zwar fast für sämtliche Skelettmuskeln des Körpers ausgeführt. Leider fehlen gerade die von FICK behandelten Muskeln bei WEBER zum grossen Theil, so dass man nur für Biceps und Cap. long. tricipitis die Resultate vergleichen kann. Hier hat nun WEBER die Verkürzung erheblich kleiner gefunden, nämlich für den Biceps (kurzer und langer Kopf sind nicht unterschieden) 86 und für den langen Kopf des Triceps 92. Nach E. FICK's Bestimmungen käme dem Caput longum bicipitis wenn man die Verkürzungen an den beiden

1 ED. WEBER, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. Mathem.-phys. Kl. 1851.
Handbuch der Physiologie. Bd. Ia. 19

Gelenken (40 und 81) addirt, eine Verkürzungsmöglichkeit von 121 mm. zu und dem Cap. long. tricipit. ($68 + 43 =$) 111 zu.

Aber auch die Verkürzungen anderer Muskeln scheinen von WEBER kleiner angegeben, wie sie sich nach der von FICK angewandten Methode finden würden. Man kann nämlich eine Vergleichung auch für die von WEBER nicht berücksichtigten Muskeln durchführen mit Hilfe eines von WEBER aus seinen Messungen gefolgerten Gesetzes, welches dahin lautet, dass die maximale Länge der Fleischfasern eines Muskels ungefähr das Doppelte ihrer minimalen Länge beträgt oder mit andern Worten: die Fleischfasern aller Muskeln sind so lang, dass sie sich vermöge des Bewegungsumfanges der Gelenke, auf welche sie wirken, von der grössten Länge, zu welcher sie gedehnt werden können, gerade etwa um die Hälfte dieser Länge verkürzen können. In der angezogenen Arbeit giebt nun WEBER eine Tabelle von der maximalen Länge der Fleischfasern, welche auch die von FICK auf ihre Verkürzung geprüften Schultermuskeln umfasst. Hier ist die grösste Länge einer Faser des Coracobrachialis mit 61,5 mm. verzeichnet, während FICK als mögliche Verkürzung dieses Muskels 76 mm. (!) gefunden hat. Die längste Faser des Supraspinatus giebt WEBER zu 65 mm. an, so dass nach seinem Gesetze eine Verkürzung von 32 mm. zu erwarten wäre. FICK fand sie = 58 mm. u. s. f. Diese Widersprüche können nicht durch blosser individuelle Verschiedenheiten der der Messung unterworfenen Leichen erklärt werden. Vielmehr ist es wahrscheinlich, dass die Methode, nach welcher WEBER die grösste Länge und die Verkürzung bestimmt hat, kleinere Zahlen liefern musste. Diese Vermuthung wird auch noch dadurch bestätigt, dass GUBLER¹, der auf meine Veranlassung schon vor längeren Jahren solche Messungen anstellte, meist weit grössere Verkürzungen erhalten hat, als nach dem WEBER'schen Gesetze zu erwarten waren. Jedesfalls verdient dieser von WEBER zuerst ins Auge gefasste fundamentale Punkt der speciellen Bewegungslehre die volle Aufmerksamkeit der deskriptiven Anatomie. Der Gedanke WEBER's, dass zwischen der grössten und kleinsten möglichen Länge der Fleischfasern eine gesetzliche Beziehung von allgemeiner Geltung besteht, hat sehr grosse Wahrscheinlichkeit, da anzunehmen ist, dass eine Fleischfaser, welche nicht oft in gewissem Maasse gedehnt und zusammengezogen wird, an ihren Enden allmählich verödet und sich theilweise in eine Sehnenfaser verwandelt.

¹ GUBLER, Ueber die Längenverhältnisse der Fleischfasern einiger Muskel-fasern. Zürcher Inauguralabhandlung 1860.

Ist die Verkürzung, welche der Gelenkmechanismus zulässt, bekannt und ist erwiesen, dass die kleinste Länge durch vollständige Entspannung im erregten Zustande auch wirklich erreichbar ist, so kann man sich sofort von der Arbeit, welche der Muskel an diesem Mechanismus zu leisten vermag, eine deutliche Vorstellung bilden, wenn man über die Anfangsspannung und über die Dehnungskurve geeignete Annahmen macht. Lässt man z. B. diese in erster Annäherung für eine gerade Linie gelten, und nimmt an, dass mit der vollen Zusammenziehung die Spannung auf Null herabsinkt, so ist die bei einer Zusammenziehung nach vollentwickeltem Tetanus mögliche Arbeit zu messen durch den Flächeninhalt eines Dreiecks, dessen Grundlinie die Anfangsspannung und dessen Höhe die Zusammenziehung ist, oder sie ist gleich dem halben Produkt aus Anfangsspannung und Verkürzung, also *ceteris paribus* der Verkürzung proportional. Die Anfangsspannung selbst ist aber alles Uebrige gleichgesetzt proportional dem Querschnitt des Muskels resp. desjenigen Muskeltheiles, welcher für diese Betrachtung als wirkende Einheit betrachtet werden muss.

An der Hand der S. 289 mitgetheilten Zahlen lassen sich über die Arbeit mehrgelenkiger Muskeln noch einige Bemerkungen machen. Das *Caput longum bicipitis* z. B. kann eine Verkürzung von 40 mm. durch Drehung des Schultergelenkes und von 81 mm. durch Bewegung in den Ellenbogengelenken (Beugung und Supination) erleiden, im Ganzen also 121 mm. Es ist nun kaum zu bezweifeln, dass die Fasern des Biceps dieser vollen Verkürzung ohne Faltung fähig sind, ja sie vermögen wahrscheinlich auf der Höhe des erregten Zustandes bei dieser Verkürzung immer noch eine merkliche Spannung auszuüben. Um sich davon zu überzeugen, bringe man den Arm in die Lage, bei welcher der Biceps das Minimum seiner Länge hat, Schultergelenk in Flexion und Rotation nach innen, Ellenbogengelenk in Flexion Radioulnargelenk in Supination, man wird jetzt immer noch durch willkürliche Anstrengung im Biceps eine für den zufühlenden Finger der andern Hand wahrnehmbare Spannung hervorbringen können. Sehen wir indessen von dieser gewiss nicht mehr grossen Spannung ganz ab und nehmen der Einfachheit wegen an, der lange Kopf des Biceps erreiche das von den Gelenken zugelassene Minimum seiner Länge mit der Spannung Null, und er habe für eine in runder Zahl um 120 mm. grössere Länge bei vollentwickeltem Tetanus eine Spannung = P kg. Stellen wir diese durch die Linie OM (Fig. 15) dar und errichten wir in O eine senkrechte OL so lang als die Verkürzung beträgt (in der Figur ist, um Raum zu

sparen, der Maassstab auf die Hälfte reducirt), so ist LM die Dehnungskurve des Biceps, wenn wir dieselbe für eine gerade Linie gelten lassen, und der Flächenraum des Dreiecks $LOM = \frac{1}{2} \cdot P \cdot 120$ Kilogramm-meter, ist die Arbeit, welche der Bicepskopf bei seiner ganzen

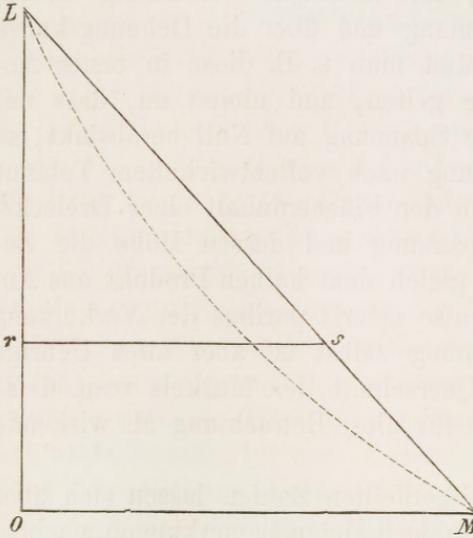


Fig. 15.

Verkürzung an beiden Gelenken zu leisten vermag. Es wäre aber ein grosser Irrthum, wenn man glauben wollte, von dieser Arbeit könnte auf das Schultergelenk unter allen Umständen nur $\frac{40}{120}$ (d. h. $\frac{1}{3}$) und auf das Ellenbogengelenk $\frac{80}{120}$ (also $\frac{2}{3}$) verwendet werden, weil von der ganzen Kontraktion (= 120 mm.) 40 mm. auf die Drehung im Schultergelenk, 80 mm. auf die Drehung im Ellenbogengelenk entfallen. Es kann vielmehr in Wahrheit auf das Schultergelenk weit mehr als $\frac{40}{120}$ verwendet werden. Es kommt

ganz darauf an, in welcher Reihenfolge die beiden Gelenke durch den Biceps bewegt werden. Wird z. B. zuerst das Schultergelenk gedreht, während der Muskel sich von seiner grössten Länge bis zu einer um 40 mm. kleineren kontrahirt, so wird auf dies Gelenk eine Arbeit verwandt, welche sich bemisst durch den Flächeninhalt des Trapezes $OrsM$, wenn das Stück Or 40 mm. vorstellt. Dieser Flächenraum ist aber $= \frac{1}{2} (120 - \frac{2}{3} \times 80) P = \frac{1}{2} \cdot 67 \cdot P$, also bedeutend grösser als der dritte Theil von $\frac{1}{2} \cdot 120 \cdot P$. Berücksichtigt man noch, dass die Dehnungskurve des Muskels in Wahrheit nicht die gerade Linie LM , sondern eine krumme Linie, etwa vom Verlaufe der punktirten ist, so stellt sich die berechnete Arbeit als ein noch grösserer Bruchtheil von der gesammten bei voller Zusammenziehung geleisteten Arbeit heraus. Analoge Betrachtungen lassen sich natürlich in Bezug auf andere mehrgelenkige Muskeln anstellen.

Die in diesem Capitel zusammengestellten allgemeinen Lehren über den dynamischen Effekt der elastischen Kräfte der Muskeln an den Gelenken sind freilich noch sehr lückenhaft, aber sie zeigen, wie mir scheint, dass hier ein sehr dankbares Feld der Untersuchung noch fast ganz un bebaut liegt. Es bietet eine Fülle von Einzelproblemen, welche einer ebenso leichten als zierlichen Lösung fähig sind.

SECHSTES CAPITEL.

Statische Momente der Muskelkräfte an den Gelenken.

I. Definition der Muskeleinheit.

Mehr als die dynamischen sind bis jetzt die statischen Probleme der Muskelmechanik bearbeitet worden. Es handelt sich dabei um die Frage, in welcher Bahn, in welchem Sinne und mit welcher Kraft strebt ein oder mehrere Muskeln den Knochen, an dem sie befestigt sind, in einer bestimmt angenommenen Lage zu bewegen, wenn auch noch die Spannung der Muskelfasern bekannt vorausgesetzt ist, d. h. eine wie gerichtete und wie grosse andere Kraft würde unter den durch das Gelenk gesetzten Bedingungen im gewählten Augenblicke den Muskelspannungen Gleichgewicht halten. Oder man kann auch die umgekehrte Frage stellen: in einer bestimmten Lage greife eine bestimmte Kraft den beweglich gedachten Knochen an, welcher Muskel oder welche Muskeln müssen in Spannung versetzt werden und in welchem Grade, um der angenommenen Kraft Gleichgewicht zu halten.

Um sich über diese Fragen zu orientiren, muss vor Allem festgesetzt werden, welche anatomischen Gebilde als mechanische Einheiten gelten sollen. Streng genommen ist jede einzelne Muskelfaser eine solche, da im Allgemeinen die Spannungen verschiedener Muskelfasern an Intensität und Richtung verschieden sein werden. Es würde aber zu einer unübersehbaren Verwickelung der Aufgaben führen und man wird Komplexe von Muskelfasern zweckmässig als wirkende Einheiten zusammenfassen. Dabei kann aber die anatomische Benennung solcher Komplexe mit einem Namen nicht wohl maassgebend sein. In der That fasst die Anatomie häufig unter einem Namen muskulöse Gebilde zusammen, deren verschiedene Theile sehr verschiedenartig auf das Gelenk wirken, oft sogar fast vollständig antagonistisch, wie dies z. B. für den *Musculus deltoideus* der Fall ist. Auch lässt sich zeigen, dass die verschiedenen Theile solcher Muskeln im Leben keineswegs als mechanische Einheiten verwendet werden, vielmehr ist bei der einen Bewegung dieser, bei einer andern jener Theil in Thätigkeit. Endlich würde in vielen Fällen gar keine Resultante der Spannungen sämmtlicher Fasern

existiren, so dass es also überhaupt unmöglich wäre, die Gesamtspannung des Muskels als eine Kraft in die Rechnung einzuführen. Man muss demnach viele einheitlich benannte Muskeln für die mechanische Betrachtung in mehrere Theile zerlegen. Jeder Theil muss vor Allem so beschaffen sein, dass die Spannungen seiner sämtlichen Fasern eine Resultante haben. Dies ist sicher dann der Fall, wenn die Richtungen der Fasern sich in einem Punkte schneiden, der übrigens auch in unendlicher Ferne liegen darf. Eine Resultante der sämtlichen einzelnen Faserspannungen wird auch dann existiren, wenn der Faserkomplex „gefiedert“ ist, etwa nach dem Schema der Fig. 16, was wohl keines besonderen Beweises bedarf. Hier müssen nur die Werthe der Spannungen der Bedingung genügen, dass immer die Resultirende der Spannungen zweier in der Mittelsehne sich treffender Fasern in die Richtung dieser Mittelsehne fällt.



Fig. 16.

Es wird in allen Fällen leicht möglich sein, einen von der deskriptiven Anatomie einheitlich benannten Muskel, der mechanisch nicht als Einheit behandelt werden kann, in solche Stücke passend zu zerlegen, deren Fasern entweder annähernd auf einen Punkt konvergiren oder gefiedert angelegt sind, so dass eine Resultante aller Spannungen angegeben werden kann. Auch wird es, wenn man die Theilstücke nicht allzugross wählt, immer erlaubt sein, als Richtung der Resultante die gerade Linie gelten zu lassen, welche zwei nach dem Augenmaasse in die

Mitte der Ursprungsfläche und der Ansatzfläche des Faserbündels gesetzte Punkte verbindet.

In sehr vielen Fällen trifft übrigens die anatomische Benennung der Muskeln mit einem Namen solche Faserkomplexe, welche auch vom mechanischen Gesichtspunkte aus als Einheiten gelten müssen. Dies ist namentlich immer dann der Fall, wenn die Fleischmasse des Muskels an beiden Enden in eine strang- oder bandförmige Sehne ausläuft. Diese haben an den Knochen nahezu punktuelle Befestigung und die Verbindungslinie dieser Punkte ist selbstverständlich dann die Richtung der resultirenden Kraft. Bei manchen Muskeln dieser Art setzen sich die Sehnen tief in die Fleischmasse fort und die eigentlichen Muskelfasern sind viel kürzer als es auf den ersten Blick scheinen könnte. Solche Muskeln sind gewöhnlich von einer Seite her betrachtet gefiedert, von der andern rhomboidal. Ein aus gezeichnetes Beispiel derart hat man im Gastrocnemius, besonders in dem des Frosches. Der rhomboidalen Anordnung der Fasern

zwischen zwei Sehnen spricht merkwürdigerweise BORELLI¹ die Möglichkeit ab, einem Zug an der einen Sehne durch ihre Spannung Gleichgewicht halten zu können. Offenbar ist aber dies doch möglich, selbstverständlich nur unter Berücksichtigung der Inkompressibilität der Muskelmasse, deren Fasern sich gegeneinander drücken. BORELLI lässt nur in dem Falle die Möglichkeit gelten, dass durch den rhomboidalen Muskel eine Kraft am Knochen im Gleichgewicht gehalten werden könne, wenn seine Fasern zwischen zwei starren Balken überspringen. Dieser Fall ist in ausgezeichnet schematischer Weise am menschlichen Körper verwirklicht in den *Mm. rhomboidei* des Schulterblattes und etwas weniger einfach in den *Mm. intercostales*. Es soll indessen hier nicht näher eingegangen werden in die ziemlich einfachen Ueberlegungen, welche sich über Zugrichtung und Zugkraft solcher Muskeln anstellen lassen, weil die Mechanismen, auf welche sie wirken, ziemlich verwickelte geometrische Bedingungen der virtuellen Bewegungen setzen, die sich nach dem heutigen Stande unserer Kenntnisse nicht wohl allgemein und systematisch behandeln lassen. Bezüglich solcher Detailfragen mag hier hingewiesen werden auf ein Werk von HAUGHTON², in welchem zahlreiche einzelne Probleme derart mathematisch behandelt sind.

Sind nach den vorstehend entwickelten Grundsätzen die mechanischen Muskeleinheiten gewählt und die Richtungen der Resultanten bestimmt, so kann man an die Lösung der im Eingange dieses Capitels bezeichneten Probleme gehen. Die Intensität der in der Richtung der Resultante wirksam zu denkenden Kraft ist, wenn der Muskel aus lauter parallelen Fasern besteht, gleich zu setzen dem Produkte aus Querschnitt und der für die Flächeneinheit des Querschnittes entwickelten Spannung. Wenn die Fasern des Muskels konvergiren oder gefiedert oder rhomboidal angeordnet sind, so wäre das Produkt noch mit einem Coefficienten zu multipliciren, der von der besonderen Form abhängt, der aber in den wirklich zu betrachtenden Fällen kaum von der 1 merklich verschieden ist.

II. Bestimmungen des Momentes am arthrodischen Gelenke bei gegebenen Spannungen.

Das allgemeinste und schwierigste der überhaupt bis jetzt in Angriff genommenen statischen Probleme der Muskelmechanik ist die vollständige Bestimmung der Richtung und Grösse einer Kraft,

1 BORELLI, Propos. V.

2 HAUGHTON, Principles of animal mechanics. 2. Aufl. London 1873.

welche an einem arthrodischen Gelenke in der Einheit der Entfernung vom Drehpunkt angebracht und senkrecht auf die Verbindungslinie ihres Angriffspunktes und des Drehpunktes wirkend der gegebenen Spannung eines oder mehrerer auf dasselbe Gelenk wirkender Muskeln Gleichgewicht hält. Man kann dieses Problem kurz bezeichnen als die Aufgabe, das „Moment“ zu finden, welches die Spannung eines oder mehrerer Muskeln an einem arthrodischen Gelenke hervorbringt. Ist dies Problem gelöst, so ergeben sich die Lösungen der entsprechenden Probleme für zwangsläufige Gelenke von selbst. Für die nicht zwangsläufigen Gelenke (Sattelgelenke etc.), welche nicht Arthrodielen sind, hat man bis jetzt noch nicht versucht, die statischen Grundprobleme zu behandeln, dieselben haben übrigens auch vorläufig geringeres Interesse, da diese Gelenke von geringerer Bedeutung für die grossen Bewegungen sind und andererseits ihr Muskelapparat keine solche Mannigfaltigkeit darbietet wie der der grossen Arthrodielen.

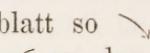
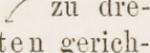
Die soeben aufgeworfenen Fragen kann man auch mehr anschaulich so formuliren. Wenn ein an einem arthrodischen Gelenke angebrachter Muskel eine gewisse Spannung ausübt, um welche Axe strebt er dann das Gelenk zu drehen? und mit welcher Kraft? d. h. welche Winkelbeschleunigung würde er, wenn das Glied seiner Spannung frei überlassen würde, demselben im nächstfolgenden Zeitdifferential ertheilen? endlich: was wird eintreten, wenn mehrere Muskeln gleichzeitig gespannt sind? Soll die erste dieser Fragen nur ungefähr beantwortet werden, so kann man an einem Präparate den betreffenden Muskel mit der Hand ziehen und zusehen, in welcher Richtung sich das Glied zu bewegen anfängt. Man kann auch versuchen, am lebenden Menschen zu beobachten, wie sich das Glied bei Zusammenziehung des Muskels bewegt. Natürlich muss dafür gesorgt werden, dass sich die zu untersuchende Muskelparthie ausschliesslich zusammenzieht, was durch lokale elektrische Reize meist hinlänglich genau geschehen kann. In dieser Weise hat DUCHENNE die Wirkung fast sämtlicher Muskeln des menschlichen Körpers sorgfältig untersucht und die Resultate der Untersuchung in seinem bewundernswerthen Werke¹ niedergelegt. So interessant diese Resultate auch sind, so kann in ihnen doch keine befriedigende Lösung der statischen Probleme der Muskelmechanik gefunden werden. Erstens nämlich wirkt bei solchen Versuchen wohl niemals die Spannung der gereizten Muskeln allein, denn es ist unmöglich, die bloss ela-

1 DUCHENNE, Physiologie des mouvements. Paris 1867.

stische Spannung der übrigen ruhenden Muskeln auszuschliessen und in weitaus der Mehrzahl der Fälle wirkt auch die Schwere des zu bewegenden Gliedes als fremde Kraft mit. Zweitens kann die Axe des Momentes oder die Axe, um welche der Muskel ein arthrodisches Gelenk zu drehen strebt, doch nur ungefähr nach dem Augenmaasse bestimmt werden und die Grösse des Momentes überhaupt gar nicht. Drittens endlich wird es nie möglich sein, auf dem Wege der Versuche mit elektrischer Reizung das resultirende Moment verschiedener Muskeln bei gegebenem Verhältnisse ihrer Spannungen zu ermitteln, denn wenn man auch mehrere Muskeln gleichzeitig reizen kann, so kann man doch nicht einen ganz bestimmten Spannungsgrad in jedem einzelnen willkürlich hervorbringen.

