

stehenden näher erörterten Umständen von der örtlichen (Purgirwirkung!) unabhängig zur Geltung gelangende Wirkungen auf das Nervensystem innewohnen. Diese Gruppe dürfte nur durch die Drastica aus der Familie der Cucurbitaceen: Elaterium, Coloquinthe, Bryonia vertreten sein.

Für die Coloquinthe und das Colocynthin hoffe ich meine eben ausgesprochene Behauptung durch in analoger Weise, wie über den Springgurkensaft, im Laufe dieses Sommers anzustellende Untersuchungen demnächst zu begründen in den Stand gesetzt zu werden.

XXII.

Ueber die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachsthum.

Von Dr. Julius Wolff,

pract. Arzte und Docenten der Chirurgie an der Berliner Universität.

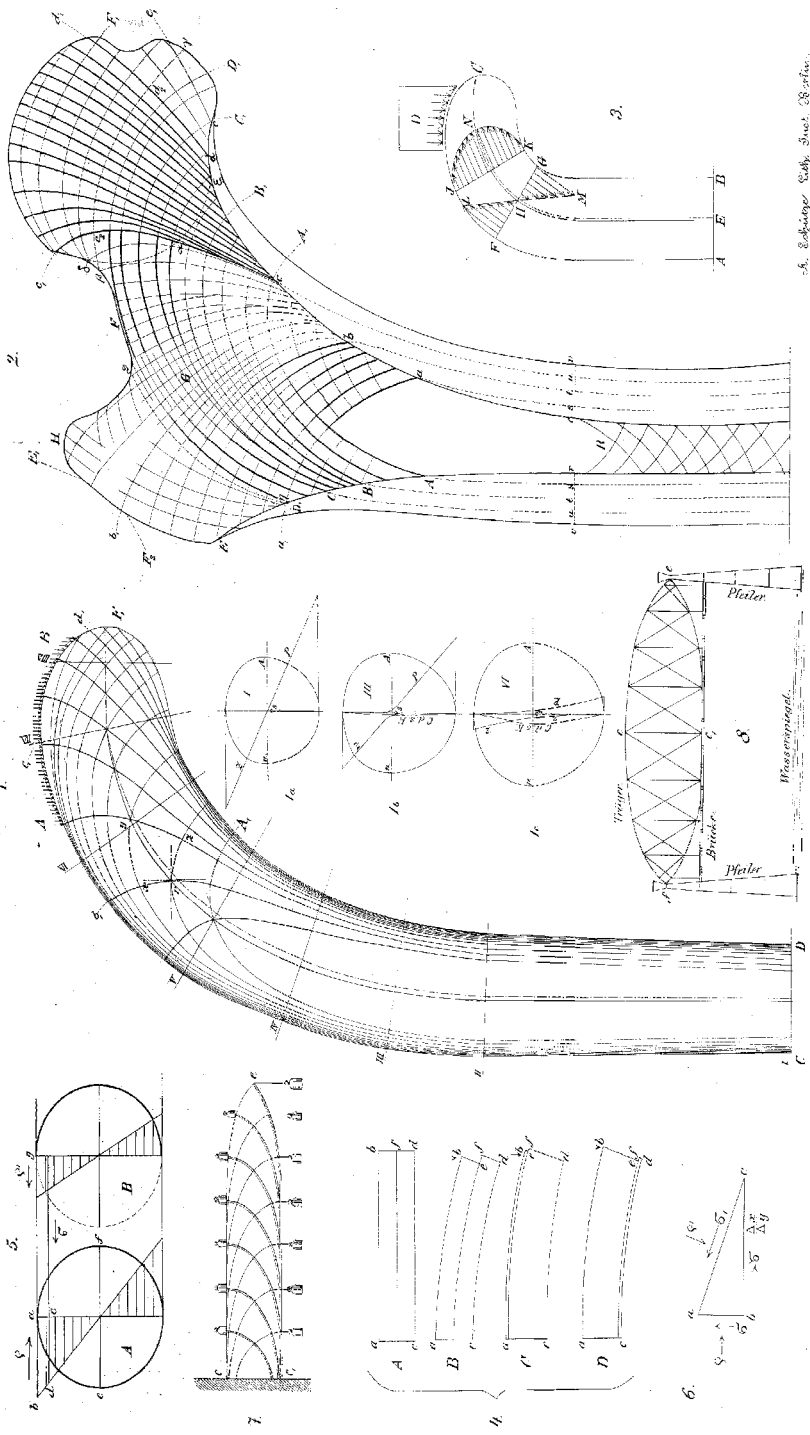
(Hierzu Taf. X — XII.)