Um die Momente der auf ein arthrodisches Gelenk wirkenden Muskeln genau zu bestimmen, ist daher der einzige Weg Messungen an Präparaten von normal gebildeten Leichen anzustellen. Am einfachsten kann dies in folgender Weise ausgeführt werden. Bei einer wohl charakterisirten Stellung des Gelenkes bestimmt man in einem willkürlich gewählten System die rechtwinkligen Koordinaten der auf Punkte reducirten Ursprünge und Ansätze der Muskeln (im mechanischen Sinne des Wortes) und die Koordinaten des Drehpunktes. Es können dann durch einfache trigonometrische Rechnungen die Winkel gefunden werden, welche die Axe des Momentes eines Muskels mit den Koordinatenaxen bildet. In der That wird ja jeder Muskel für sich allein wirkend das Gelenk zu drehen streben um eine Axe, welche im Drehpunkt senkrecht steht auf der Ebene, welche die Richtung der Resultante des Muskels und den Drehpunkt enthält. Da man aber die Koordinatenwerthe von drei Punkten dieser Ebene kennt, nämlich des Ursprungs des Ansatzpunktes und des Drehpunktes, so kann man die Gleichung dieser Ebene sogleich hinschreiben und daraus die Winkel bestimmen, welche die auf ihr errichtete Normale mit den Koordinatenaxen bildet. Die Grösse des Momentes ist die Gesamtspannung des Muskels multiplicirt mit dem Arm des Momentes, d. h. dem vom Drehpunkt auf die Richtung der Resultante gefällten Perpendikel. Dies Produkt ist mit andern Worten die Kraft, mit welcher in der die Resultante und den Drehpunkt enthaltenden Ebene an einem der Längeneinheit gleichen Hebelarm senkrecht gezogen werden müsste, um der Muskelspannung Gleichgewicht zu halten.

Wenn die Axenrichtung und Grösse des Momentes für einen Muskel bestimmt ist, so bleibt noch der Sinn der Drehung anzugeben d. h. ob der Muskel den Knochen um die Axenrichtung nach der

einen oder der andern Seite herumdrehen strebt. Dies kann aber durch die Angabe der Winkel zwischen der Axenrichtung und den Koordinatenrichtungen gleich mitbezeichnet werden, wenn man folgende Verabredung ein für allemal trifft, analog derjenigen, welche wir oben (S. 256) trafen bei der Darstellung der blossen Bewegung ohne Rücksicht auf die Kräfte: Als Axe des Momentes soll nicht die ganze nach beiden Seiten ins Unendliche gehende Gerade gelten, sondern nur eine vom Drehpunkt aus nach einer Seite ins Unendliche gehende Hälfte, und zwar diejenige, in welcher ein Beobachter mit den Füßen im Drehpunkte stehen müsste, wenn ihm die durch das Moment hervorgebrachte Drehung so erscheinen sollte, wie die Drehung des Zeigers einer Uhr, dessen Zifferblatt er vor sich hat. Denken wir uns also z. B. die auf der Ebene des Papiere senkrechte Richtung als Axenrichtung, so würde die Hälfte nach aufwärts „Halbaxe“ eines Momentes sein, welches das Papierblatt so  zu drehen strebt, während für ein Moment, welches so  zu drehen strebt, als Halbaxe zu definiren wäre, die nach unten gerichtete Normale auf das Papier. Wenn jetzt ebenso die Koordinatenrichtungen nur nach einer Seite vom Ursprunge in Betracht gezogen werden, so bestimmen drei Winkel, deren Grösse von 0 bis 180° variiren kann, nicht nur die Axenrichtung, sondern auch den Sinn der Drehung. Ist z. B. eine Halbaxe durch drei spitze Winkel mit den positiven Koordinatenrichtungen bestimmt, so ist die Halbaxe des genau entgegengesetzten Momentes, dessen Halbaxe die Verlängerung der ersteren ist, bestimmt durch die drei stumpfen Nebenwinkel.

Es versteht sich von selbst, dass das Moment eines Muskels für jede Stellung des Gelenkes besonders bestimmt werden muss. Seine Grösse ändert sich sogar dann, wenn der Knochen um die Axe des Momentes selbst gedreht wird. Wenn irgend eine andere Stellungenänderung stattfindet, so wird auch die Halbaxe des neuen Momentes eine andere Lage haben. Sind die Koordinaten der Muskelursprünge und Ansätze für eine Lage bekannt, so kann übrigens für eine neue genau bestimmte Lage jedes Moment durch blosser Rechnung gefunden werden, ohne dass neue Originalmessungen nöthig wären. Denn man kann ja die neuen Koordinatenwerthe der Ansatzpunkte alsdann aus den alten berechnen und die Koordinaten der Ursprünge bleiben unverändert.

III. Zerlegung des Muskelmomentes an der Arthrodie in drei Komponenten.

Man kann die Momente der auf eine Arthrodie wirkenden Muskeln noch auf eine etwas andere Art darstellen, welche sich aufs engste an die in der deskriptiven Anatomie gebräuchliche Bezeichnung der Muskelfunktionen anschliesst. Diese Darstellungsart beruht auf folgendem Lehrsatz der Mechanik: Wirken auf einen um einen Punkt drehbaren starren Körper mehrere Kräfte und trägt man auf den Halbaxen ihrer Momente vom Drehpunkt aus Strecken auf, welche der Grösse dieser Momente proportional sind, so stellt die nach der Regel des Kräfteparallelogrammes konstruirte Resultante — „geometrische Summe“ — dieser Strecken durch ihre Länge die Grösse und durch ihre Richtung die Halbaxe des Momentes dar, welches durch das Zusammenwirken der Kräfte hervorgebracht wird. Was den Beweis dieses Lehrsatzes betrifft, so ist auf die Darstellungen der theoretischen Mechanik zu verweisen.

Man kann demnach auch umgekehrt ein gegebenes Moment nach der Regel des Kräfteparallelogrammes in komponirende Momente zerlegen. Offenbar hat dies umgekehrte Problem keine bestimmte Lösung, vielmehr kann die Zerlegung auf unendlich viele verschiedene Arten bewerkstelligt werden, so dass man noch einige Bedingungen willkürlich einführen kann. Insbesondere wird das Problem bestimmt, wenn man drei willkürliche Axenrichtungen festsetzt, und verlangt, das gegebene Moment soll in drei Komponenten zerlegt werden, deren Halbaxen in diese drei Richtungen fallen, denn es giebt nur ein Parallelepipet, welches das gegebene Moment (der Grösse und Richtung nach) zur Diagonale hat und dessen zusammenstossende drei Seiten in den angenommenen Richtungen liegen.

Wenn man also durch den Drehpunkt eines arthrodischen Gelenkes in bestimmter Stellung ein für allemal drei Richtungen festlegt, so kann man die Momente aller darauf wirkenden Muskeln auch so angeben, dass man für jeden die drei komponirenden Momente um jene drei Axen angiebt. Natürlich wird es sich empfehlen, die drei willkürlich zu wählenden Axen aufeinander senkrecht zu legen. Man kann nun drei aufeinander senkrechten Axenrichtungen eine solche besondere Lage geben, dass die Bestimmung eines Muskelmomentes durch die drei Komponenten um diese Axen mit der in der Anatomie gebräuchlichen Bezeichnungsweise der Muskelwirkung in Uebereinstimmung kommt. Man denke sich nämlich das arthrodisch verbundene Glied (Arm oder Bein) am aufrecht stehenden

Körper frei herabhängend und lege durch den Drehpunkt eine Richtung vertikal, die zweite horizontal, der Medianebene des Körpers parallel, die dritte ebenfalls horizontal auf die Medianebene senkrecht. Diese drei Richtungen mögen zugleich immer als Koordinatenrichtungen gebraucht werden. Es sind dieselben Richtungen, welche schon früher (S. 261) zur Beschreibung der Stellungsänderung der Gelenke benutzt worden sind. Die Komponente des Momentes eines Muskels um die sagittale Richtung wird man alsdann im Sinne der anatomischen Benennungsweise als das adduktorische resp. abduktorische Moment des Muskels bezeichnen können, die Komponente um die frontale Richtung als das flexorische resp. extensorische und die um die vertikale Richtung als das rotatorische Moment nach aussen resp. nach innen. Wenn ein gewisser Muskel nach der Schätzung mit dem Augenmaasse von der Anatomie richtig bezeichnet ist als Flexor mit der Nebenwirkung, etwas zu abduciren und ein wenig nach aussen zu rotiren, so wird die auf genaue Messungen gegründete Berechnung der Momentkomponenten herausstellen, dass die Komponente um die sagittale Richtung die grösste, das Moment um die frontale Richtung kleiner und das um die vertikale am kleinsten ist. Die Momentkomponenten haben auch eine wirklich physische Bedeutung. Die Komponente bezüglich einer bestimmten Axenrichtung würde nämlich das Moment des Muskels schlechthin sein, wenn durch irgend eine Veranstaltung das Gelenk für einen Augenblick in ein zwangsläufiges verwandelt wäre, welches nur um die betreffende Axenrichtung Drehung gestattete.

Bei der in Rede stehenden Angabe des statischen Momentes eines Muskels durch drei Komponenten muss natürlich noch in bequemer Weise bezeichnet werden, in welchem Sinne jede Komponente das Glied um die Axenrichtung dreht. Zu diesem Endé müssen in jeder der drei Axenrichtungen die beiden Halbaxen durch ein Zeichen unterschieden werden, z. B. in der sagittalen Richtung die Halbaxe vom Drehpunkt nach vorn und die Halbaxe nach hinten u. s. w. Am bequemsten geschieht dies durch die algebraischen Vorzeichen + und —, von welchen man eines jeder Momentkomponente vorzusetzen hat. Dann ist durch die drei Komponenten der Muskel statisch vollständig charakterisirt.

Die drei Komponenten des Momentes eines Muskels um drei willkürlich gewählte Axen kann man auch durch direkte Versuche an einem Gelenkpräparate bestimmen und diese Bestimmungsweise hat vor der durch Berechnung auf Grund von Koordinatenmessungen der Ursprünge und Ansätze der Muskeln manche Vorzüge. Besonders

ist dies dann der Fall, wenn die Sehne des Muskels über eine glatte Knochenstelle gleitet und die Richtung des Zuges am Ansatzpunkte nicht die Fortsetzung der Faserrichtung ist und auch nicht genau zusammenfällt mit der Verbindungslinie zwischen Ursprungs- und Ansatzpunkt, was bei der Berechnung der Momente aus den Koordinatenwerthen dieser Punkte vorausgesetzt wird.

Da nach der zweiten Methode auch schon einige Bestimmungsreihen von Muskelmomenten wirklich ausgeführt sind, so mag sie hier auch noch kurz beschrieben und begründet werden. Man ersetzt die auf eine Arthrodie wirkenden Muskeln resp. Muskelabtheilungen, welche als mechanische Einheiten gewählt sind, durch Fäden. Jeder solche Faden ist an der Ansatzstelle des Muskels am beweglich gedachten Knochen befestigt und läuft durch ein an der Ursprungsstelle befestigtes Ringlein von da in geeigneter Richtung über eine kleine Rolle, von der er durch ein kleines Gewicht beschwert herabhängt. Der Faden wird also zwischen Ursprung und Ansatz genau die Richtung der gespannten Muskelfasern haben und am Ansatzknochen genau in der Richtung des Muskels ziehen auch in den Fällen, wo er unterwegs etwa um einen Knochenvorsprung umbiegen muss. Der Ursprungsknochen des so vorgerichteten Präparates ist vollständig im Raume fixirt und der Ansatzknochen zunächst in die willkürlich gewählte Primärlage gebracht, für welche die Momente bestimmt werden sollen. Die an den Fäden hängenden Gewichte spielen vor ebenso vielen senkrecht aufgestellten Maassstäben, so dass man ihr Steigen oder Sinken bei einer Bewegung des Ansatzknochens messen kann. Nun wird dieser letztere um einen bestimmten kleinen Winkel (z. B. 5°) aus der Primärlage herausgedreht um eine der gewählten positiven Haupthalbaxen. Dabei werden die Gewichte sinken, deren Muskeln eine Momentkomponente um diese Halbaxe haben, denn ihr Ansatz wird bei dieser Drehung dem Ursprung genähert; dagegen werden die Gewichte steigen, deren Muskeln eine Momentkomponente um die entgegengesetzte Haupthalbaxe haben. Macht man sodann eine gleiche Drehung um die entgegengesetzte Haupthalbaxe, so werden die im vorigen Falle gesunkenen Gewichte nunmehr steigen und umgekehrt. Ist der Drehungswinkel sehr klein, so wird jedes Gewicht in einem Falle ziemlich genau so viel steigen als es im anderen sinkt. Der Betrag dieses Steigens und Sinkens, d. h. der Betrag der Verkürzung resp. Verlängerung, die der Muskel bei diesen Drehungen erleidet, wird an den Maassstäben abgelesen. Der Quotient dieses Betrages dividirt durch den kleinen Drehungswinkel ist sofort das Maass für das Moment, welches

der Muskel für eine der Kräfteinheit gleiche Spannung am Gelenke um die betreffende Hauptaxenrichtung ausübt, natürlich ist dabei noch das Vorzeichen (Sinken +, Steigen -) zu berücksichtigen. Prüft man in dieser Weise nacheinander die drei Hauptaxenrichtungen durch, so erhält man für jeden Muskel die drei Komponenten seines Momentes. Die zahlreichen Schwierigkeiten und die Vorsichtsmaassregeln¹, welche zur Gewinnung genauer Resultate nöthig sind, können hier nicht beschrieben werden.

Streng richtig würden die Ergebnisse dieser Methode nur dann sein, wenn der Drehungswinkel unendlich klein wäre. Sie sind aber jedesfalls, wenn der Drehungswinkel 10^0 nicht übersteigt und man noch gewisse Korrekturen anbringt, bezüglich deren auf die citirte Abhandlung verwiesen werden muss, so genau, als man es auf diesem Gebiete nur irgend verlangen kann.

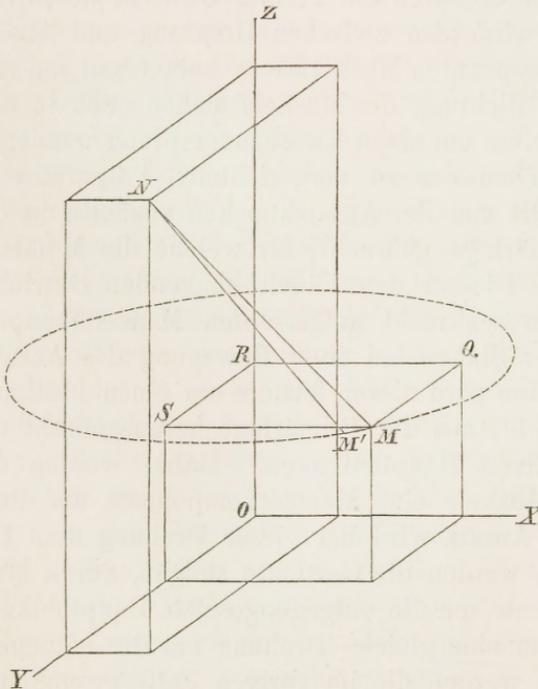


Fig. 17.

Um diese Richtung perspektivisch zu vergegenwärtigen, sind die beiden Punkte M und N dieser Richtung in der Fig. 17 auf die Koordinatenebenen projicirt. Es ist gut, zu bemerken, dass diese Richtung nicht

Einer ausführlichen principiellen Begründung bedarf eigentlich die Methode nicht, da sie eine unmittelbare Anwendung des Principes der virtuellen Geschwindigkeiten ist. Da aber dies in seiner Allgemeinheit nicht anschaulich ist, mag hier noch ein direkter Beweis für die Richtigkeit der Methode Platz finden, welcher eigentlich in derselben Betrachtung besteht, die wir schon zu einem andern Zwecke an gestellt haben (s. S. 278). O sei der Drehpunkt, zugleich Ursprung der Koordinaten, deren positive Halbaxen OX , OY , OZ . M sei der Ansatzpunkt des Muskels am beweglich gedachten Gliede, MN seine Zugrichtung.

¹ Sie sind ausführlich erörtert von EUGEN FICK in der schon oben citirten Abhandlung. Arbeiten aus dem physiol. Laboratorium der Würzburger Hochschule IV. Würzburg 1878.

nothwendig die Richtung vom Ansatz nach dem anatomischen Ursprung zu sein braucht, man denke etwa an den *M. obliquus superior* des Auges. Wird das beweglich gedachte Glied um die *Z*-Achse gedreht, so beschreibt der Punkt *M* einen Kreis in einer der *XY*-Ebene parallelen Ebene, dessen Mittelpunkt der Punkt *R* der *Z*-Achse ist. Sein Umfang ist in perspektivischer Verkürzung durch die punktirte Ellipse dargestellt. Wir wollen uns jetzt eine positive Drehung um den unendlich kleinen Winkel $d\omega = \overline{MRM'}$ ausgeführt denken, welche den Punkt *M* nach *M'* versetzt. Das Bogenstück $\overline{MM'}$, das bei der Kleinheit des Winkels auch für eine gerade Linie gelten kann, ist $= r d\omega$, wenn wir unter *r* den Halbmesser *RM* verstehen. Die Verkürzung, welche bei dieser Verschiebung des Ansatzpunktes von *M* nach *M'* der Muskel erleidet, ist offenbar die Projektion der kleinen Geraden $\overline{MM'}$ auf die Richtung *MN* oder $r d\omega \cdot \text{Cos}(\overline{NMM'})$. Um den $\text{Cos}(\overline{M'MN})$ zu finden, wenden wir den bekannten Satz der Trigonometrie an:

$\text{Cos}(A_1, A_2) = \text{Cos} \alpha_1 \text{Cos} \alpha_2 + \text{Cos} \beta_1 \text{Cos} \beta_2 + \text{Cos} \gamma_1 \text{Cos} \gamma_2$,
 wo (A_1, A_2) der Winkel zwischen zwei Richtungen A_1 und A_2 bedeutet und $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ die Winkel sind, welche die Richtung A_1 sowie $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ die Winkel, welche die Richtung A_2 mit den positiven Koordinatenrichtungen einschliesst. Die Winkel zwischen der Krafrichtung *MN* und den positiven Koordinatenrichtungen mögen mit α, β, γ bezeichnet werden. Die Cosinus der Winkel zwischen der Richtung $\overline{MM'}$ und den positiven Koordinatenrichtungen lassen sich in den Koordinaten x, y, z des Punktes *M* ausdrücken. Um es bequemer zu übersehen ist in Fig. 18 ein Auszug aus Fig. 17 gegeben, in welchem die hier in Betracht kommenden Punkte der zur *XY*-Ebene parallelen Ebene aus der *Z*-Richtung angesehen dargestellt sind. Die Buchstaben entsprechen denen der Fig. 17. Es ist nun der Winkel zwischen $\overline{MM'}$ und der positiven *X*-Richtung gleich dem stumpfen Nebenwinkel des Winkels \overline{MRS} , also sein Cosinus $= -\frac{y}{r}$, der Winkel zwischen $\overline{MM'}$ und der positiven *Y*-

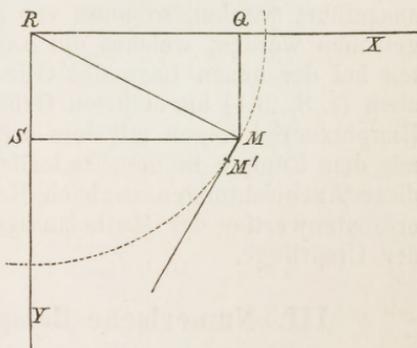


Fig. 18.

richtung ist gleich dem Winkel \overline{MRQ} , also sein Cosinus $= \frac{x}{r}$, endlich ist der Winkel zwischen $\overline{MM'}$ und der *Z*-Richtung ein rechter, also sein Cosinus $= 0$. Man hat also

$$\text{Cos}(\overline{M'MN}) = -\frac{y}{r} \text{Cos} \alpha + \frac{x}{r} \text{Cos} \beta = \frac{1}{r} (x \text{Cos} \beta - y \text{Cos} \alpha)$$

und die Verkürzung des Muskels bei der positiven Drehung um die *Z*-Achse im Betrage von $d\omega$

$$= r d\omega \text{Cos}(\overline{M'MN}) = d\omega (x \text{Cos} \beta - y \text{Cos} \alpha) = V$$

1 Um die Figur nicht zu verwirren, sind die Schenkel dieses Winkels *RM* und *RM'* nicht gezeichnet.

oder

$$x \cos \alpha - y \cos \beta = \frac{V}{d\omega}.$$

Andererseits ist bekanntlich, wenn P die Intensität einer Kraft ist, welche an einem durch die Koordinaten x, y, z gegebenen Punkte zieht in einer Richtung, welche mit den positiven Koordinatenrichtungen die Winkel α, β, γ einschliesst, das Moment dieser Kraft um die Z axe

$$= P(x \cos \beta - y \cos \alpha).$$

Wirkt also ein Muskel mit der Spannung P an dem Ansatzpunkte (x, y, z) in der Richtung, welche die Winkel α, β, γ mit den positiven Koordinatenrichtungen macht, so ist der Koeffizient, mit welchem die Spannung zu multipliciren ist, um die Komponente des Momentes um die Z richtung zu erhalten

$$x \cos \alpha - y \cos \beta = \frac{V}{d\omega}.$$

d. h. gleich der bei einer sehr kleinen Drehung um die Z axe beobachteten Verkürzung dividirt durch den Winkel der Drehung. Man kann auch sagen, diese Grösse $\frac{V}{d\omega}$ ist die Komponente des Momentes des Muskels um die Z richtung, wenn man ihm die Spannung 1 beilegt.