Gegen Ende des Jahres 1867 erschien in Reichert's und du Bois-Reymond's Archiv die kleine Arbeit von Hermann Meyer in Zürich über „die Architectur der Spongiosa“, in welcher nachgewiesen wurde, dass den Plättchen des spongiösen Gefüges der Knochen eine bestimmte, regelmässige und für jede Körperstelle eigenthümliche Anordnung zukomme. Dieser Arbeit hat man bisher meines Wissens nirgends eine Beachtung zu Theil werden lassen. Und doch handelt es sich hier, wie ich glaube, um eine der hervorragendsten Entdeckungen der Physiologie, um eine der bedeutungsvollsten namentlich, zu welchen die Untersuchungen über die Knochen bisher geführt haben. Es scheint mir daher Pflicht und hohe Zeit zu sein, auf Meyer's Entdeckung aufmerksam zu machen, und dieselbe weiter zu verfolgen.

Der Grund, weshalb bisher dieselbe nicht von sich reden gemacht hat, liegt zum Theil darin, dass Meyer sich fast gar nicht auf die Frage eingelassen hat, in wie weit seine Beobachtungen umgestaltend auf die früheren Anschauungen über die Knochen einwirken könnten.







Ch. Engelinger Entw. Inst. Berlin.

Dazu kommt, dass derselbe seiner Arbeit nur schematische Figuren beigegeben hat, und keine wirklichen getreuen Abbildungen von Präparaten — und dieser Umstand hat wohl bei den meisten Lesern, wie auch bei mir selber, vorläufige Zweifel an der unleugbaren Richtigkeit jener Beobachtungen wach gerufen. — Endlich hat zwar H. Meyer auf das Verdienstlichste den Zusammenhang der Architectur der Spongiosa mit den statischen und mechanischen Verhältnissen der Knochen erweislich zu machen gesucht; aber er hat hierbei das Allerwichtigste und zugleich dasjenige, worauf es mir in der vorliegenden Arbeit fast ausschliesslich ankommt, nemlich des Mathematikers Culmann grosse Entdeckung der Uebereinstimmung der architectonischen Anordnung in gewissen Knochen mit den theoretischen Linien der graphischen Statik, eben nur in aller Kürze erwähnt, ohne näher darauf einzugehen. Er hat ebenso keine Erklärung der Zug- und Drucklinien, der scheidenden Kräfte und ähnlicher Bezeichnungen aus der graphischen Statik gegeben. Die Bedeutung dieser Bezeichnungen aber, deren Verständniss für den vorliegenden Gegenstand durchaus nothwendig ist, war sicherlich den meisten seiner Leser wenig geläufig — und namentlich wohl den Praktikern, die sich ja seit jeher* mehr für die Untersuchungen der Verhältnisse der Knochen interessirt haben, als die Physiologen von Fach.

Ich hatte bei einem Aufenthalt in Zürich im October v. J. Gelegenheit, Herrn Prof. Meyer zu bitten, mir seine die Architectur der Spongiosa betreffenden Präparate zu zeigen, was seinerseits mit der liebenswürdigsten Bereitwilligkeit geschah. Diesem glücklichen Umstande verdanke ich zunächst die Ueberzeugung, dass in der That das spongiöse Knochengefüge nicht ein regelloses und gleichgültiges Gewirre von Knochenbälkchen und Hohlräumen ist, wie man dies bisher geglaubt hat, dass ihm vielmehr wirklich jene „wohlmotivirte Architectur“ eigen ist, durch die jedem seiner Bälkchen eine statische Bedeutung, und, so zu sagen, eine bestimmte Rolle als zweckmässig angelegter Baustein in dem grossartigen Gesamtbaugerüst des Knochens zugewiesen ist.

So unzweideutig und überzeugend sah ich an jenen Präparaten die schönen und regelmässigen architectonischen Linien, dass ich beim Anschauen derselben nur beständig darüber zu staunen hatte, wie es möglich war, dass eine so wichtige und dabei doch verhält-

nissmässig leicht und makroskopisch erkennbare Thatsache bis auf unsere Tage hatte unentdeckt bleiben können.

Seit jener Zeit habe ich in ausgedehnter Weise mich mit den architectonischen Verhältnissen der Knochen beschäftigt. Ich habe es zunächst wegen des ausserordentlich hohen Interesses gethan, das dieser Gegenstand an und für sich selbst schon darbietet, und wegen der Nothwendigkeit, die sich mir sehr bald ergeben hat, die oben erwähnten Lücken der Meyer'schen Arbeit auszufüllen. Aber noch ein anderer und wichtigerer Grund führte mich zur eingehenden Beschäftigung mit diesem Gegenstande. Je mehr ich namentlich über die innere Architectur der Knochen nachgedacht, je mehr ich namentlich meine Aufmerksamkeit dem Vergleiche derselben in den verschiedenen Lebensaltern, und bis in den Fötalzustand zurück, zugewandt habe, desto mehr und zu der zugleich immer fester gewordenen Ueberzeugung bin ich dabei gekommen, dass der Meyer'schen Entdeckung eine ganz ausserordentlich grosse Bedeutung für die Frage vom Knochenwachsthum zukommt, insofern aus den Verhältnissen der Architectur der Knochen sich mit mathematischer Sicherheit die Nothwendigkeit des ausschliesslich interstitiellen Wachsens der Knochen ergibt, und dass somit die Ergebnisse meiner experimentellen diese Frage betreffenden Untersuchungen nach allen Richtungen hin eine volle und unumstössliche Bestätigung finden.