Analoge Ausdrücke finden sich natürlich für die Drehung um die beiden andern Axen.

Soll die Darstellung der Muskelmomente durch drei aufeinander senkrechte Komponenten für irgend eine andere Stellung des Gelenkes ausgeführt werden, so muss vor allen Dingen eine Verabredung darüber getroffen werden, welches die Axenrichtungen für die Momentkomponenten bei der neuen Lage des Gliedes sein sollen. Aus den schon weiter oben (s. S. 261) angeführten Gründen dürfte es sich empfehlen, die drei Hauptaxenrichtungen mit dem arthrodisch beweglichen Gliede, nicht aber mit dem Rumpfe in unveränderlicher Verbindung zu denken. Wenn also diese Axenrichtungen zugleich Koordinatenaxen sind, so bleiben die Koordinatenwerthe der Muskelansätze unverändert, nicht die Koordinaten der Ursprünge.

III. Numerische Beispiele von Muskelmomenten.

Zur Erläuterung der entwickelten beiden Methoden mögen zwei Beispiele von Bestimmungen der Muskelkomponenten der auf ein arthrodisches Gelenk wirkenden Muskeln hier Platz finden. Das erste¹ bezieht sich auf die Muskeln, welche das Hüftgelenk überspringen. Die Zahlen sind berechnet nach der ersten Methode aus Koordinatenmessungen der Ursprünge und Ansätze. Sie gelten für die Stellung, welche ein vom aufrecht stehenden Menschen senkrecht herabhängender Schenkel einnimmt. Es sind nicht die Momentkomponenten für die Gesamtspannung 1 des Muskels, sondern für die

¹ A. Fick, Statische Betrachtung der Muskulatur etc. Ztschr. f. rat. Med. IX. 1849.

Spannung 1 auf die Flächeneinheit des Querschnittes berechnet. Es sind nämlich die in den letzten Betrachtungen auftretenden Koeffizienten $x \cos \beta - y \cos \alpha$ etc. noch mit dem Querschnitte der betreffenden Muskeln multiplicirt. Endlich ist noch zu bemerken, dass hier bis auf den Adductor magnus, der in zwei Portionen vertheilt ist, als Einheiten immer die ganzen Muskeln im Sinne der anatomischen Bezeichnungsweise als mechanische Einheiten behandelt sind, mit andern Worten ist vorausgesetzt, dass stets alle Fasern eines Muskels in gleicher Spannung sind, was für ausgebreitete Muskeln, wie z. B. Glutaeus maximus freilich nicht allgemein zulässig ist.

Die nachstehende Tabelle wird hiernach verständlich sein, wenn noch hinzugefügt wird, dass ein negatives Flexionsmoment ein extensorisches, ein negatives Abduktionsmoment ein adduktorisches und ein negatives Rotationsmoment ein rotatorisches nach innen bedeutet.

| Namen der Muskeln. | Flexionsmoment. | Abduktionsmoment. | Rotationsmoment. |
|------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Glutaeus max. | -157,6 | -66,6 | +78,2 |
| Pyramiformis | -3,3 | +15,1 | +15,9 |
| Obtur. et Gemelli | -2,8 | -7,6 | +18,8 |
| Quadrat. fem. | +0,3 | -26,2 | +25,2 |
| Semitendinosus | -20,8 | -8,4 | -1,6 |
| Biceps langer K. | -32,7 | -9,9 | +0,9 |
| Semimembran. | -20,5 | -7,3 | -1,3 |
| Adduct. magnus, obere Partie | +4,0 | -17,5 | +2,1 |
| untere Partie | -42,7 | -67,1 | -1,4 |
| Psoas u. Iliac. | +76,6 | 0,0 | -12,2 |
| Pectinaeus | +11,6 | -10,6 | -1,9 |
| Adduct. brev. | +26,5 | -42,2 | +2,2 |
| Adduct. long. | +33,7 | -40,6 | -1,9 |
| Gracilis | +3,9 | -17,6 | +0,0 |
| Sartorius | +11,2 | +4,0 | +0,7 |
| Tensor fasciae | +12,5 | +7,6 | +0,0 |
| Rectus femoris | +46,2 | +14,8 | +3,0 |
| Glutaeus medius | -9,9 | +114,2 | -17,6 |
| Glutaeus minim. | +7,9 | +53,9 | -15,8 |
| Obturator extern. | +16,8 | -25,1 | +0,1 |

| | | |
|----------------------------------|----------------------------------|--|
| Summe aller flektirenden Momente | Summe aller adducirenden Momente | Summe aller nach aussen rotirenden Momente |
| 251,1 | 346,8 | 147,0 |

| | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| Summe aller extendirenden Momente | Summe aller abducirenden Momente | Summe aller nach aussen rotirenden Momente |
| 290,4 | 209,6 | 53,7 |

| | | |
|----------------|-------------|-----------------------|
| Differenz 40,7 | 137,2 | 93,3 |
| extendirend. | adducirend. | nach aussen rotirend. |

Nach der zweiten oben beschriebenen Methode sind von EUGEN FICK¹ die Komponenten der Momente der vom Schulterblatte entspringenden Muskeln bestimmt und zwar für zwei verschiedene Lagen des Gelenkes. Bei der ersten steht das Schulterblatt so wie bei einem aufrecht stehenden Menschen mit natürlicher Haltung der Schultern, der Arm hängt genau senkrecht davon herab und ist so gedreht, dass die Verbindungslinie der Ellenbogenkondylen der Flexionsaxe parallel läuft. Der Infraspinatus ist in zwei, der Subscapularis in drei, der Deltoideus in sieben Portionen getheilt. Die Zahlenwerthe für die Momentkomponenten sind einfach den Grössen $x \cos \beta - y \cos \alpha$ etc. proportional. Es ist also die Gesamtspannung jedes Muskels resp. jeder besonders betrachteten Muskelpartie der Einheit gleich gesetzt. Hiernach wird die folgende Tabelle ohne Weiteres verständlich sein, wenn noch beachtet wird, dass ein ++ Zeichen bedeutet Flexion, Adduktion, Rotation nach innen ein -- Zeichen den entgegengesetzten Sinn der Drehungen. Der Deltoideus und der lange Kopf des Biceps sind an einem andern Präparate untersucht als die übrigen Muskeln; der kurze Kopf des Biceps ist an beiden Präparaten untersucht, kommt daher zweimal vor.

| Name des Muskels. | Komponente des Momentes um die | | |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------|
| | Flexions- und Extensions-Axe. | Ad- und Abduktions-Axe. | Rotations-Axe. |
| 1. Coracobrachialis . . . | +30,1 | +20,95 | 0,0 |
| 2. Cap. breve bic. . . . | +34,4 | +19,0 | +4,20 |
| 3. Infraspinatus { I. | +8,32 | -10,63 | -23,3 |
| 4. Infraspinatus { II. | +10,9 | +4,59 | -19,3 |
| 5. Teres major | -33,3 | +43,1 | -10,3 |
| 6. Supraspinatus | +4,59 | -23,6 | +10,3 |
| 7. Cap. long. tricip. . . | -8,04 | +23,6 | 0,0 |
| 8. Teres minor | +6,61 | +18,4 | -13,5 |
| 9. Subscapularis { I. | +5,17 | -10,7 | +22,3 |
| 10. Subscapularis { II. | -9,47 | -17,8 | +23,3 |
| 11. Subscapularis { III. | -17,2 | -5,17 | +16,4 |
| 12. Deltoideus { I. | +32,8 | +7,75 | +8,86 |
| 13. Deltoideus { II. | +23,8 | -9,82 | +11,8 |
| 14. Deltoideus { III. | -8,42 | -28,5 | -5,39 |
| 15. Deltoideus { IV. | -24,8 | -5,98 | -5,81 |
| 16. Deltoideus { V. | -35,3 | +20,56 | -7,04 |
| 17. Deltoideus { VI. | -28,3 | +42,9 | -8,17 |
| 18. Deltoideus { VII. | -28,2 | +60,9 | -10,1 |
| 19. Cap. long. bicip. . . | +9,19 | -20,4 | +11,6 |
| 20. Cap. breve bicip. . . | +35,6 | 0,0 | 0,0 |

¹ EUGEN FICK, Arbeiten aus dem physiol. Laboratorium der Würzburger Hochschule IV. 1878.

Aus den Zahlen dieser Tabelle sind durch allgemein bekannte Rechnungen die Zahlen der folgenden gefunden, die nach dem schon Gesagten keiner Erklärung mehr bedarf.

| Name des Muskels. | Grösse des resultirenden Momentes. | Die Halbaxe des result. Momentes macht | | |
|---------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | | mit der Flexions-Axe | mit der Adduktions-Axe Winkel von | mit der Axe der Rotation nach innen |
| 1. Coracobrachialis . . | 36,67 | 34,5° | 55° | 90° |
| 2. Cap. breve bicip. . . | 39,53 | 29° | 61° | 84° |
| 3. Infraspinatus . . . | 26,9 | 72° | 113° | 150° |
| 4. Infraspinatus . . . | 22,65 | 61° | 78° | 148,5° |
| 5. Teres major | 55,42 | 127° | 39° | 79° |
| 6. Supraspinatus | 26,15 | 80° | 154,5° | 113° |
| 7. Cap. long. tricip. . . | 24,94 | 109° | 19° | 90° |
| 8. Teres minor | 23,79 | 74° | 39,5° | 125° |
| 9. | 25,28 | 78° | 115° | 28° |
| 10. Subscapularis . . . | 26,17 | 111° | 106° | 27° |
| 11. | 24,33 | 135° | 102° | 47,5° |
| 12. | 34,84 | 20° | 77° | 75° |
| 13. Deltoidens | 28,32 | 33° | 110,5° | 56° |
| 14. | 30,1 | 106° | 161° | 96,5° |
| 15. | 26,17 | 161° | 103° | 103° |
| 16. | 41,46 | 148,5° | 60° | 100° |
| 17. | 52,05 | 123° | 34,5° | 99° |
| 18. | 67,87 | 114,5° | 26° | 98,5° |
| 19. Cap. long. bicip. . . | 25,36 | 68,5° | 143,5° | 62,5° |
| 20. Cap. breve bicip. . . | 35,6 | 0° | 90° | 90° |

Die zweite Lage des Gelenkes, für welche E. FICK die Momente der Schultermuskeln untersuchte, war aus der ersten hervorgegangen durch eine reine Abduktion und zwar betrug dieselbe 50° bei dem Präparate, an welchem der Deltoidens und der Biceps untersucht wurden, 60° bei dem, an welchem die übrigen Muskeln untersucht wurden. Die Axen, auf welche sich die Momentkomponenten beziehen, haben dieselbe Lage im Arme wie im ersten Falle. Die Flexionsaxe geht also nun im Rumpfe nicht mehr wagrecht von rechts nach links, sondern, wenn wir uns einen rechten Arm denken, schräg von rechts oben nach links unten. Die Rotationsaxe geht schräg von links oben nach rechts unten.

Die beiden nachstehenden Tabellen stellen für diese neue Lage des Gelenkes Alles auf die Muskelmomente bezügliche ebenso dar, wie die beiden vorhergehenden Tabellen für die erste Lage.

| Name des Muskels. | Componente des Momentes um die | | |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------|
| | Flexions-Axe. | Ad- und Abduktions-Axe. | Rotations-Axe. |
| 1. Coracobrachialis . . . | +28,1 | +3,73 | -2,29 |
| 2. Cap. breve bicip. . . | +33,0 | -8,61 | — |
| 3. Infraspinatus . . . I. | +5,86 | -24,8 | -13,0 |
| 4. . . II. | +5,46 | -22,2 | -14,3 |
| 5. Teres major | -14,8 | +48,2 | +10,3 |
| 6. Supraspinatus | +2,87 | -28,7 | -6,69 |
| 7. Cap. long. tricip. . . . | -12,4 | +33,9 | — |
| 8. Teres minor | -6,61 | — | -22,7 |
| 9. . . . | +25,6 | +10,17 | +7,45 |
| 10. Subscapularis { I. | +18,6 | +4,02 | +21,8 |
| 11. . . . II. | +4,76 | +9,14 | +20,7 |
| 12. . . . III. | +37,5 | -14,35 | +2,67 |
| 13. Deltoides { I. | +21,6 | -24,3 | — |
| 14. . . . II. | — | -34,4 | -3,71 |
| 15. . . . III. | -22,1 | -24,55 | -3,13 |
| 16. . . . IV. | -25,5 | -7,23 | -2,25 |
| 17. . . . V. | -21,4 | — | — |
| 18. . . . VI. | -20,0 | +11,1 | -3,63 |
| 19. Cap. long. bicip. . . . | +14,9 | -15,8 | — |
| 20. Cap. breve bicip . . . | +37,1 | -6,03 | — |

| Name des Muskels. | Grösse des resultirenden Momentes | Die Axe des resultirenden Momentes macht mit der | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|--------------------------|
| | | Flexions-Axe | Ad- und Abduktions-Axe | Rotations-Axe nach innen |
| einen Winkel von | | | | |
| 1. Coracobrachialis . . . | 28,44 | 8° | 82,5° | 94,5° |
| 2. Cap. brev. bicip. . . . | 34,16 | 14° | 104,5° | 90° |
| 3. Infraspinatus . . . I. | 28,64 | 78° | 150° | 117° |
| 4. . . . II. | 27,00 | 78° | 145,5° | 122° |
| 5. Teres major | 51,53 | 107° | 20,5° | 78,5° |
| 6. Supraspinatus | 29,65 | 84,5° | 166° | 103° |
| 7. Cap. long. tricip. . . . | 36,15 | 110° | 20° | 90° |
| 8. Teres minor | 23,66 | 106° | 90° | 164° |
| 9. . . . | 28,57 | 26° | 69° | 75° |
| 10. Subscapularis { I. | 28,95 | 50° | 82° | 41° |
| 11. . . . II. | 23,17 | 78° | 67° | 26° |
| 12. . . . III. | 40,25 | 21° | 111° | 86° |
| 13. Deltoides { I. | 32,56 | 48,5° | 138° | 90° |
| 14. . . . II. | 34,66 | 90° | 174° | 96° |
| 15. . . . III. | 33,24 | 132° | 138° | 95,5° |
| 16. . . . IV. | 26,61 | 164° | 106° | 95° |
| 17. . . . V. | 21,40 | 0° | 90° | 90° |
| 18. . . . VI. | 23,17 | 150° | 61° | 99° |
| 19. Cap. long. bicip. . . . | 21,77 | 46,5° | 136,5° | 90° |
| 20. Cap. breve bicip. . . . | 37,63 | 9,5° | 99° | 90° |

Wenn wir es auch hier nur mit einem ersten Versuche der Lösung eines Hauptproblemcs der speciellen Muskelphysiologie zu thun haben, so lässt sich aus den vorgelegten Zahlen doch schon eine grosse Anzahl von bemerkenswerthen Folgerungen ableiten, die geeignet sind, manche in der beschreibenden Anatomie geläufige Vorstellungen über die Muskelwirkung zu berichtigen. Es ist jedoch hier nicht der Ort, diese Folgerungen im Einzelnen auszuführen, vielmehr muss bezüglich derselben auf die citirte Originalabhandlung von E. FICK verwiesen werden.

Viel einfacher gestaltet sich die Frage nach den Momenten der Muskeln, welche auf ein zwangsläufiges Gelenk wirken. Die Halbaxe des Momentes ist hier ohne Weiteres gegeben, denn es sind nur zwei Halbaxen möglich, welche in die Richtung der Linie fallen, um die das Gelenk in der betrachteten Stellung überhaupt drehbar ist. Auf die bei einem Schraubengelenke mögliche Verschiebung längs der Axe braucht keine Rücksicht genommen zu werden, da sie zu unbedeutend ist. Als Methode der Bestimmung verdient bei zwangsläufigen Gelenken unzweifelhaft die zweite der beschriebenen den Vorzug vor der Messung der Koordinaten der Ursprungs- und Ansatzpunkte. In der mehrfach citirten Abhandlung von E. FICK und E. WEBER finden sich einige Momentbestimmungen für Muskeln des Ellenbogengelenkes und des Gelenkes zwischen Ulna und Radius, die als Beispiele noch angeführt werden mögen.

Cap. long. tricipitis. Bewegungen im Ellenbogengelenk.

| | Verkürzung resp. Verlängerung. |
|--|--------------------------------|
| Flexion von 0 ⁰ — 10 ⁰ | 3,43 mm. |
| „ 10 ⁰ — 20 ⁰ | 4,26 |
| „ 20 ⁰ — 30 ⁰ | 4,21 |
| „ 30 ⁰ — 40 ⁰ | 4,20 |
| „ 40 ⁰ — 50 ⁰ | 3,95 |
| „ 50 ⁰ — 60 ⁰ | 4,07 |
| „ 60 ⁰ — 70 ⁰ | 3,80 |
| „ 70 ⁰ — 80 ⁰ | 3,33 |
| „ 80 ⁰ — 90 ⁰ | 3,25 |
| „ 90 ⁰ — 100 ⁰ | 3,07 |
| „ 100 ⁰ — 110 ⁰ | 2,81 |
| „ 110 ⁰ — 120 ⁰ | 2,86 |
| „ 120 ⁰ — 130 ⁰ | 2,75 |
| „ 130 ⁰ — 140 ⁰ | 3,04 |
| „ 140 ⁰ — 150 ⁰ | 3,25 |

Beugung und Streckung im Ellenbogengelenk bei supinirtem Radius.

| | | Cap. breve bicip. Verkürzung. | Cap. long. bicip. Verkürzung. |
|-------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
| Gebeugt von | 0°— 10° | 4,39 | 4,58 |
| „ | 10°— 20° | 5,41 | 5,30 |
| „ | 20°— 30° | 6,03 | 6,02 |
| „ | 30°— 40° | 6,79 | 7,03 |
| „ | 40°— 50° | 7,52 | 7,65 |
| „ | 50°— 60° | 7,65 | 7,52 |
| „ | 60°— 70° | 7,74 | 7,93 |
| „ | 70°— 80° | 7,45 | 7,34 |
| „ | 80°— 90° | 6,64 | 6,53 |
| „ | 90°—100° | 5,86 | 5,14 |
| „ | 100°—110° | 4,93 | 4,56 |
| „ | 110°—120° | 4,02 | 3,54 |
| „ | 120°—130° | 2,61 | 1,98 |

Cap. breve bicipitis. Pro- und Supination bei fixirter Ulna.

| Drehungswinkel von | | Verkürzung. |
|--------------------|-----------|-------------|
| | 0°— 5° | 0,1 mm. |
| „ | 5°— 10° | 0,1 |
| „ | 10°— 20° | 0,5 |
| „ | 20°— 30° | 0,6 |
| „ | 30°— 40° | 0,6 |
| „ | 40°— 50° | 0,4 |
| „ | 50°— 60° | 0,4 |
| „ | 60°— 70° | 0,4 |
| „ | 70°— 80° | 0,3 |
| „ | 80°— 90° | 0,3 |
| „ | 90°—100° | 0,2 |
| „ | 100°—110° | 0,1 |
| „ | 110°—120° | 0,1 |
| „ | 120°—130° | 0,1 |

0° entspricht dem Maximum der Pronation,

130° entspricht dem Maximum der Supination.

Es sind hier für die Momente die Verkürzungen, welche der Muskel bei Drehung um je 10° erleidet, selbst gegeben. Da sie den Momenten proportional sind und die Wahl der Einheit an sich willkürlich ist, so können die Verkürzungswerthe ohne Weiteres als Werthe der Momente gelten. Die natürlichste Maasseinheit der Momente ist das Moment, welches die Krafteinheit (das Kilogramm) an einem der Längeneinheit (Millimeter) gleichen Hebelarm senkrecht

ziehend hervorbringt, um in dieser Maasseinheit die Momente auszudrücken, müsste man die Zahlen der Tabellen durch den Drehungswinkel in Bogenmaass dividiren. Für 10^0 ist das Bogenmaass

$$\frac{\pi}{180} \cdot 10 = 0,174.$$

Es bedeutet alsdann die Zahl, welche man für das Moment des Muskels erhält, anschaulich ausgedrückt entweder eine Anzahl von Kilogrammen, die an einem 1 mm. langen Hebelarm senkrecht wirkend dem Muskel, wenn er mit 1 kg. gespannt ist, Gleichgewicht halten oder die Anzahl von Millimetern, welche man einem Hebelarm geben muss, wenn an demselben 1 kg. senkrecht ziehend dem ebenfalls mit 1 kg. Spannung wirkenden Muskel Gleichgewicht halten soll. Selbstverständlich muss den Momenten des Triceps das — Zeichen vorgesetzt werden, wenn denen des Biceps das + Zeichen vorgesetzt wird.

IV. Resultirendes Moment mehrerer Muskeln.

Sind für irgend ein Gelenk in einer bestimmten Lage auf die in den vorigen Abschnitten entwickelte und durch Beispiele erläuterten Art die Momente aller darauf wirkenden Muskeln bei der Spannung 1 bestimmt, so kann man auch folgende Aufgabe lösen: Die Spannungen der Muskeln haben die numerisch gegebenen Werthe S_1, S_2, S_3 etc., welches ist das resultirende Moment? oder wie und mit welcher Winkelbeschleunigung würde das Glied aus der Anfangslage heraus im ersten unendlich kleinen Zeittheilchen gedreht werden? oder welches Moment müsste eine Kraft ausüben, welche den sämtlichen Spannungen der Muskeln Gleichgewicht halten sollte? Selbstverständlich dürfen unter den Grössen S beliebig viele den Werth Null haben. Handelt es sich um ein zwangsläufiges Gelenk, so ist die Lösung äusserst einfach. Man multiplicirt die Momente für die Spannung 1 mit den beziehlichen Spannungswerthen und summirt die Produkte algebraisch. Die Summe ist das resultirende Moment und das Vorzeichen desselben giebt überdies an, in welchem Sinne das Moment das Glied um die augenblickliche Axe zu drehen strebt.

Handelt es sich um eine Arthrodie, so muss der S. 299 schon gebrauchte Lehrsatz der Mechanik angewandt werden. Es sind zunächst natürlich auch die für die Spannung 1 bestimmten Momente mit den wirklichen Spannungswerthen zu multipliciren und nun sind die Momente der verschiedenen Muskeln nach der dem Kräfteparallelogramm analogen Regel zusammensetzen. Dies geschieht aber am einfachsten auf folgende Weise. Jedes einzelne Moment wird in

seine drei Komponenten nach den gewählten drei Hauptrichtungen zerlegt resp. die drei schon zuvor für die Spannung 1 bestimmten Komponenten werden mit den wirklichen Spannungswerthen multiplicirt. Nun bildet man für jede Hauptaxenrichtung die algebraische Summe aller auf sie bezüglichen Momentkomponenten. Die drei so erhaltenen Summen sind dann die drei Komponenten des resultirenden Momentes. Bezeichnen wir sie mit L , M , N , so ist die Grösse des resultirenden Momentes

$$R = \sqrt{L^2 + M^2 + N^2}$$

und die Cosinus der Winkel, welche die Halbaxe dieses resultirenden Momentes mit den drei positiven Hauptaxenrichtungen einschliesst, sind

$$\frac{L}{R}, \quad \frac{M}{R}, \quad \frac{N}{R},$$

in welcher Formel der Wurzelgrösse R ihr positiver Werth beizulegen ist. Ob einer der Winkel spitz oder stumpf ist hängt also lediglich davon ab, ob die betreffende der Grössen L , M , N positiv oder negativ ist.

SIEBENTES CAPITEL.

Bestimmung der Muskelspannungen, welche ein gegebenes resultirendes Moment hervorbringen.

I. Bedingungen der Lösbarkeit des Problemes.

Die erste S. 296 formulirte Aufgabe der Muskelstatik ist, wie wir soeben gesehen haben, immer lösbar und hat stets nur eine bestimmte Lösung, nicht so ist es mit der umgekehrten Aufgabe, die darin besteht, anzugeben, welche Muskeln und in welchem Grade sie gespannt sein müssen, um ein gegebenes Moment hervorzubringen? oder um einer gegebenen Kraft Gleichgewicht zu halten, oder um dem Gliede eine gegebene Winkelbeschleunigung um eine gegebene Axe im ersten unendlich kleinen Zeittheilchen beizubringen. Dass diese Aufgabe überhaupt nicht nothwendig immer einer Lösung fähig ist, kann man schon sehen, wenn man sich vorstellt, ein zwangsläufiges Gelenk hätte nur auf der einen Seite Muskeln. Dann

würde, wenn ein nach dieser Seite drehendes Moment gefordert ist, die Aufgabe gar keine Lösung haben. Sind aber am zwangsläufigen Gelenke, wie dies im menschlichen Körper überall der Fall ist, wirklich auf beiden Seiten Muskeln vorhanden, so kann die Aufgabe ein Moment von gegebener Grösse im einen oder andern Sinne hervorzubringen, auf unendlich viele Arten gelöst werden, denn es ist ja nur nöthig, dass die algebraische Summe der Muskelmomente, unter denen faktisch sowohl positive als negative vorhanden sind, die gegebene Grösse und das verlangte Vorzeichen hat.

Für das arthrodische Gelenk ist die Bedingung, dass eine Lösung des in Rede stehenden Problems immer möglich ist, welches auch die Richtung der Halbaxe des verlangten Momentes sei folgende: Es müssen mindestens vier Muskeln an dem Gelenke so gelagert sein, dass, wenn man auf den Halbaxen ihrer Momente OA OB OC OD (Fig. 19) beliebige Strecken Oa Ob Oc Od abschneidet, das Tetraeder $abcd$ den Drehpunkt O einschliesst.

Ist nämlich diese Bedingung erfüllt, so mag man von O aus eine Halbaxe ziehen in welcher Richtung man will, immer wird sie in eine hohle Ecke fallen, welche von dreien der Halbaxen der Muskelmomente gebildet wird, und es wird also immer möglich sein, ein Parallelepiped zu konstruiren, das eine gegebene Strecke der willkürlich gewählten Halbaxe des verlangten resultirenden Momentes zur Diagonale hat und dessen zusammen-

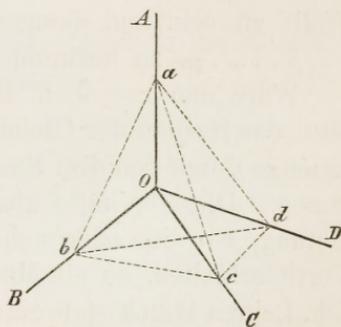


Fig. 19.

stossende Kanten bestimmte Strecken von dreien der vier Halbaxen OA OB OC OD sind. Mit der Konstruktion dieses Parallelepipeds ist aber eine Lösung des Problems gegeben, denn man braucht nur den Spannungen der betreffenden drei Muskeln solche Werthe beizulegen, dass die Grösse ihrer Momente den auf ihren Halbaxen abgeschrittenen Kanten des konstruirten Parallelepipeds gleich wird und die Spannung des übrig bleibenden vierten Muskels der Null gleich zu setzen, dann ist das resultirende Moment das verlangte. Sind aber auch nur diese vier Muskeln vorhanden, so ist die soeben ausgeführte Lösung des Problems nicht die einzige. Man kann nämlich dem vierten Muskel eine beliebige Spannung beilegen und kann dann die Spannungen der andern doch immer noch so bestimmen, dass das resultirende Moment aller vier Spannungen den verlangten Werth erhält.

II. Allgemeine Formulirung des Problemes.

Es ist leicht, das in Rede stehende Problem ganz allgemein zu formuliren. Am arthrodischen Gelenke sollen ν Muskeleinheiten wirken. Die Momentkomponenten des μ ten Muskels bezüglich der drei Hauptaxenrichtungen seien $l_\mu m_\mu n_\mu$ und seine noch unbestimmte Spannung sei p_μ . Es wird verlangt, das System der ν Spannungen so zu wählen, dass die Komponenten des resultirenden Momentes $L M N$ sind. Zu diesem Ende brauchen nur die drei Gleichungen

$$I. \begin{cases} p_1 l_1 + p_2 l_2 + \dots p_\mu l_\mu + \dots p_\nu l_\nu = L = \sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (l_\mu p_\mu), \\ p_1 m_1 + p_2 m_2 + \dots p_\mu m_\mu + \dots p_\nu m_\nu = M = \sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (m_\mu p_\mu), \\ p_1 n_1 + p_2 n_2 + \dots p_\mu n_\mu + \dots p_\nu n_\nu = N = \sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (n_\mu p_\mu) \end{cases}$$

erfüllt zu sein und demgemäss ist das System der Grössen $p_1, p_2, \dots p_\mu \dots p_\nu$ zu bestimmen.

Wäre nun $\nu = 3$, d. h. wären nur drei Muskeln vorhanden, so hätte das System der Gleichungen eine algebraisch bestimmte Lösung vermöge deren den drei Spannungen p_1, p_2, p_3 bestimmte Werthe zukämen. Dieselbe hätte aber in allen den Fällen keine physische Bedeutung, wo eine oder mehrere der Grössen p_1, p_2, p_3 einen negativen Werth erhielten, da ein Muskel keine negative Spannung haben kann, d. h. keinen Druck statt eines Zuges ausüben kann. Die Grössen $l_1 m_1 n_1 \dots l_3 m_3 n_3$ müssen also bei gegebenen Werthen von L, M, N noch gewisse Bedingungen erfüllen, wenn die Lösung des Systems der drei Gleichungen mit drei unbekanntem $p_1 p_2 p_3$ für dieselben positive Werthe ergeben soll, so dass die Lösung eine reelle Bedeutung hat. Ebenso müssen die Grössen $l m n$, auch wenn die Anzahl der Muskeln grösser ist als drei, wie wir sahen noch gewissen Bedingungen genügen, um die Lösbarkeit durch lauter positive Grössen p zu sichern. Sowie es aber alsdann eine Lösung in lauter positiven Grössen giebt, so giebt es deren auch unendlich viele. Es wurde vorhin schon in geometrischer Anschauung ausgedrückt, welchen Bedingungen mindestens eine Gruppe von vieren der Grössensysteme $l_\mu m_\mu n_\mu$ genügen müsse, um die Lösbarkeit des Systemes der drei Gleichungen in positiven Werthen von 3 zu sichern, wie auch immer das System der Grössen $L M N$ aus positiven und negativen Werthen zusammengesetzt ist. Die Frage nach der Lösbarkeit unserer Gleichungen durch ein System von positiven Werthen der Grössen ist nämlich ganz die-

selbe, wie die Frage nach den Spannungen der Muskeln, wenn das resultirende Moment gegebene Komponenten bezüglich der drei Hauptaxenrichtungen haben soll. Bei den Arthrodiën des menschlichen Körpers (den Augapfel eingeschlossen) erfüllen die darauf wirkenden Muskeln nachgewiesenermaassen die Bedingung der Lösbarkeit der drei Gleichungen (S. 314) durch ein System von positiven Werthen der Grössen p , oder man kann jedes beliebige geforderte Moment durch ein System von Muskelspannungen erzeugen. Bei den Arthrodiën des menschlichen Körpers und nicht minder bei den zwangläufigen Gelenken giebt es daher auch immer unendlich viele Systeme von Muskelspannungen, welche ein und dasselbe Moment hervorbringen. Man wird daher noch andere der Aufgabe an sich fremde Bedingungen setzen dürfen, die nebenher erfüllt werden können, ohne dass die Herstellung des geforderten Momentes unmöglich würde.

III. Minimumbedingung, welche das Problem zu einem bestimmten macht.

Bei der Unbestimmtheit des Problemes an sich liegt der Gedanke nahe, dass bei der wirklichen Ausführung der Gliederbewegungen im Leben regelmässig noch eine Nebenbedingung erfüllt wird, vermöge deren zu jeder beabsichtigten bestimmten Drehung ein bestimmtes System von Muskelspannungen verwendet wird, und zwar liegt es am nächsten, anzunehmen, dass wir im Verlaufe des individuellen Lebens oder des Lebens der Species die Bewegungen so ausführen lernen, dass das Gefühl der gesammten Anstrengung ein Minimum ist. Dieser Gedanke ist wohl schon von Alters her mehr oder weniger bestimmt gedacht worden, ganz positiv haben ihn die Gebrüder WEBER in der Vorrede zur Mechanik der Gehwerkzeuge zum Ausdruck gebracht. Soviel ich sehe, habe ich selbst¹ zum ersten Mal versucht, diesen Gedanken so zu formuliren, dass er zur Bestimmung der Muskelspannungen im einzelnen Falle führen könnte. Ich machte nämlich die Annahme, das Gefühl der Anstrengung sei der Spannung selbst einfach proportional. Zu den drei Gleichungen welchen die Muskelspannungen genügen müssen, um ein gegebenes Moment hervorzubringen, käme dann noch die Bedingung hinzu, dass die Summe der absoluten Werthe dieser Spannungen ein Minimum sein soll. Hierdurch werden nun allerdings im Allgemeinen die

¹ A. FICK, Die Bewegungen des menschlichen Augapfels. Ztschr. f. rat. Med. N. F. IV. S. 101.

Spannungen vollständig bestimmt. Diese Annahme führt aber, wie neuerdings FUCHS in einer sehr scharfsinnigen Kritik gezeigt hat, zu entschieden unzulässigen Folgerungen, so dass sie durch eine andere ersetzt werden muss, wenn man das an sich kaum bezweifelbare Princip der kleinsten Anstrengung aufrecht erhalten will. Der Gedankengang der Abhandlung von FUCHS führt auf so grundlegende Gesichtspunkte, dass er hier in seinen wesentlichen Zügen wieder gegeben werden soll.

Die Annahme, das Gefühl der kleinsten Anstrengung entspreche einem Minimum der Spannungssumme, mit welcher das verlangte Moment hervorgebracht werden kann, eignet sich nicht zu einem konstitutiven Principe der Muskelstatik, weil erstens bei dem einfachsten Probleme die Frage nach der kleinsten Spannungssumme gar nicht gestellt werden kann. Man denke sich nämlich am Gelenke nur einen Muskel aus lauter gleich langen und parallelen Fasern angebracht. Soll hier ein bestimmtes Moment M erzielt werden, so muss die Summe der Spannungen der einzelnen Fasern einen bestimmten Werth R haben, so dass eben die Frage nach einem Minimum dieser Summe keinen Sinn hat.

Denken wir uns zweitens einen einzigen fächerförmig (der Einfachheit wegen in einer Ebene) ausgebreiteten Muskel. Ein bestimmtes Moment (dessen Halbaxe natürlich auf der Verbindungslinie des Drehpunktes mit dem Muskelansatzpunkte senkrecht stehen muss) verlangt hier wieder eine bestimmte Resultirende der Spannungen der einzelnen Fasern. Die Richtung der Resultirenden müsste die Durchschnittslinie der Ebene des Muskels mit derjenigen Ebene sein, welche durch den Ansatzpunkt des Muskels zur Momentaxe gelegt werden kann. Nun würde offenbar, wie die Anschauung ohne Weiteres lehrt, die erforderliche Resultirende dann mit der geringsten Spannungssumme erzielt werden, wenn sich nur diejenige Faser des Muskels und zwar mit dem ganzen Betrage der Resultirenden spannte, welche in die Richtung der Resultirenden fällt, während die Spannungen der sämtlichen übrigen Fasern gleich Null bliebe. Oder, wenn man nicht in jeder zwischen den beiden Grenzfäsern eingeschlossenen Richtung des fächerförmigen Muskels eine Faser annehmen wollte, würde die erforderliche Resultirende dadurch mit der geringsten Spannungssumme hervorgebracht werden, dass ausschliesslich diejenigen beiden Fasern gespannt würden, welche mit der Richtung der Resultirenden die kleinsten Winkel einschliessen und dass wiederum die sämtlichen übrigen Fasern ganz ungespannt blieben. Dass diese Folgerung ungereimt ist, leuchtet ein. Es werden sich

vielmehr höchst wahrscheinlich immer alle Muskelfasern resp. ganzen Muskeln an der Hervorbringung eines Momentes theilhaben, zu dem sie vermöge ihrer Lagerung überhaupt etwas beitragen können. Dies annehmen heisst aber im Hinblick auf das unzweifelhaft gültige Princip der kleinsten Anstrengung annehmen: das Gefühl der Anstrengung wird um so kleiner, auf je mehr Fasern die erforderliche Spannung vertheilt ist. Hierin liegt implicite der Satz, dass das Gefühl der Anstrengung in einer einzelnen Muskelfaser nicht ihrer Spannung proportional, sondern rascher als diese wächst. Von diesem höchst bemerkenswerthen Satze giebt nun FUCHS in der citirten Abhandlung noch einen exakteren Beweis, in welchen kaum irgend eine Annahme eingeht, welche nicht die grösste Wahrscheinlichkeit für sich hätte.

Es mögen, um das Problem möglichst allgemein zu fassen, auf das arthrodisch gedachte Gelenk ν Muskelfasern (resp. Muskeleinheiten) beliebig im Raume vertheilt wirken. Sei nun das Gefühl der Anstrengung, welches durch die Spannung p der Muskeleinheit hervorgebracht wird, eine Funktion der Spannung, die mit $f(p)$ bezeichnet wird¹, und man verlange, dass mit dem geringsten Gefühl von Anstrengung ein Moment erzeugt wird, dessen Komponenten L, M, N sind, dann ist erstens die Bedingung für das Minimum der Anstrengung

$$\text{oder (a) } \frac{d [f(p_1) + f(p_2) + \dots + f(p_\nu)]}{dp} = 0$$

Wären die Differentiale dp alle von einander unabhängig, so könnte diese Gleichung nur dadurch erfüllt werden, dass die sämtlichen Derivirten $f'(p)$ Null wären und die Gleichung zerfiel in ν Gleichungen

$$f'(p_1) = 0; f'(p_2) = 0 \text{ etc.},$$

woraus die sämtlichen Werthe der p zu berechnen wären. In unserer Aufgabe aber sind durch das System der Differentiale dp noch drei Gleichungen zu erfüllen, die sich durch Differentiation der drei Gleichungen (I.) S. 314 ergeben, d. h. es muss sein

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (l_\mu dp_\mu) = 0; \sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (m_\mu dp_\mu) = 0; \sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (n_\mu dp_\mu).$$

Mittels dieser drei Gleichungen lassen sich aus der Gleichung (a) drei der Differentiale dp eliminiren, die $\nu - 3$ übrigen sind dann aber von einander unabhängig und ihre $\nu - 3$ Koeffizienten müssen einzeln $= 0$ sein. (a) zerfällt dadurch in $(\nu - 3)$ Gleichungen, dazu kommen noch die drei Gleichungen (I.) von S. 314, so dass man im Ganzen ν Gleichungen hat zwischen den Konstanten des Problems und den ν unbekanntenen Grössen p , woraus diese letzteren bestimmt werden können.

Es begreift sich leicht, dass eine Durchführung der numerischen Rechnung nur in einfacheren Fällen lohnen könnte, wo wenige Muskeln, wie z. B. am Augapfel mitwirken. Von solchen Anwendungen auf wirk-

¹ FUCHS hat noch die Länge der Fasern mit in Betracht gezogen, was aber hier unterbleiben mag, da sie aus der Gleichung, durch welche die Entscheidung der Frage herbeigeführt wird, doch wieder herausfällt.

liche Mechanismen ganz absehend, wollen wir den einfachsten schematischen Fall noch etwas weiter zergliedern, um die oben schon angedeutete principielle Folgerung daraus zu ziehen. Wir denken uns bloss eine beliebige Anzahl paralleler gleich langer Fasern, die mit einer strangförmigen Sehne an einem Punkte des beweglichen Knochens angreifen. Dann ziehen sich die überhaupt bezüglich des Momentes zu stellenden Bedingungen zurück auf die eine Gleichung

$$p_1 + p_2 \dots p_\nu = P,$$

wenn P die resultierende an den Knochen ziehende Gesamtspannung bedeutet und an die Stelle der drei Gleichungen zwischen den Differentialen (dp_1 etc.) tritt die Gleichung

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} (dp_\mu) = 0,$$

mit deren Hilfe nur eines der Differentiale aus der Gleichung

$$f'(p_1) dp_1 + f'(p_2) dp_2 + \dots f'(p_\nu) dp_\nu = 0 = \sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} f'(p_\mu) dp_\mu,$$

welche die Bedingung des Minimums der Anstrengung ausdrückt, eliminiert werden kann. Die Eliminationsgleichung ist offenbar, wenn dp_1 eliminiert wird

$$[f'(p_2) - f'(p_1)] dp_2 + [f'(p_3) - f'(p_1)] dp_3 + \dots \\ [f'(p_\nu) + f'(p_1)] dp_\nu = 0$$

und da sie nur erfüllt sein kann, wenn die Koeffizienten der noch übrigen $(\nu - 1)$ vollständig von einander unabhängigen Differentiale $dp_2 \dots dp_\nu$ einzeln $= 0$ sind, so hat man

$$f'(p_1) = f'(p_2) = f'(p_3) = \dots f'(p_\nu),$$

was, Eindeutigkeit der Funktion $f(p)$, vorausgesetzt, die $(\nu - 1)$ Gleichungen

$$p_1 = p_2 = \dots p_\nu$$

zur Folge hat. Dazu kommt noch die Gleichung

$$p_1 + p_2 + \dots p_\nu = P,$$

so dass sich schliesslich ergibt

$$p_1 = \frac{P}{\nu}, \\ p_2 = \frac{P}{\nu}, \\ \vdots \\ \vdots \\ p_\nu = \frac{P}{\nu}.$$

Die Gleichung

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} f'(p_\mu) \cdot dp_\mu = 0$$

kann nun aber sowohl die Bedingung dafür ausdrücken, dass die Summe $\sum_{\mu=1}^{\mu=\nu} f(p_\mu)$ ein Maximum als dafür, dass sie ein Minimum ist. Ob ein Maximum oder ein Minimum stattfindet, das hängt bekanntlich von der Beschaffenheit der zweiten Derivierten $f''(p)$ ab, ist sie an der untersuchten

Stelle der Funktion positiv, so haben wir ein Minimum, im entgegengesetzten Falle ein Maximum. Es dürfte keine gewagte Annahme sein, dass die Funktion $f(p)$ in dem hier überall in Betracht kommenden Werthintervalle von Null bis über $\frac{P}{v}$ hinaus graphisch dargestellt keinen Wendepunkt zeigen würde, d. h. dass in diesem Werthintervalle $f''(p)$ sein Vorzeichen nicht ändert. Da es nun aber gar keinen Sinn hätte, sich vorzustellen, dass ein Moment mit dem Maximum der Anstrengung hergestellt wird, so ist man gezwungen anzunehmen, dass für alle Werthe von p von Null bis zu den höchsten in Betracht kommenden Werthen $f''(p)$ immer positiv bleibt, d. h. dass das Gefühl der Anstrengung rascher wächst als die Spannung der Muskelfaser, was zu beweisen war.

Das Ergebniss der vorstehenden Betrachtung gewinnt ein noch höheres Interesse, wenn man an der Hand des Zweckmässigkeitsprincipes weiter folgert, von welchem Vorgänge in der Muskelfaser das Gefühl von Anstrengung der subjektive Ausdruck sein muss. Es ist a priori ersichtlich und in den letzten Jahrzehnten sehr oft ausgesprochen, dass eine organische Species nur dann bestehen kann, wenn im Bewusstsein des Individuums im Allgemeinen solche Vorgänge mit dem Gefühle der Lust verknüpft sind oder als erstrebenswerth vorgestellt werden, welche der Existenz des Individuums resp. der Existenz der Gattung von Vortheil sind, und dass das Gefühl der Unlust (die möglichst vermieden wird) sich an solche Vorgänge knüpft, welche dem Individuum seine Erhaltung und Fortpflanzung erschweren. Nun wird aber offenbar dem thierischen Subjekte im Bereiche seiner Muskelsubstanz nichts mehr förderlich sein, als wenn es die zu seinen Zwecken nöthigen Bewegungen mit möglichst kleinem Aufwande von Brennmaterial ausführen kann. Es würde also eine überaus zweckmässige und darum sehr wahrscheinliche Einrichtung sein, wenn gerade der zu meidende Verbrauch von Brennmaterial, d. h. die Intensität des chemischen Processes ihren subjektiven Ausdruck fände in dem faktisch möglichst gemiedenen Gefühle der Anstrengung. So gipfelt also der hier mitgetheilte Gedankengang der Abhandlung von FUCHS in den beiden Sätzen: Bei allen instinktiv ausgeführten Bewegungen vertheilen sich die Spannungen auf die mitwirkenden Muskeln so, dass das beabsichtigte Moment mit dem geringsten Aufwand an Brennmaterial hervorgebracht wird, und dass der Verbrauch von Brennmaterial zur Hervorbringung einer bestimmten Muskelspannung — alles übrige gleichgesetzt — nicht dem Werthe dieser Spannung proportional wächst, sondern rascher als er.

SPEIELLER THEIL.

ERSTES CAPITEL.

Das aufrechte Stehen.

Der Lehre von der Fortbewegung des Menschen auf ebenem Boden ist es zweckmässig eine Erörterung des aufrechten Stehens voranzuschicken. Man versteht hierunter jede Gleichgewichtslage des ganzen Körpers, bei welcher er bloss durch die Fusssohlen unterstützt ist und bei der die Längserstreckungen der Hauptabschnitte des ganzen Körpers annähernd in dieselbe Richtung fallen. Selbstverständlich ist allen solchen Gleichgewichtslagen das gemeinsam, dass ein durch den Schwerpunkt des gesammten Körpers gehendes Loth die Bodenfläche in einem Punkte schneiden muss, welcher im Inneren eines Polygons liegt, das Berührungspunkte der Fusssohlenflächen mit dem Boden zu Eckpunkten hat. Die grösste Figur derart an der Bodenfläche, innerhalb deren der Fusspunkt des Lothes durch den Schwerpunkt sicher liegen muss, hat zu Umfangsstücken die beiden äusseren Fussränder und die beiden geraden Verbindungslinien der Fussspitzen und Fersen. Im Uebrigen kann die Lage der einzelnen Körpertheile noch eine sehr verschiedene sein. Es ist nur die Bedingung zu erfüllen, dass die Kräfte, welche auf die einzelnen gegeneinander beweglichen Abschnitte wirken, sich Gleichgewicht halten. Da unter diesen Kräften willkürlich veränderliche Muskelspannungen überall in grosser Zahl vorhanden sind, so kann diese Bedingung offenbar bei sehr verschiedenen Lagen der Theile gegeneinander erfüllt sein. Man wird aber fragen können, in welcher gegenseitigen Lage der Theile lässt sich das Gleichgewicht mit dem geringsten Aufwande von Muskelspannungen erhalten?

Um das Problem nicht allzusehr zu verwickeln, mag der Rumpf mit Hals und Becken als eine starre Einheit angesehen werden,

deren Theile unter einander unveränderlich verbunden sind, was auch, wenn nicht bedeutende gestaltverändernde Kräfte ins Spiel kommen, annähernd richtig ist. Auch die Arme mögen senkrecht herabhängend mit dem Rumpf in fester Verbindung gedacht werden. Es kommen also noch folgende Theile als gegeneinander beweglich in Betracht: 1. Kopf, 2. Rumpf, 3. Oberschenkel, 4. Unterschenkel, 5. Füße; die drei letzten Abschnitte sind zwar paarig vorhanden, aber wenn wir bloss symmetrische Stellungen untersuchen, kann man je ein Paar für eine Einheit gelten lassen. In dem für die Erhaltung des Gleichgewichtes ungünstigsten Falle sind je zwei dieser fünf Abschnitte immer nur gegeneinander beweglich, um eine wagrechte Axe, nämlich der Kopf gegen den Hals, um die gemeinsame von rechts nach links gehende Axe der Atlasgelenke (wenn man von seitlichen Neigungen absieht). Das Becken gegen die Oberschenkel um die Verbindungslinie der beiden Drehpunkte der Hüftgelenke, die Oberschenkel gegen die Unterschenkel um die Gerade, welche beide Knieaxen enthält, die in eine Richtung fallen mögen, die Unterschenkel gegen die Füße um die ebenfalls zunächst in einer Richtung gedachten Axen der Astragalusrollen. Beiläufig bemerkt wäre es für die Erhaltung des Gleichgewichtes weniger ungünstig, wenn die Knieaxen und Astragalusaxen nicht in je eine Richtung fallen, wie später zu erörtern ist.

Selbst jenen ungünstigsten Fall gesetzt, scheint es nun eine Lage der Theile zu geben, bei welcher gar keine Muskelspannung zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes erforderlich ist. Es brauchten nämlich nur die sämtlichen Drehungsaxen und die Schwerpunkte der verschiedenen Körperabschnitte in ein und derselben vertikalen Ebene zu liegen. Dann wären die Momente der Schwere bezüglich aller Axen, um welche eine Drehung stattfinden kann, gleich Null, und es wäre also ohne Hülfe irgend welcher Muskelkraft Gleichgewicht vorhanden. Dies Gleichgewicht wäre aber labil und seine Erhaltung würde eine grosse Aufmerksamkeit erfordern, indem bei jeder Störung eine willkürliche Muskelspannung zur Wiederherstellung erforderlich wäre. Wie schwierig es aber ist, ein labiles Gleichgewicht zu erhalten, davon kann man sich überzeugen, wenn man sich auf eine scharfe Kante stellt. Es liegt daher der Gedanke nahe, dass die in Rede stehende Gleichgewichtslage mit senkrecht übereinander liegenden Axen und Schwerpunkten keineswegs die bequemste Art des aufrechten Stehens ist. Zwar könnte es scheinen, als ob diesem Gleichgewichte die blosse Elasticität der ruhenden Muskeln schon Stabilität verleihe. In der That, wenn ein Körper-

abschnitt aus dieser Lage etwas nach hinten weicht, so werden die vorn an ihm angebrachten Muskeln etwas gedehnt und folglich gespannt, während die Antagonisten noch mehr erschlaßt werden, es wird also dem durch das Ausweichen entstehenden Momente der Schwere nach hinten, ein Moment elastischer Kräfte nach vorn entgegenwirken. Bei vollkommen ruhender Muskulatur wird aber ganz sicher dies Moment bei weiterem Ausweichen nicht so rasch wachsen als das Moment der Schwere und folglich wird das Gleichgewicht doch immer noch labil sein. Stabil kann es erst dann werden, wenn die Muskeln auf beiden Seiten im Erregungszustande sind, so dass schon bei einer kleinen Dehnung auf der einen Seite ein grosser Zuwachs der Spannung und eine bedeutende Minderung derselben auf der anderen Seite statthat. Es wäre daher wohl möglich, dass wir bequemer stehen, wenn wir die antagonistischen Muskeln in Spannung versetzen und dem Momente der einen durch ein Moment der andern Gleichgewicht halten, was eine anscheinende Verschwendung von Muskelanstrengung ist. Es würde uns aber die fortwährende Aufmerksamkeit und die abwechselnde Zusammenziehung der einen und der andern Muskelgruppe ersparen. Genau untersucht ist übrigens dieser Gegenstand noch nicht und es dürfte wohl die Mühe lohnen, auszumitteln, welcher Spannungsgrad antagonistischer Muskelgruppen erforderlich ist, um das Gleichgewicht bei senkrecht über den Axen liegenden Schwerpunkten stabil zu machen. Mag sich dies verhalten wie es wolle, jedesfalls wäre am allerzweckmässigsten eine Lage des Körpers beim aufrechten Stehen, in welcher die Stabilität des Gleichgewichtes gesichert wäre ganz oder theilweise durch Kräfte, die nicht in aktiver Muskelanstrengung ihren Ursprung haben. In diesem Sinne hat H. MEYER¹ das Problem des aufrechten Stehens gefasst und gelöst, und zwar ist er zu folgendem Ergebnisse gekommen.

Was zunächst die Feststellung des Kopfes auf dem Rumpfe betrifft, so wird man allerdings von anderen als Muskelkräften absehen müssen. Der Schwerpunkt des Kopfes liegt faktisch beim aufrechten Stehen meist vor der Gelenkaxe und dem Momente der Schwere des Kopfes kann ohne grosse Anstrengung durch Spannung der gewaltigen Nackenmuskulatur Gleichgewicht gehalten werden.

Das Hauptinteresse bieten die an den Hüftgelenken wirkenden Kräfte. Bekanntlich zieht von der Spina oss. ilium anterior inferior ein mächtiges Band zur Linea intertrochanterica des Oberschenkels

1 H. MEYER, Müller's Arch. f. Anat. u. Physiol. 1853. S. 9.

vorn über das Gelenk herab das Lig. ileofemorale superius. Seiner Lage nach muss dieses Band die Extension des Schenkels beschränken und zwar bei auswärts gerolltem Schenkel schon früher als bei einwärts gerolltem. MEYER behauptet nun, gestützt auf Versuche an der Leiche und Beobachtung am Lebenden, dass bei der bequemsten aufrechten Stellung das Loth durch den Schwerpunkt des Rumpfes (das durch die Mitte der Brust geht) hinter der Verbindungslinie der Hüft Drehpunkte herabfalle und dass dem so entstehenden Momente der Schwere nach hinten das nach vorn drehende Moment der Spannung der beiden Ligg. ileofemoralia Gleichgewicht halte, sowie die Schenkel ein wenig nach auswärts gerollt sind, was bei der natürlichen aufrechten Stellung eben der Fall sei. Dies Gleichgewicht ist stabil, denn wenn auch bei weiterer Rückwärtsdrehung des Beckens das Moment der Schwere zunimmt, so nimmt doch dabei das Moment der Bandspannung in noch weit höherem Maasse zu, da die einmal entfalteteten Bandmassen einen sehr grossen Elasticitätskoefficienten haben, d. h. fast unausdehnbar sind.

Der Behauptung MEYER's entgegen hat PAROW¹ allerdings durch zahlreiche Messungen am Lebenden dargethan, dass faktisch bei ganz bequemem aufrechten Stehen der Schwerpunkt des Rumpfes nahezu senkrecht über der Verbindungslinie der Hüft Drehpunkte liegt. Mag das immerhin häufig der Fall sein, d. h. mögen viele Personen die Aufrechterhaltung eines labilen Gleichgewichtes in den Hüftgelenken vorziehen, so behält doch die MEYER'sche Konstruktion einer aufrechten Stellung ihr Interesse, bei welcher durch blosser Gelenkeinrichtungen mit möglichster Meidung von Muskelspannung ein stabiles Gleichgewicht stattfindet, auch dürfte kaum zu bezweifeln sein, dass die von MEYER konstruirte und erörterte Stellung in Wirklichkeit öfters beliebt wird. Wir folgen daher diesen Erörterungen weiter. Die Kniegelenke befinden sich im Zustande extremer Streckung und das Loth durch den gemeinsamen Schwerpunkt von Rumpf und Oberschenkeln durch das Promontorium des Beckens gehend fällt nur ganz wenig hinter die Kniegelenkaxen. Dass dem hierdurch bedingten beugenden Momente der Schwere nicht etwa die Spannung der Extensores cruris Gleichgewicht hält, davon kann man sich leicht überzeugen. Man findet nämlich bei jedem unbefangenen aufrecht stehenden Menschen die Patella leicht beweglich, d. h. also das Ligamentum patellae schlaff. MEYER macht nun sehr scharfsinnig darauf aufmerksam, dass das Moment der Schwere selbst am Hüftgelenk dem Mo-

1 PAROW, Arch. f. pathol. Anat. XXXI.

mente der Schwere am Kniegelenk Gleichgewicht hält. Vermöge der Gestaltung der Kniekondylen kann nämlich der Uebergang des Femur aus der äussersten Streckung an der Tibia in eine gebogene Lage nicht bewerkstelligt werden ohne einige Rotation des Femur nach aussen. Diese aber hindert das Moment der Rumpfschwere am Hüftgelenke, indem es, wie wir sahen, das Lig. ileofemorale superius anspannt, welches seinerseits eine weitere Rotation nach aussen und mithin eine Flexion des Knies nicht zulässt. Man kann diese Behauptung nach dem Principe der virtuellen Geschwindigkeiten auch so formuliren: Wenn das Kniegelenk aus der gedachten Streckstellung heraus um einen verschwindend kleinen Winkel gebogen werden soll, so würde die damit untrennbare Rotation der Femora in den Hüftgelenken nach aussen unter Vermittelung der nicht weiter ausdehnbaren Ligg. ileofomalia den Rumpf so viel nach vorn drehen, dass durch diese Drehung der Schwerpunkt des Körpers mehr stiege als er durch die Beugung im Knie sinkt, d. h. die erste verschwindend kleine Drehung um die Knieaxen nach hinten würde nicht möglich sein, ohne dass im Ganzen der Schwerpunkt stiege. Ein strenger Beweis hierfür ist von MEYER nicht geliefert, aber es kann sich sehr wohl so verhalten.

Betrachten wir endlich die Drehung der beiden Unterschenkel an den Astragalusrollen. Das Loth durch den gemeinsamen Schwerpunkt von Rumpf und Bein fällt vor die Astragalusaxen, welche übrigens bei der vorausgesetzten Auswärtsstellung der Füsse nicht in eine gerade Linie fallen. Es ist daher ersichtlich, dass ein Vornüberfallen der Beine in den Astragalusrollen nicht möglich ist, ohne gleichzeitige Beugung der Kniegelenke. Alle Momente also, welche dieser Beugung widerstreben, werden auch einen entsprechenden Theil des um die Astragalusrollen nach vorn drehenden Momentes der Schwere aufwiegen. Da aber, wie wir sahen, unter den das Knie streifenden Momenten das der Spannung des Lig. ileofemorale superius eine wesentliche Rolle spielt, so trägt es auch zur Aequilibrirung des Körpers auf den Astragalusrollen bei. Doch glaubt MEYER — und wohl mit Recht —, dass es allein nicht ausreiche, und dass daher eine Spannung der Extensores pedis beim aufrechten Stehen unentbehrlich sei. Eine numerische Bestimmung der bei dieser sinnreichen Theorie MEYER's in Betracht kommenden Kräfte dürfte wohl die Mühe lohnen.

ZWEITES CAPITEL.

Das Gehen.

Die in den nachstehenden Abschnitten gegebene Darstellung des Gehens und Laufens hält sich im Ganzen genau an die Mechanik der Gehwerkzeuge der Gebr. WEBER, welche durch die Arbeiten späterer Forscher nur ganz unwesentliche Zusätze erfahren hat.

Beim natürlichen Gehen auf ebenem Boden wird der Schwerpunkt des Rumpfes mit nahezu konstanter Geschwindigkeit in nahezu horizontaler Bahn fortbewegt. Es müssen daher im Ganzen die auf denselben wirkenden Kräfte sich im Gleichgewicht halten, so dass weder Beschleunigung noch Verzögerung eintritt. Solcher Kräfte sind aber jederzeit drei im Spiele: 1. der Widerstand der Luft, welcher die vorhandene Geschwindigkeit zu verkleinern strebt, 2. die Schwere, welche dem Schwerpunkt des Rumpfes eine Beschleunigung senkrecht abwärts zu ertheilen strebt, 3. die Spannung der Muskeln, welche die Gelenke des an den Boden angestemmtten Beines gerade zu strecken und dadurch die Entfernung zwischen dem Schenkelkopfe und dem an den Boden angestemmtten Punkte zu vergrößern strebt. Der Gesamteffekt dieser Spannungen, die „Streckkraft des Beines“ wirkt also wie eine abstossende Kraft in der jeweiligen Richtung von dem angestemmtten Punkte nach dem Schenkelkopfe, in welchem wir einstweilen die ganze Masse des Rumpfes vereinigt denken können.

Das Gegeneinanderwirken dieser drei Kräfte ist nun genauer in den einzelnen Phasen eines Schrittes zu untersuchen, wobei sich zeigen wird, dass das Gleichgewicht nicht immer genau statt hat und somit kleine periodische Schwankungen der Geschwindigkeit und der Höhe des Schwerpunktes über dem Horizonte beim Gehen unvermeidlich sind.

Die Dauer jedes Schrittes zerfällt in zwei ungleiche Abschnitte, während des einen meist kleineren berühren beide Füße den Boden, während des anderen ist nur der eine Fuss an den Boden angestemmt, das andere Bein hängt frei am Rumpfe und schwingt von hinten nach vorn. Man kann somit die periodisch wechselnden Lagen jedes Beines beim Gehen durch folgendes Schema veranschaulichen, wo ein gerader Strich das Stemmen am Boden, ein Bogen das freie

Schwingen eines Beines bezeichnet, die obere Linie bezieht sich auf das linke, die untere auf das rechte Bein.

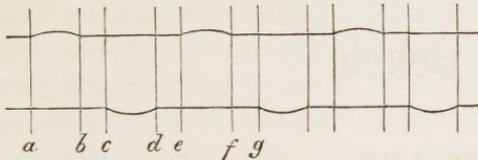


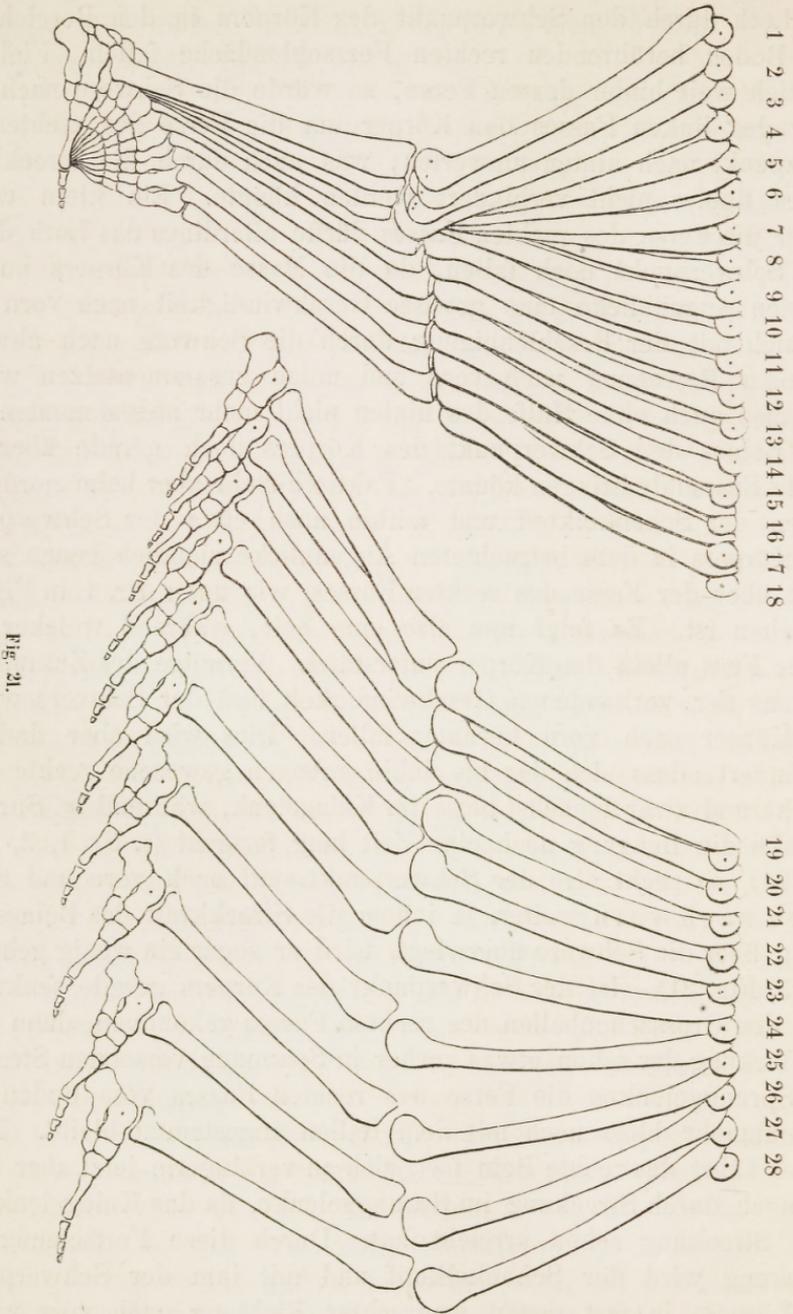
Fig. 20.

Unter der Dauer zweier Schritte ist selbstverständlich zu verstehen die Zeit von einem beliebigen Augenblicke bis zu dem nächstfolgenden, in welchem sämmtliche Theile des Körpers wieder genau in

derselben relativen Lage und in demselben Bewegungszustande sich befinden, wie im ersten. Diese Dauer einer ganzen Periode des periodischen Bewegungszustandes der Beine beim Gehen zerfällt in zwei gleiche Abschnitte, so dass in jedem Augenblicke des zweiten Abschnittes das rechte Bein sich in der relativen Lage zum Körper und in dem Bewegungszustande befindet, in welchem sich im entsprechenden Augenblicke des ersten Abschnittes das linke befand. Die Dauer eines solchen Abschnittes heisst eine Schrittdauer. Im Schema (Fig. 20) ist beispielsweise die durch den Zwischenraum zwischen *a* und *e* dargestellte Zeit die Dauer zweier Schritte, welche von dem Augenblicke (*a*), wo der linke Fuss vom Boden gehoben wird, reicht bis zu dem Augenblicke (*e*), wo er abermals erhoben wird, nachdem er inzwischen von *a* bis *b* frei geschwungen hatte und von *b* bis *e* an den Boden angestemmt war. Die ganze Periode *ae* zerfällt nun in die zwei Schritte *ac* und *ce*, so dass von dem Augenblicke *c* an, wo der rechte Fuss den Boden verlässt, sowie der linke im Augenblicke *a*, bis zu dem Augenblicke *e* eben der rechte Fuss genau die Bewegungen ausführt, welche der linke während der Zeit *ac* ausführte, nämlich Schwingung (von *c* bis *d*) und Aufsetzen auf den Boden (*d* bis *e*). Umgekehrt thut von *c* bis *e* der linke Fuss genau das, was während der Zeit *ac* der rechte that, nämlich er stemmt sich gegen den Boden.

Betrachten wir jetzt die Vorgänge genauer, deren Rhythmus in seinen allgemeinsten Zügen durch das Schema Fig. 20 dargestellt ist. Wir wollen ausgehen von dem Augenblicke *a* (Fig. 20), wo der linke Fuss den Boden verlässt. Das linke Bein war in diesem Augenblicke zum Maximum gestreckt und berührte nur noch mit der Fusspitze den Boden. Die Richtung von diesem Berührungspunkt zum Schenkelkopf ist schräg von hinten und unten nach oben und vorn und bildet die Hypothenuse eines rechtwinkligen Dreiecks, dessen eine Kathete die Höhe des Schenkelkopfes über der Bodenfläche ist. In dem Augenblicke, wo der linke Fuss vom Boden gelöst wird, muss

das Loth durch den Schwerpunkt des Körpers in den Bereich der den Boden berührenden rechten Fusssohlenfläche fallen. Fiele es nämlich weit hinter dessen Ferse, so würde die Schwere nach Lösung des linken Fusses den Körper um die Ferse des rechten als Stützpunkt nach hinten umwerfen, was auch durch die Streckkraft dieses Beines nicht verhindert werden könnte. Ein klein wenig hinter die Ferse des rechten Fusses dürfte allerdings das Loth durch den Schwerpunkt noch fallen, da die Masse des Körpers im gedachten Augenblicke eine gewisse Geschwindigkeit nach vorn hat, die sich mit der Beschleunigung durch die Schwere nach abwärts zu einer Bewegung nach vorn und unten zusammensetzen würde und also auch ohne Hülfe des hinten nicht mehr angestemmtten linken Beines den Schwerpunkt des Körpers noch gerade über die rechte Fusssohle bringen könnte. Faktisch steht aber beim normalen Gehen der Schenkelkopf und mithin auch etwa der Schwerpunkt des Körpers in dem betrachteten Augenblicke ziemlich genau senkrecht über der Ferse des rechten Fusses, wie unter Nr. 1 in Fig. 21 zu sehen ist. Es folgt nun also eine Zeit, während welcher der rechte Fuss allein den Körper unterstützt. Vermöge des Zusammenwirkens der vorhandenen Geschwindigkeit und der Schwere würde der Körper nach vorn herunter fallen. Dies wird aber dadurch verhindert, dass sich das bis dahin gebogen gewesene rechte Bein streckt und zwar zunächst bloss im Kniegelenk, während im Sprunggelenke die Beugung noch eine Zeit lang fortgeht (s. Nr. 1, 2, 3, 4, Fig. 21), so rückt also der Schwerpunkt statt nach vorn und unten bloss nach vorn weiter, ja indem die Streckkraft des Beines ein wenig über die Schwere überwiegt, wird er sogar ein wenig gehoben (Nr. 5, Fig. 21). Ist der Schwerpunkt des Körpers gerade senkrecht über den Grosszehenballen des rechten Fusses gekommen, dann hebt die Wirkung der schon etwas vorher in Spannung versetzten Strecker des Sprunggelenkes die Ferse des rechten Fusses vom Boden auf, der nunmehr bloss noch mit dem Ballen angestemmt bleibt. Noch immer fährt das rechte Bein fort, sich zu verlängern, jetzt aber eben nur noch durch Streckung im Sprunggelenke, da das Kniegelenk die volle Streckung schon erreicht hat. Durch diese Fortsetzung der Streckung wird der Schenkelkopf und mit ihm der Schwerpunkt des Körpers in fast genau wagrechter Richtung nach vorn weiter getragen. Das rechte Bein durchläuft so die in Fig. 21 mit den Ziffern 6—18 bezeichneten Lagen. Inzwischen ist der im Anfang der betrachteten Zeit vom Boden gelöste linke Fuss am rechten vorüber frei durch die Luft nach vorn gegangen und wird, noch ehe



die Streckung des rechten ganz vollendet ist, also bevor das rechte Bein die Lage Nr. 18 erreicht hat, wieder aufgesetzt und zwar so, dass seine Ferse mehr oder weniger weit vor dem Loth durch den Schwerpunkt den Boden berührt. Das rechte ebenfalls noch ange-

stemmte Bein fährt wie gesagt noch fort, sich zu strecken, jetzt aber hält die senkrechte Komponente seiner Streckkraft nicht mehr ganz der Schwere Gleichgewicht, so dass der Schenkelkopf mit dem Schwerpunkte in dem nun folgenden kurzen Stadium, während dessen beide Füße den Boden berühren, ein wenig sinkt (Nr. 14—18, Fig. 21), wobei sich also das eben vorn aufgesetzte linke Bein noch etwas biegen muss. Dies dauert so lange, bis der auch beim Sinken natürlich noch immer stetig vorrückende Schwerpunkt des Körpers senkrecht über der Ferse des linken Fusses gekommen ist. In diesem Augenblicke wird das nunmehr vollständig ausgestreckte rechte Bein vom Boden gelöst. Die Lösung des Fussballens vom Boden erfolgt theils infolge einer kleinen Erhebung des ganzen Körpers, welche in dem betrachteten Augenblick durch Streckung des jetzt genau senkrecht angestemmtten linken Beines bewirkt wird, theils infolge einer Verkürzung des rechten Beines, welche zunächst durch Biegung im Knie bewerkstelligt wird. Sowie einmal diese Lösung geschehen ist kann schon die blosse Schwere das nunmehr frei hängende rechte Bein nach vorn beschleunigen und das vorn aufgesetzte linke einholen machen. Die Fortschrittgsgeschwindigkeit des ganzen Körpers nach vorn hat nämlich die Masse des rechten Beines zum Theil so schon besessen, zum Theil wird sie ihm im ersten Momente nach der Lösung des Fusses durch den Zusammenhang der Gewebe zum Theil wohl auch durch eine aktive Zusammenziehung der Flexores femoris so gut wie augenblicklich beigebracht, die Schwere aber wirkt, da sein Schwerpunkt weit hinter dem Loth durch seinen Aufhängepunkt — den Drehpunkt des Hüftgelenkes — liegt mit einer Komponente beschleunigend nach vorn. Natürlich muss sich das frei schwingende Bein, je mehr es sich der senkrecht herabhängenden Lage nähert, noch weiter verkürzen, um den Boden nicht zu berühren. Diese Verkürzung geschieht gressstheils durch Hebung des Fusses. Die Lagen, welche das rechte Bein beim Schwingen bis etwa zur senkrechten Lage durchläuft, sind in Fig. 21 unter Nr. 19—28 dargestellt. Erst ganz zuletzt, nachdem es die senkrechte Lage schon überschritten hat, wird es wieder etwas gestreckt und zwar wohl ohne besonderes Zuthun aktiver Muskelanstrengung, indem ja bei der in Rede stehenden Lage die Schwere und die Trägheit den vom Loth nach hinten abweichenden Unterschenkel in die Lothlinie zu führen und somit den Winkel zwischen Ober- und Unterschenkel zu vergrössern strebt. Ist diese Streckung bis zu einem gewissen Maasse gekommen, so erreicht der rechte Fuss den Boden wieder, das rechte Bein knickt wieder merklich zusammen, so dass

der Schwerpunkt des Körpers resp. der Schenkelkopf sich dem Boden wieder etwas nähert. Indem er aber zugleich nach vorn weiter vorschreitet, kommt er wieder senkrecht über die Ferse des rechten Fusses und in diesem Augenblicke verlässt der linke Fuss abermals den Boden wie in dem Augenblicke, von welchem wir ausgegangen sind. Es ist also eine Periode von zwei Schrittdauern abgelaufen und es beginnt eine zweite, in welcher sich genau derselbe Cyklus von Bewegungen abspielt, wie der beschriebene.

Zu den bedeutendsten Gedanken der „Mechanik der Gehwerkzeuge“ gehört der, dass die Bewegung des hängenden Beines von hinten nach vorn durch die senkrechte Lage hindurch eine wesentlich unter dem Einflusse der Schwere stattfindende Pendelschwingung ist. Soviel ich sehe, ist dieser Kardinalsatz der Lehre vom Gehen durch die Kritik einiger neuerer Autoren nicht wesentlich erschüttert. Besonders hat DUCHENNE gegen den WEBER'schen Satz pathologische Erfahrungen geltend gemacht, wonach die Lähmung des als Flexor femoris zu betrachtenden Tensor fasciae latae die normale Schwingung des Beines unmöglich machte. Mir scheint aus den Beobachtungen DUCHENNE's höchstens zu folgen, dass ganz geringe Muskelaktionen vielleicht erforderlich sind, um dem schwingenden Beine die kleinen Bewegungen zu ertheilen, welche es in der Horizontalprojektion ausführen muss, damit es richtig um das stemmende Bein herum komme und weder zu weit rechts, noch zu weit links aufgesetzt werde. Die eigentliche Hauptbewegung in der Profilprojektion wird gewiss, wie die Gebr. WEBER behauptet haben, so gut wie ausschliesslich unter dem Einflusse der Schwere, also nach Art des Pendels, ausgeführt. Nur ganz im Anfange möchte ich, wie oben schon ausgesprochen wurde, vermuthen, geben die Flexores femoris des Oberschenkels diesem Gliede einen kleinen Ruck nach vorn, um seiner ganzen Masse die volle Fortschrittgsgeschwindigkeit des Rumpfes zu ertheilen. Hierdurch wird dann wohl auch sogleich die zur Verkürzung des schwingenden Beines erforderliche Biegung des Kniegelenkes begünstigt, indem der Unterschenkel vermöge seiner Trägheit noch ein wenig hinter diesem Ruck des Knies nach vorn zurückbleibt.

Dass ein am Rumpfe hängendes Bein so regelmässiger Pendelschwingungen fähig ist, hat zum grossen Theil seinen Grund darin, dass zwischen Pfanne und Schenkelkopf fast gar keine gleitende Reibung stattfindet, weil (s. S. 271) der Druck, der diese beiden Flächen zusammenpresst, nahezu gleich Null ist. Die den Schenkelknochen umgebenden Muskeln wirken nur dämpfend auf die Pendelschwin-

gungen, ähnlich wie wenn ein Pendel in einer Flüssigkeit schwingt, was zwar die Amplitude der Schwingungen rasch abnehmen macht, aber der Gleichheit ihrer Dauer keinen Abbruch thut.

Die WEBER'sche Lehre ist gewiss auch darin ganz im Rechte, dass die erstaunliche Regelmässigkeit des Ganges eben nur zu erklären sei aus dem Umstande, dass die Schwingung des Beines eine nicht durch willkürliche Muskelaktion gestörte regelmässige Pendelschwingung ist. In der That ist ja unter dieser Annahme die Gleichheit des grössten Theiles der Schrittdauer gesichert, sowie nur immer in derselben Lage des schwingenden Beines die Schwingung durch Aufsetzen unterbrochen wird, denn alsdann wird jedesmal derselbe Bruchtheil einer ganzen Schwingung vollendet, wozu immer die gleiche Zeit gebraucht wird.

Zu den wesentlichen Hauptsächlichheiten beim Gehen gehört noch eine gewisse Neigung des Rumpfes nach vorn, deren Nothwendigkeit leicht einzusehen ist. Die Resultirende des Widerstandes der Luft nämlich hat zum Angriffspunkte einen Punkt des Rumpfes, der jedesfalls hoch über den Schenkelköpfen liegt, während der Angriffspunkt der wagrechten Komponente der Streckkraft des Beines der Schenkelkopf oder die Pfanne selbst ist. Wenn nun auch diese beiden Kräfte einander gleich sind, so halten sie sich doch noch nicht Gleichgewicht, sondern sie bilden ein Kräftepaar, das eine Drehung des Rumpfes im Hüftgelenke nach hinten hervorzubringen strebt. Soll diese Drehung verhindert werden, so muss dem Momente dieses Paares ein entgegengesetztes Moment bezüglich der wagrechten Hüftaxe Gleichgewicht halten. Ein solches Moment ergibt sich, wenn das Loth durch den Schwerpunkt des Rumpfes vor der Hüftaxe herabfällt, so dass die Schwere für sich eine Drehung nach vorn im Hüftgelenke hervorzubringen strebt. Dies Moment der Schwere wird offenbar um so grösser sein, je weiter der Rumpf vorgeneigt ist, und in der That findet man, dass die Vorneigung des Rumpfes um so grösser ist, je grösser der Luftwiderstand ist, also *ceteris paribus* je grösser die Geschwindigkeit des Ganges ist.

Die in der vorstehenden Beschreibung erwähnte abwechselnde Hebung und Senkung des Schwerpunktes erfordert eine zur Fortbewegung selbst nicht dienliche Muskelarbeit, welche also für den eigentlichen Zweck des Gehens überflüssig ist, und es könnte scheinen, als wäre diese Hebung und Senkung bloss eine durch grössere Geschicklichkeit vermeidbare unzweckmässige Gewohnheit. Dies ist aber nicht der Fall, es lässt sich vielmehr zeigen, dass ohne dieses abwechselnde Heben und Senken des Rumpfes ein einigermaassen

gleichmässiges Gehen gar nicht möglich wäre. Wenn nämlich die senkrechte Komponente der Streckkraft in jedem Augenblicke der Schwere des Körpers Gleichgewicht halten sollte, um die Senkung zu verhindern, so würde die wagrechte Komponente jener Kraft den Körper so stark beschleunigen, dass das schwingende Bein in der Zeit einer halben Schwingung nicht den Punkt erreichen könnte, wo es vorn wieder aufgesetzt werden muss, um die Rolle der Stütze zu übernehmen. Es müsste also, um das schwingende Bein doch so weit zu bringen, durch Muskelkräfte in seiner Schwingung beschleunigt werden, was voraussichtlich einen grösseren Aufwand von Anstrengung erforderte, als die geringe Hebung des Körpers bei jedem Schritte. Man lässt daher faktisch kurz ehe das schwingende Bein aufgesetzt wird die Streckkraft des hinten angestemmtten Beines bedeutend abnehmen oder ganz aufhören zu wirken, so dass ihre senkrechte Komponente nicht mehr der Schwere Gleichgewicht hält und ihre wagrechte Komponente, die gerade in dieser Phase des Schrittes am grössten sein würde, keine erhebliche Beschleunigung nach vorn hervorbringt. So sinkt also in diesem Zeitraum der Rumpf ein wenig, um in dem bald folgenden Zeitraume, wo das vorn aufgesetzte Bein senkrecht steht, wieder um ebenso viel gehoben zu werden. Dieser Augenblick ist zur Erhebung der günstigste, weil in ihm die senkrechte Komponente der Streckkraft des letzteren am grössten ist. Diese vertikalen Schwankungen des Rumpfschwerpunktes betragen nach den Messungen der Gebr. WEBER etwa 32 mm.

Aus den Betrachtungen, welche die Nothwendigkeit der vertikalen Schwankungen ergaben, lässt sich ferner folgern, dass die Geschwindigkeit, mit welcher der Körper beim Gehen wagrecht fortbewegt wird, nicht ganz konstant sein kann, dass vielmehr in dem Augenblicke, wo das vorn aufgesetzte Bein senkrecht steht und während eines unmittelbar vorhergehenden und nachfolgenden kleinen Zeitraumes die Geschwindigkeit des Rumpfes kleiner sein wird, als während des Zeitraumes, in welchem das eine Bein mehr schräg an den Boden angestemmt ist, während das andere frei schwingt. In der That sahen wir ja, dass kurz ehe das vordere Bein den Boden berührt, die Streckkraft des hinten noch angestemmtten Beines und mithin die Beschleunigung nachlässt, und dass dann auch noch in den ersten Momenten nachdem das vorn aufgesetzte Bein in senkrechter Lage die Rolle des Stützens übernommen hat, die wagrechte Komponente seiner Streckkraft fast Null ist, so dass auch jetzt noch keine nennenswerthe nach vorn beschleunigende Kraft wirkt. In dem gedachten Zeitabschnitte muss also durch die Widerstände der Körper

in seinem horizontalen Fortschreiten merklich verzögert werden. Erst nachher, wenn das vorn aufgesetzte Bein eine mehr schräge Richtung angenommen hat, wird er wieder beschleunigt.

Dies Ergebniss der WEBER'schen Theorie des Gehens findet eine anschauliche Bestätigung in einer sinnreichen graphischen Darstellung MAREY's. Er liess einen Mann im Kreise gehen und dabei eine leichte karussellartige Vorrichtung drehen. Die Axe derselben war zugleich die Axe eines feststehenden berussten Cylinders. Auf diese zeichnete der Stift eines MAREY'schen Kardiographen, der am Arme des Karussells befestigt war, seine Spurlinie. Die Luft in der Trommel des Kardiographen communicirte durch einen Kautschukschlauch mit einem Luftraum, der in der elastischen Sohle des Gehenden eingeschlossen war. Der Kardiographenhebel wurde also jedesmal gehoben, wenn diese Sohle auftrat, und sank wieder, wenn dieselbe vom Boden gehoben wurde. Das wagrechte Fortschreiten der Zeichenspitze des Kardiographen giebt in verkleinertem Maassstabe genau den Fortschritt des Gehenden wieder. Um nun zu sehen, welche Zeit auf jeden Theil des wagrechten Vorschreitens verwendet wurde, liess MAREY durch einen Seitenzweig der Luftleitung auf den Kardiographenhebel noch eine Stimmgabel wirken, so dass derselbe neben den grösseren Schwankungen, die durch den Gang bewirkt wurden, noch kleine Schwingungen von immer gleicher Dauer ausführte. Auf diese Weise erhielt MAREY vom rechten Fusse eines Gehenden die mit *R* bezeichnete Kurve der Fig. 22. Die mit

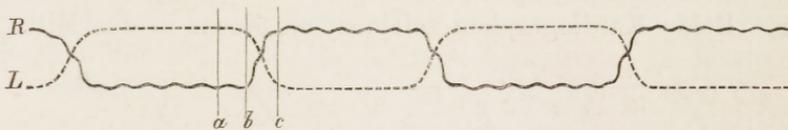


Fig. 22.

L bezeichnete punktirte Kurve giebt eine Vorstellung von den gleichzeitigen Zuständen des linken Beines. Man sieht, dass während beide Füsse den Boden berühren und also das rechte Bein stemmend die senkrechte Lage passirt, der Schwerpunkt um eine der Linie *bc* proportionale Strecke vorschreitet, auf diese Wegstrecke wird, wie die kleinen Wellen zeigen, die Zeit von zwei Schwingungen der Stimmgabel verwendet. Unmittelbar vorher hat der Schwerpunkt eine gleiche Wegstrecke *ab* in etwa einer Schwingungsdauer zurückgelegt. Er hat also diese Wegstrecke mit etwa doppelter Geschwindigkeit durch laufen. Man kann aus der Kurve im Ganzen entnehmen, dass beim Aufsetzen eines Fusses der Körper offenbar zum Theil durch den

dabei unvermeidlich erfolgenden Rückstoss eine ziemlich plötzliche Verzögerung erleidet, und dass dann nach Aufheben des Fusses eine allmähliche Beschleunigung eintritt.

Es ist wohl selbstverständlich, dass auch die Horizontalprojektion der Bahn des Schwerpunktes beim Gehen nicht ganz genau eine gerade Linie sein kann, da die beiden abwechselnd stützenden Beine nicht in der Medianebene liegen. Offenbar muss während das rechte Bein stützt, der Schwerpunkt etwas mehr rechts, während das linke stützt etwas mehr links liegen. Man kann sich hiervon sehr leicht überzeugen, wenn man in einer Richtung geht, in welcher sich ziemlich weit von einander zwei sichtbare Vertikallinien (etwa zwei Stangen) befinden. Fixirt man die entferntere, so tritt das Bild der näheren bald rechts, bald links neben das Bild jener. Diese horizontalen Schwankungen des Körpers hat MAREY graphisch dargestellt und zwar gleichzeitig mit den vertikalen. Der Punkt, dessen Schwankungen registriert werden, ist übrigens nicht der Schwerpunkt selbst, an den man keine Apparate befestigen kann, sondern das Os pubis. Der gehende Mensch treibt wieder die karousselartige Vorrichtung. Ihr Balken trägt zwei MAREY'sche Luftkissen, deren Hebel mit dem Os pubis des Gehenden verbunden sind. Der eine dieser Hebel ist nur in vertikaler, der andere nur in horizontaler Ebene drehbar und dementsprechend liegt natürlich die Kautschukmembran des ersteren in wagrechter, die des letzteren in senkrechter, der Medianebene des Gehenden paralleler Ebene. Jedes dieser Luftkissen ist mit einem Kardiographen durch einen Kautschukschlauch verbunden. Beide Kardiographen zeichnen an einem in der Mitte des

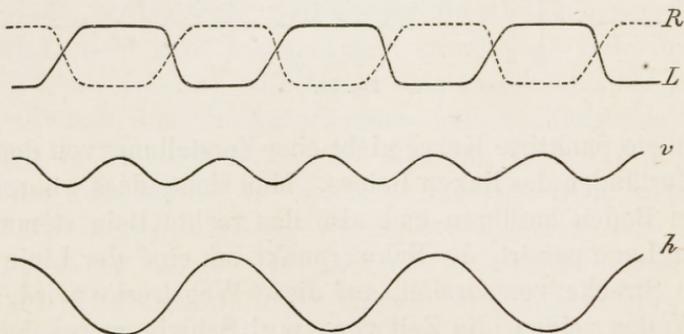


Fig. 23.

Karoussells feststehenden Cylinder, der Zeiger des die wagrechten Schwankungen registrirenden Kardiographen hebt sich, wenn das Os pubis nach rechts ausweicht und umgekehrt. Die Fig. 23 giebt einen solchen Versuch. Oben ist in den Kurven *L* und *R* (letztere punktirt)

zu sehen, wie die beiden Beine abwechselnd stützen und schwingen, die Erhebung der Kurve über die wagrechte deutet das Auftreten des Fusses an, *L* bezieht sich auf das linke, *R* auf das rechte Bein. Die Kurve *v* zeigt die vertikalen, die Kurve *h* die horizontalen Schwankungen. Man sieht vor Allem, dass die vertikalen Schwankungen doppelt so häufig erfolgen, als die horizontalen, was ja nothwendig ist, da bei jedem Schritt der Körper einmal sinkt und einmal steigt, während er bei dem einen Schritte nach rechts, beim andern nach links ausweicht, also ein Hinundhergang von rechts nach links und zurück erst in der Zeit von zwei Schritten vollendet wird.

Die Amplituden der horizontalen Schwankungen erscheinen auf der von MAREY gegebenen Zeichnung etwa doppelt so gross wie die der vertikalen. Daraus würde auf einen doppelten Betrag derselben zu schliessen sein, wenn man annehmen dürfte, dass die beiden Registrirapparate im selben Maassstabe gezeichnet haben. Hierüber macht indessen MAREY keine bestimmten Angaben. Dass die wagrechten Schwankungen bedeutend grösser sind als die senkrechten ist übrigens von vornherein sehr wahrscheinlich.

Während der Körper beim Gehen bloss von einem Beine gestützt wird, liegt natürlich sein Schwerpunkt zwar über dem Fusse, nicht aber über dem Kopfe des betreffenden Schenkels, und es übt also die Schwere am Hüftgelenke ein adducirendes Moment aus, dies kann nur im Gleichgewicht gehalten werden durch Spannung der Abduktoren. In der That fühlt man, wenn man beim Gehen die Hand auf den Glutaeus medius legt, jedesmal sowie der betreffende Schenkel die Stützung des Körpers übernimmt, in jenem Muskel eine bedeutende Spannung. Es ist zu vermuthen, dass die enorme Entwicklung der Abduktoren (Glutaeus medius und minimus) vorzugsweise den Zweck hat, den Körper am seitlichen Umsinken beim Gehen zu verhindern, denn zu andern Zwecken ist wohl nicht häufig eine sehr kräftige Abduktion der Beine erforderlich.

Da sowohl die Schwere des hängenden als die Streckkraft des stemmenden Beines nie genau in der Vertikalebene auf den Körper wirken, welche den Schwerpunkt enthält, so wirken beim Gehen stets auch Momente, welche den Körper um das Loth durch seinen Schwerpunkt bald im einen, bald im andern Sinne zu drehen streben. Gleichwohl kommen bei korrektem Gange keine merklichen Oscillationen um die vertikale Axe vor. Eine wesentliche Hülfe zur Vermeidung derselben leisten die Schwingungen der beiden Arme. Während z. B. das linke Bein schräg nach hinten hängt, hängt der rechte

Arm ebenso und der linke Arm schräg nach vorn und vice versa beide Arme bringen in diesen Lagen immer ein entgegengesetztes Drehungsmoment hervor wie das hängende Bein. Ohne Zweifel müssen aber auch die rotatorischen Momente von Hüftgelenkmuskeln zur vollständigen Vermeidung der Oscillationen mitwirken.

Nach den vorstehend entwickelten allgemeinen Gesetzen kann das Gehen mit sehr verschiedener Geschwindigkeit stattfinden, und es lässt sich aus den Gesetzen selbst zum Voraus ersehen, wie die einzelnen in Betracht kommenden Grössen verändert werden müssen,

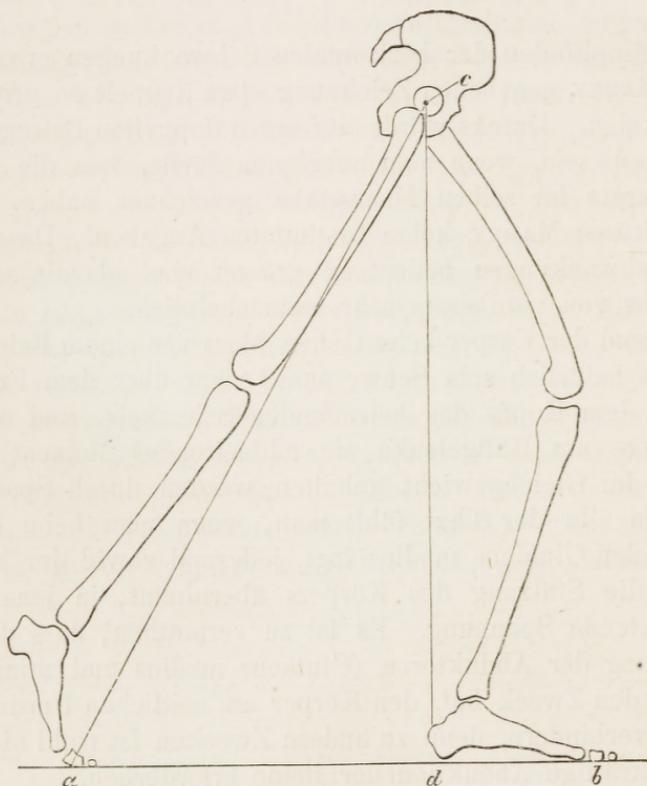


Fig. 24.

um die Geschwindigkeit des Gehens zu vergrössern oder zu verkleinern. Zu diesem Zwecke ist vor Allem erforderlich, die Schrittlänge mit der Höhe, in welcher die Schenkelköpfe über dem Boden getragen werden, in Beziehung zu setzen. Betrachten wir zu diesem Ende die Stellung der beiden Beine in dem Augenblicke, in welchem das hinten angestemmte Bein das Maximum seiner Länge durch Streckung aller Gelenke erreicht hat und im Begriffe ist, vom Boden

gehoben zu werden. In diesem Augenblicke muss nach den entwickelten Gesetzen der Schenkelkopf senkrecht über der Ferse des vorn aufgesetzten Fusses liegen. Unter Schrittlänge versteht man nun bekanntlich die Entfernung entsprechender Punkte zweier aufeinander folgender Fussspuren, z. B. die Entfernung von der Spitze der einen Fussspur zur Spitze der nächsten. In Fig. 24 ist also die Schrittlänge ab . Andererseits ist die Entfernung der eben aufzuhebenden Fussspitze von dem Fusspunkte eines Perpendikels durch den Drehpunkt des Hüftgelenkes c die eine Kathete eines rechtwinkligen Dreieckes, dessen Hypothenuse die Länge des vollständig ausgestreckten Beines ac und dessen andere Kathete die Höhe cd ist, in welcher die Schenkelköpfe über dem Boden getragen werden. Da nun im Momente der Erhebung des hinteren Fusses der Schwerpunkt senkrecht über der Ferse d steht, so ist diese Kathete ad gerade um die Länge des Fusses kleiner als die Schrittlänge ab . Dadurch ist die Schrittlänge in Beziehung gesetzt mit der Höhe cd , in welcher die Schenkelköpfe über dem Boden getragen werden. Nennen wir diese h und die ein für allemal fast konstante Länge des vollständig ausgestreckten Beines von der Fussspitze bis zum Schenkelkopf l sowie die ebenfalls konstante Länge der Fusssohle f so ist die Schrittlänge

$$s = \sqrt{l^2 - h^2} + f.$$

Die obere Grenze der Grösse ad ist selbstverständlich die halbe Spannweite der beiden Beine, d. h. die Hälfte der Entfernung, in welche man die Fussspitzen vorn und hinten aufsetzen kann, während der Rumpf aufrecht gehalten wird. Von der Grösse h ist merkwürdigerweise auch die Schrittdauer abhängig. Je tiefer nämlich die Schenkelköpfe getragen werden, eine desto geneigtere Lage erhält das stemmende Bein, desto grösser ist die Beschleunigung des Körpers, desto weniger dürfen die Beine lange stehen bleiben, wenn sie durch ihre Schwere getrieben den Rumpf wieder einholen sollen, desto vertikaler ist die Stellung des Beines beim Auftreten und kleiner der Zeitraum des Stützens auf beide Beine, desto weniger übertrifft endlich die Dauer eines Schrittes die Hälfte der Dauer einer Schwingung des Beines.

Die halbe Schwingungsdauer des Beines ist die Kleinheitsgrenze der Schrittdauer, welche beim schnellsten Gehen erreicht wird. Es zieht sich dabei der Zeitraum, während welches beide Beine am Boden angestemmt werden, auf Null zurück, indem das schwingende Bein nicht über die senkrechte Gleichgewichtslage hinausschwingt und weiter vorn aufgesetzt wird, sondern es wird in dem Momente,

wo es die Gleichgewichtslage erreicht — also die Hälfte der Schwingung vollendet hat, gerade senkrecht auf dem Boden aufgesetzt und es kann also im selben Momente das hintere Bein den Boden verlassen. Diese bemerkenswerthe Folgerung aus der WEBER'schen Theorie des Gehens ist durch Versuche vollkommen bestätigt; die Gebr. WEBER fanden nämlich bei einer Person die halbe Schwingungsdauer des schlaff hängenden Beines = 0,346 Sekunden und bei derselben Person die Schrittdauer beim schnellsten Gehen = 0,332 Sekunden. Dass die kürzeste Schrittdauer noch eine Spur kleiner erscheint als die halbe Dauer einer Pendelschwingung ist wohl nicht auf Beobachtungsfehler oder Störungen zu beziehen, sondern darauf, dass Schwingungen des gestreckten Beines zur Messung der Schwingungsdauer dienten, während beim Gehen das Bein in etwas gebogenem Zustande seine Schwingung vollführt. In der überraschend genauen Uebereinstimmung der soeben angegebenen Zahlen liegt beiläufig bemerkt der mathematische Beweis für den öfters angezweifelten Kardinalsatz der „Mechanik der Gehwerkzeuge“ dass das hängende Bein lediglich unter dem Einflusse der Schwere also wie ein Pendel schwingt. Auch die in den obigen Sätzen implicite ausgedrückte Thatsache, dass grosse Schritte von kürzerer Dauer sind als kleine, ist nur aus der WEBER'schen Pendeltheorie zu verstehen. Bei kleinen Schritten nämlich ist der Schwingungsbogen des hängenden Beines zwar in Graden gemessen kleiner als bei grossen, aber er ist ein grösserer Bruchtheil der ganzen Schwingung, die eben bei kleinen Schritten von einer geringeren Maximal-elongation anfängt. Deswegen braucht das Bein zur Zurücklegung des kleineren Bogens mehr Zeit als zum Durchlaufen des absolut grösseren Bogens bei grossen Schritten. Wenn andere Kräfte als die Schwere eine wesentliche Rolle spielten, wäre dies nicht möglich. Wenigstens müssten diese Kräfte auch wie die Schwere jederzeit eine der Elongation proportionale tangentielle Komponente besitzen. Bis zu einem gewissen Grade würde dies allerdings für die Spannung der Schenkelbeuger gelten, aber doch bei weitem nicht in dem Grade, wie es erforderlich wäre, um die Thatsachen im Einzelnen zu erklären.

Eine Anschauung davon, wie in Wirklichkeit die Schrittdauer bei abnehmender Schrittlänge zunimmt, kann nachstehende Tabelle geben, wo zusammengehörige Werthe der Schrittdauer, Schrittlänge bei natürlichem Gehen derselben Person mit verschiedener Geschwindigkeit nach den Messungen der Gebr. WEBER zusammengestellt sind.

| Schrittdauer. | Schrittlänge. | Geschwindigkeit. |
|---------------|---------------|------------------|
| 0,335'' | 0,851 m | 2,397 m./sec. |
| 0,394 | 0,835 | 2,119 |
| 0,417 | 0,804 | 1,928 |
| 0,460 | 0,804 | 1,748 |
| 0,480 | 0,790 | 1,646 |
| 0,507 | 0,762 | 1,503 |
| 0,562 | 0,724 | 1,288 |
| 0,572 | 0,712 | 1,245 |
| 0,604 | 0,668 | 1,106 |
| 0,630 | 0,658 | 1,044 |
| 0,663 | 0,629 | 0,949 |
| 0,668 | 0,629 | 0,942 |
| 0,726 | 0,595 | 0,819 |
| 0,760 | 0,572 | 0,753 |
| 0,846 | 0,530 | 0,627 |
| 0,860 | 0,543 | 0,631 |
| 0,905 | 0,493 | 0,545 |
| 0,966 | 0,448 | 0,464 |
| 1,030 | 0,430 | 0,417 |
| 1,050 | 0,398 | 0,379 |

Nur sehr wenig kann das Verhältniss von Schrittdauer und Schrittlänge willkürlich abgeändert werden.

Eine Gangart wird in der „Mechanik der Gehwerkzeuge“ noch besonders unter dem Namen des Gehens im „gravitatischen Schritte“ ausgezeichnet. Ihr Wesen besteht darin, dass das schwingende Bein in seiner Schwingung so weit über die Vertikale hinaus geht, dass es vorn aufgesetzt mit der Vertikalen einen grösseren Winkel bildet als das hinten stemmende Bein. Dies letztere fährt daher noch eine Zeit lang fort, die Last des Körpers wesentlich zu tragen. Diese Gangart ist demnach besonders geeignet zum Gehen im Dunkeln auf unbekanntem Boden, weil man denselben dabei mit dem vorn aufgesetzten Fusse zuerst gleichsam betastet, ohne sich sofort darauf zu stützen. Die Schritte können bei dieser Gangart natürlich nur sehr klein sein und müssen sehr lange dauern, da die ganze Elongation der Schwingung des Beines nur sehr klein sein kann, aber fast ganz oder ganz vom schwingenden Bein zurückgelegt wird und noch dazu der Zeitraum des Stehens auf beiden Füßen sehr lang ist. Nach den entwickelten Hauptsätzen werden beim gravitatischen Schritte die Schenkelköpfe sehr hoch getragen.

DRITTES CAPITEL.

Das Laufen.

Unter „Laufen“ verstehen wir eine Fortbewegungsart des Körpers durch die Beine, welche sich vom Gehen dadurch unterscheidet, dass bei ihr nie beide Füße zugleich den Boden berühren, dass vielmehr abwechselnd Zeiträume aufeinander folgen, während welcher ein Bein auf dem Boden steht und während welcher kein Fuss den Boden berührt, also der Körper frei fliegt. Da bei diesem freien Fliegen der Körper eine ziemlich grosse Strecke in wagrechter Projektion durchmessen kann, so hat die Schrittlänge nicht zur oberen Grenze die halbe Spannweite der gestreckten Beine. Andererseits ist hier die obere Grenze der Schrittdauer die halbe Schwingungsdauer des Beines. In der That muss bei dieser Bewegungsart das Bein stets gerade senkrecht, also nach Vollendung der halben Schwingung aufgesetzt werden, da es sogleich die Rolle der Stütze ganz übernehmen muss. Diese halbe Schwingung fällt aber zum Theil noch in den Bereich der Dauer des vorhergehenden Schrittes, denn die Schwingung dieses Beines muss ja schon begonnen haben, ehe das andere Bein aufgesetzt wurde, da eben jedem Aufsetzen eines Beines ein Zeitraum des Schwebens beider Beine vorangeht. Beim Laufen ist daher die Schrittdauer kleiner und es kann die Schrittlänge grösser sein als beim Gehen, mithin ist die Geschwindigkeit im Allgemeinen grösser.

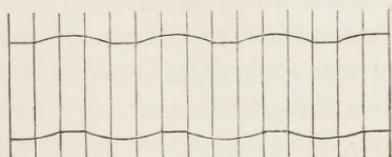


Fig. 25.

Stellen wir die abwechselnden Zustände der Beine beim Laufen wieder durch ein ähnliches Schema, wie das S. 326 für das Gehen gegebene dar. Die Zeit des Schwebens eines Beines wird durch einen Bogen, die Zeit des Stehens durch einen geraden Strich bezeichnet. Die obere Zeichenreihe soll für das linke, die untere Zeichenreihe für das rechte Bein gelten.

Die Fig. 25 stellt in dieser Weise die Dauer von 10 Schritten dar. Im ersten Augenblicke dieser Darstellung wird der linke Fuss vorn senkrecht auf den Boden gesetzt und zwar meist in noch mehr gebogener Lage als beim schnellsten Gehen, damit die Arbeit bei

der Streckung ausreicht, dem Körper die Wurfbewegung zu ertheilen. Das rechte Bein hat in diesem Augenblicke schon einen Theil seiner Schwingung ausgeführt. Nun fängt das linke Bein sofort an, sich zu strecken, während beim Gehen das vorn aufgesetzte Bein im ersten Augenblicke noch weiter gebogen wird. Durch die Streckung des linken Beines wird der Körper am Sinken gehindert und schießt wagrecht weiter. Bei der grossen Energie, mit welcher hier die Streckung vollführt wird, ist sie bald beendet, noch ehe das rechte Bein zur senkrechten Lage gekommen ist. Dadurch hat der Schwerpunkt eine sehr bedeutende, etwas schräg aufwärts gerichtete Geschwindigkeit erlangt, mit welcher er, nachdem der linke Fuss den Boden auch verlassen hat, in sehr flach parabolischer Bahn, d. h. fast wagrecht frei weiter fliegt. In diesem Zeitraum vollendet das rechte Bein seine Schwingung und wird in dem durch den dritten Vertikalstrich der Fig. 25 bezeichneten Augenblick auf den Boden aufgesetzt. Während nun das linke Bein weiterschwingt, streckt sich das rechte wie vorher das linke und wirft in dem durch den vierten Vertikalstrich bezeichneten Augenblick den Körper frei in die Luft und derselbe fliegt wieder bis der linke Fuss (fünfter Vertikalstrich) aufgesetzt wird. Hiermit sind zwei Schritte vollendet und es beginnt mit diesem Augenblicke der soeben beschriebene Cyklus von Bewegungen von neuem.

In den meisten Fällen werden, wie aus den vorstehenden Sätzen hervorgeht, beim Laufen die Schenkelköpfe noch tiefer über dem Boden getragen, als selbst beim schnellsten Gehen. Merkwürdigerweise sind die vertikalen Schwankungen des Körper beim Laufen noch geringer als beim Gehen. Sie betragen nur etwa 21 mm.

| Schrittdauer. | Schrittlänge. | Geschwindigkeit. |
|---------------|---------------|------------------|
| 0,247" | 1,753 m | 6,66 m./sec. |
| 0,268 | 1,542 | 5,745 |
| 0,293 | 1,284 | 4,383 |
| 0,301 | 1,209 | 4,021 |
| 0,314 | 1,138 | 3,623 |
| 0,319 | 1,018 | 3,194 |
| 0,326 | 0,934 | 2,862 |
| 0,317 | 0,819 | 2,584 |
| 0,303 | 0,718 | 2,367 |
| 0,304 | 0,610 | 2,003 |
| 0,304 | 0,519 | 1,706 |
| 0,305 | 0,416 | 1,364 |
| 0,301 | 0,315 | 1,047 |

In vorstehender Tabelle sind einige numerische Data der WEBER-
schen Versuche über Schrittdauer, Schrittlänge und Geschwindigkeit
beim Laufen verzeichnet. Man sieht aus dieser Tabelle, verglichen
mit der S. 339 für das Gehen gegebenen, dass die Schrittdauer beim
Laufen überhaupt nur wenig variirt und dass die Verschiedenheit
der Geschwindigkeit hauptsächlich durch Verschiedenheit der Schrittlänge
bedingt ist. Mit abnehmender Schrittlänge nimmt anfangs die
Schrittdauer zu bis $0,326''$, welche der kürzesten Schrittdauer beim
Gehen, $0,335''$, nahe kommt, sie aber nicht ganz erreicht, was mit
dem obigen Satze zusammenstimmt, dass die Schrittdauer beim Laufen
stets kleiner sein muss als die halbe Pendelschwingung des Beines,
während sie beim Gehen grösser oder mindestens gleich dieser sein
muss. Bei noch weiterer Abnahme der Schrittlänge nimmt die Schrittdauer
wieder ab, jedoch nur wenig, indem sie sich bei den kleinsten
Schrittlängen ziemlich konstant auf etwas über $0,30''$ hält. Es kann
also für einen bestimmten Werth der Schrittdauer innerhalb gewisser
Grenzen die Schrittlänge zwei verschiedene Werthe haben. So ent-
spricht z. B. in obiger Tabelle der Schrittdauer $0,319$ (resp. $0,317$,
die ihr gleich gelten mag, weil im zweiten Theil der Tabelle die
Zahl $0,319$ nicht genau vorkommt) einerseits die Schrittlänge $1,018$ m.,
andererseits die Schrittlänge $0,819$ der Schrittdauer $0,301''$ entsprechen
die Schrittlängen $1,209$ und $0,315$ m. Diese merkwürdige Erscheinung
lässt sich am leichtesten durch folgende Ueberlegung verstehen. Zu-
nächst beachte man, dass nach den allgemeinen Sätzen über das
Wesen des Laufens die Schrittdauer stets gleich ist der halben
Schwingungsdauer des Beines vermindert um die Zeit, während
welcher der Körper ohne Stütze schwebt. Nun wollen wir ausgehen
von der Art des Laufens, die sich vom schnellsten Gehen nur eben
merklich unterscheidet, d. h. wo der Zeitraum des Schwebens nahezu
gleich Null ist, und wollen zu andern Arten dadurch übergehen,
dass wir diesen Zeitraum wachsen lassen. Dabei kann entweder die
Höhe der Schenkelköpfe über dem Boden von dem ursprünglichen
Werthe aus vergrössert oder verkleinert werden. Somit kommen wir
zu einer bestimmten Schrittdauer mit zwei verschiedenen Werthen
dieser Höhe und diese Werthe sind dann maassgebend für die
Schrittlänge. Ist nämlich die Höhe der Schenkelköpfe noch kleiner
als beim schnellsten Gehen, so wirkt die Streckkraft des sehr schräg
angestemmtten Beines so stark wagrecht beschleunigend, dass in dem
Zeitraum des Schwebens der Körper weiter fliegen kann als die eine
Kathete des rechtwinkligen Dreieckes, dessen Hypothense die Länge
des gestreckten Beines und dessen andere Kathete die Höhe der

Schenkelköpfe ist. Dadurch entsteht für die betrachtete Schrittdauer eine Schrittlänge, die grösser ist als die Schrittlänge beim schnellsten Gehen.

Gelangt man zu derselben Schrittdauer, indem man mit dem Zeitraum des freien Fliegens zugleich die Höhe der Schenkelköpfe über dem Boden wachsen lässt, dann wirkt die Streckkraft des angestemmt Beines nicht so stark horizontal beschleunigend, um den Körper während der Flugzeit eine grössere Strecke durchfliegen zu lassen und es kommen kleinere Schritte heraus als beim schnellsten Gehen.

Es giebt noch eine besondere Art des Laufens, welche sich von der beschriebenen und von den Gebr. WEBER als „Eillauf“ bezeichneten wesentlich unterscheidet. Bei dieser zweiten Art des Laufens — in der „Mechanik der Gehwerkzeuge „Sprunglauf“ genannt — sind die Schritte ebenfalls im Allgemeinen grösser als beim Gehen, aber es ist auch die Dauer des Schrittes bedeutend grösser als beim Eillauf. Unter den Begriff des Laufens fällt diese Fortbewegungsart durch das Merkmal, dass auch bei ihr in jeder Schrittdauer ein Zeitraum enthalten ist, während dessen kein Bein den Boden berührt. Ihr Wesen besteht darin, dass das vorn aufgesetzte Bein nicht sogleich die Funktion des Stemmens übernimmt, sondern noch eine Zeit ganz schlaff bleibt, während welcher der vom hinteren Bein aufgeworfene Schwerpunkt in seiner parabolischen Bahn nach vorn und unten weiter geht. Aus diesem Grunde braucht nun der Fuss beim Aufsetzen nicht senkrecht unter dem Körper zu stehen, sondern er kann den Boden viel weiter vorn berühren, denn der Schwerpunkt des Körpers rückt, wenn ihn das vorn aufgesetzte Bein eben nicht durch Stemma zurückhält, in seiner Flugbahn von selbst senkrecht über den Fuss. Sowie nun dies eingetreten ist, fängt die Streckkraft des jetzt sehr gebogenen Beines an zu wirken und zwar sehr plötzlich und intensiv, so dass dem Körper eine grosse schräg aufwärts gerichtete Geschwindigkeit ertheilt wird, vermöge deren er hoch auffliegt. Dadurch wird die Zeit des Steigens und Fallens sehr gross und es kann das schon in der Schwingung begriffene Bein nun über die Gleichgewichtslage hinausschwingen, d. h. mehr als eine halbe Schwingung vollenden und gerade deshalb wird es dann auch weit vor dem Loth durch den Schwerpunkt mit dem Boden in Berührung gebracht und im Schwingen aufgehalten. Die obere Grenze der Schrittdauer ist hier also nicht wie beim Eillaufe die halbe, sondern die ganze Schwingungsdauer des Beines, hinter welcher aber die Schrittdauer beim Sprunglaufe in Wirklichkeit immer sehr zurück-

bleiben muss, denn es ist die Schrittdauer vermehrt um die Zeit des freien Fliegens, höchstens der ganzen Schwingungsdauer des Beines gleich. Diese Zeit des freien Fliegens ist ja aber gerade beim Sprunglaufe besonders gross.

Nachstehende, der „Mechanik der Gehwerkzeuge“ entnommene Tabelle giebt einige Beobachtungsdata über die Abhängigkeit zwischen Schrittdauer, Schrittlänge und Geschwindigkeit der Fortbewegung bei verschiedenen Arten des Sprunglaufes.

| Schrittdauer. | Schrittlänge. | Geschwindigkeit. |
|---------------|---------------|------------------|
| 0,460'' | 1,243 m | 2,702 m./sec. |
| 0,468 | 1,578 | 3,372 |
| 0,455 | 1,688 | 3,710 |
| 0,411 | 1,809 | 4,402 |
| 0,404 | 1,977 | 4,894 |

Einige im Texte nicht citirte neuere Literatur der speciellen Bewegungslehre.

1856. H. MEYER, Lehrbuch der physiologischen Anatomie. — LANGER, Mittel-lage der Gelenke. Ztschr. d. Ges. d. Aerzte zu Wien. Januar. — Derselbe, Ueber das Sprunggelenk der Säugethiere und des Menschen. Denkschr. der Wiener Academie. — HENKE, Die Bewegung des Fusses am Sprungbein. Ztschr. f. rat. Med. VII. S. 225. — Derselbe, Die Bewegung des Beines am Sprungbein. Ztschr. f. rat. Med. VIII. S. 149. — BEVERIDGE, On the lateral movement of the foot. Edinbrough med. journ. April. — DUCHENNE, Physiologie des mouvements du pied. Gaz. d. hôpit. Nr. 66.

1857. HARLESS, Die statischen Momente der menschlichen Gliedmaassen. Verhandl. der Münchener Acad. — GIRAUD-TEULON, Principes de mecanique animale. — HELMHOLTZ, Ueber Muskeln der oberen Extremität. Allg. med. Centralztg. No. 11. — HENKE, Die Bewegungen zwischen Atlas und Epistropheus. Ztschr. f. rat. Med. II. S. 114. — Derselbe, Die Kontroversen über die Fussgelenke. Ebenda S. 163. — L. FICK, Hand und Fuss. Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 435.

1858. LANGER, Ueber inkongruente Charniergelenke. Sitzungsber. d. Wiener Acad. XXVII. S. 182. — Derselbe, Das Kniegelenk des Menschen. Ebenda XXXII. S. 99.

1859. L. FICK, Ueber die Gestaltung der Gelenkflächen. Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 657. — HENKE, Die Bewegungen des Kopfes in den Gelenken der Halswirbelsäule. Ztschr. f. rat. Med. VII. S. 49. — Derselbe, Die Aufhängung des Armes in der Schulter durch den Luftdruck. Ztschr. f. rat. Med. VII. S. 263. — Derselbe, Die Bewegungen der Handwurzel. Ebenda VII. S. 27. — Derselbe, Der Mechanismus der Doppelgelenke mit Zwischenknorpeln. Ebenda VIII. S. 48. — LANGER, Die Bewegungen der Gliedmaassen, insbesondere der Arme. Wiener med. Wochenschr. Nr. 11 u. 12. — AEBY, Die Muskeln des Vorderarmes und der Hand bei Säugethieren und beim Menschen. Ztschr. f. wiss. Zool. X. — OSBORNE, On some actions performed etc. Dublin quarterly journ. of med. science.

1861. LANGER, Ueber die Fixirung des Humeruskopfes in der Schulterpfanne. Ztschr. d. Ges. d. Aerzte zu Wien. — Derselbe, Einiges über die Bewegung der Bandscheiben im Kniegelenk. Ebenda. — HENKE, Antikritik betreffend das Kniegelenk. Ztschr. f. rat. Med. XIV. S. 243.

1863. HENKE, Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke. — BUSCH, Ueber die Funktion des Serratus major. Arch. f. klin. Chirurgie IV. S. 39.

1864. PAROW, Studien über die physikalischen Bedingungen der aufrechten Stellung. Arch. f. pathol. Anat. XXXI. S. 74. — HAUGHTON, Notes on animal mechanics. Med. times II. p. 638.

1865. ROSE, Die Mechanik des Hüftgelenkes. Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 521.

1866. CLELAND, On the action of muscles passing over more than one joint. Journ. of anat. and physiol. November.

1867. DUCHENNE, Physiologie des mouvements. — KOSTER, De Drukking der lucht op het heupgewicht. Nederl. Arch. v. Genees- en Naturkunde III. p. 21. — H. MEYER, Die Mechanik des Sitzens. Arch. f. pathol. Anat. XXXVIII. S. 15. — BERT, Notes diverses sur la locomotion. Paris 1867. — KOSTER, De draijing van het hoofd in de articulatio atlanto-occipitalis. Nederl. Arch. III. p. 27.

1868. HENKE, Flexions- und Rotationsmuskeln. Ztschr. f. rat. Med. XXXIII. S. 108. — Derselbe, Kontroversen über Hemmung und Schluss der Gelenke. Ebenda S. 126. — Derselbe, Die Leistungen der Wirkungen von Muskeln auf das Hüftgelenk beim Stehen und Gehen. Ebenda S. 116. — Derselbe, Ueber Insufficienz der Länge der Muskeln. Ebenda S. 141.

1869. H. MEYER, Ueber die Kniebeugung in dem abstossenden Beine und über die Pendlung des schwingenden Beines im gewöhnlichen Gange. Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 1. — HÜTER, Ueber Längeninsufficienz der bi- und polyarthrodialen Muskeln. Arch. f. pathol. Anat. XLVI. S. 37. — PROMPT, Recherches sur la theorie de la marche. Gaz. méd. No. 19—31.

1870. HAUGHTON, On some elementary principles of animal mechanics. Proceed. roy. soc. XVIII. p. 22.

1871. HAUGHTON, On the principle of least action in nature illustrated by animal mechanics. Brit. med. Journ. CLXXXVII. p. 549. — HENKE, Bemerkungen über die Beweglichkeit der Wirbelsäule und ihre Haltung beim Stehen und Gehen. Rostock 1871.

1872. VOLKMAN, Ueber die Drehbewegung des Körpers. Arch. f. pathol. Anat. LVI. S. 467. — HENKE, Beitr. zur Anatomie des Menschen mit Beziehung auf Bewegung. I. Heft. Leipzig, Winter. — SCHLAGDENHAUFFEN, Considerations mecaniques sur les muscles. Journ. d. l'anat. et d. physiol. VIII. p. 550.

1873. KÖNIG, Zur Mechanik des Hüftgelenks. Centralbl. f. d. med. Wiss. XI. S. 34 und Deutsche Ztschr. f. Chirurgie III. S. 256. — CARLET, Essai experimental sur la locomotion humaine. Ann. d. sc. nat. — MAREY, La machine animale. Paris, Baillière. — HAUGHTON, Principles of animal mechanics. London, Longmans. — H. MEYER, Die Statik und Mechanik des menschlichen Knochengerüsts. Leipzig, Engelmann.

1874. KOLLMANN, Mechanik des menschlichen Körpers. München, Oldenbourg. — MAREY, Nouvelles expériences sur la locomotion humaine. Compt. rend. LXXIX. p. 125. — LECOMTE, Des mouvements de rotation de la main. Arch. gén. d. méd. August. II. p. 129. — RADCLIFFE, Ueber Synthese der Bewegung. Journ. of anat. VIII. p. 300. — PETTIGREW, La locomotion chez les animaux. Paris, Baillière.

1875. METZGER und DONDEES, Ueber den Luftdruck als mechanisches Mittel zur Fixation des Unterkiefers gegen Oberkiefer. Arch. f. d. ges. Physiol. X. S. 89. — MURISIER, Ueber die Formänderungen, welche der lebende Knochen unter dem Einflusse mechanischer Kraft erleidet. Arch. f. Pathol. u. Pharmokol. III. S. 325. — MAREY, Nouvelles experiences sur la locomotion humaine. Compt. rend. LXXIX. p. 125. — AEBY, Gelenke und Luftdruck. Centralbl. f. d. med. Wiss. Nr. 5.

1876. RAUBER, Ueber den mechanischen Werth einiger Querschnittsformen der Knochen. Sitzungsber. d. naturf. Ges. zu Leipzig. 1875. S. 100. — Derselbe, Elasticität und Festigkeit der Knochen. Leipzig, Engelmann. — AEBY, Beitr. zur Kenntniss der Gelenke. Deutsche Ztschr. f. Chirurgie VI. S. 354. — ALBERT, Zur Mechanik des Hüftgelenkes. Wiener med. Jahrbücher S. 105. — PÜTZ, Zur Anatomie und Physiologie des Sprunggelenkes. Berner Dissertation.

1877. AEBY, Die Gestalt des Femurkopfes. Wiener med. Jahrbücher. Heft 1. S. 75. — ALBERT, Zur Mechanik des Hüftgelenkes. Ebenda S. 291. — Derselbe, Zur Mechanik des Schultergürtels. Ebenda S. 190. — ALBRECHT, Zur Anatomie des Kniegelenkes. Deutsche Ztschr. f. Chirurgie VII. S. 433. — CLARK, The ankle-joint of man. Berner Dissertation. — BUCHNER, Kritische und experimentelle Studien über den Zu-

sammenhalt des Hüftgelenkes. Arch. f. Anat. u. Physiol. Anat. Abth. 1877. S. 22. — VAN BRAAM-HOUKGEEST, Ueber den Einfluss des Luftdruckes auf den Zusammenhalt der Gelenke. Ebenda S. 381. — GUERIN, Sur les mouvements de flexion et d'inclinaison latérales de la colonne vertébrale. Bull. d. l'acad. d. méd. 1877. No. 7. — LECOMTE, Le coude et la rotation de la main. Arch. gén. Mai 1877. — LEWINSKI, Der Mechanismus der Schultergürtelbewegungen. Arch. f. Anat. u. Physiol. Physiol. Abth. S. 196. — GARROD, On the mechanism of the intervertebral substance and on some effects of the erect position of man. Proceed. Zool. Soc. — EUGEN FICK, Zur Mechanik des Kniegelenkes. Arch. f. Anat. u. Physiol.

1878. EUGEN FICK, Zur Mechanik des Hüftgelenkes. Arch. f. Anat. u. Physiol.

Von den übrigen Theilen der speciellen Bewegungslehre sind die Bewegungen des Herzens und der Gefässe, sowie die Athembewegungen im vierten, die Stimme und Sprache im vorliegenden, die Kaubewegung und die Bewegungen der Eingeweide im fünften, die Augenbewegungen im dritten Bande dieses Werkes abgehandelt.