Ich will bei meinen folgenden Erörterungen über die statische Bedeutung der inneren Architectur der Knochen mich vorzugsweise an einem bestimmten Beispiele halten, und zwar werde ich mich fast ausschliesslich auf die Darstellung der Verhältnisse am oberen Ende des menschlichen Oberschenkels beschränken. Meine Gründe für die Wahl dieser Körperstelle aber sind folgende. Einmal sind die statischen und mechanischen Verhältnisse am oberen Ende des Oberschenkels ausserordentlich einfach, weil ja die Bewegungen im Hüftgelenk sämmtlich ziemlich beschränkt sind, während die bei Weitem vorwiegende statische Bestimmung des Oberschenkels darin besteht, die zunächst mittelst des Acetabulum auf ihm ruhende Last des Rumpfes zu tragen. Hierzu kommt, dass das obere Ende des Oberschenkels, wenn die Körperlast auf ihm ruht, nicht bloss

auf Druck in Anspruch genommen wird, sondern, wie man leicht einsieht, wegen der Winkelstellung des Kopfes zum Schaft zugleich auf Biegung. Dieser Umstand aber bedingt eine Anordnung der Knochenbälkchen, welche es möglich macht, die statische Bedeutung und die Nothwendigkeit dieser Anordnung streng mathematisch zu beweisen — und auf diesen Nachweis kommt es mir in der vorliegenden Arbeit vor allem Anderen an. Endlich finde ich zugleich dieselbe Körperstelle für die allergeeignetste, um an ihr meine Schlussfolgerungen sowohl für das Längen-, als auch für das Dickenwachsthum der Röhrenknochen zu erläutern.

Zunächst nur noch einige Worte über die Anfertigung der Präparate, an denen ich vorzugsweise meine Untersuchungen anstellte, und von welchen die meiner Arbeit beigegebenen photographischen Abbildungen herrühren.

Ich habe mich nicht auf die Untersuchung von Präparaten beschränkt, wie sie mir Herr Prof. Meyer gezeigt hat. Dieselben waren nehmlich durch Zersägen der Knochen in zwei Längshälften gewonnen, und die Entfernung des Markzelleninhaltes war bei ihnen durch Maceriren oder Verwittern an der Luft bewerkstelligt. Ich habe vielmehr eine grosse Anzahl von Knochen auf der Maschine für Elfenbeinsägerei in möglichst feine sog. Fournierblätter zersägen lassen ¹⁾.

Diese Methode gewährt einmal den Vortheil, dass man von einem Knochen sehr viele Präparate gewinnt. — Ferner kann man durch solche Schnitte eine einzige Längslage der spongiösen Region des Knochens für sich allein zur Anschauung bringen. Hierdurch wird das Bild ein viel klareres. Denn es stellen sich auf den Fournierblättern die Plättchen der Spongiosa als Bälkchen oder Säulen dar, und es wird dadurch, wie wir sehen werden, und wovon man sich vorläufig namentlich durch Betrachtung der Fig. 1 Taf. XI. überzeugen mag, eine ganz besonders frappante Darstellung

¹⁾ Auf diesen in der hiesigen Franke'schen Dampf-Schneidemühle befindlichen und u. A. zum Schneiden der papierdünnen Elfenbeinplättchen für Damenfächer dienenden Maschinen wird der auf einen kleinen Holzklötz aufgelegte und mittelst desselben fest eingespannte Knochen langsam in wagerechter Richtung einer feinen blattförmigen Säge entgegengeführt, die sich mit ungeheurer Schnelligkeit in senkrechter Richtung auf und ab bewegt.

der Uebereinstimmung mit den Linien der Mathematiker erzielt. — Alsdann lassen sich solche blattförmigen Präparate ausserordentlich leicht reinigen. Ein sehr kräftiger Strahl der Wasserleitung, wie ihn ein Hahn mit sehr enger Mündung gibt, entfernt in kürzester Zeit allen Markzelleninhalt aus ihnen, ohne doch dabei die zarten Bälkchen der Spongiosa zu zertrümmern ¹⁾. — Auch sind diese Präparate grossentheils durchsichtig, und lassen Vieles bei durchscheinendem Lichte erkennen, was sich bei auffallendem nicht deutlich genug markirt. — Endlich lassen sich von solchen Präparaten, namentlich, wenn sie — zur Erzielung eines scharfen Contrastes — auf eine Unterlage von schwarzem Sammet ²⁾ gebracht werden, die zierlichsten und saubersten Photographien anfertigen.

Das Material für meine Untersuchungen wurde mir durch die ausserordentliche Güte der Herren Geheimrath Reichert und Prof. Virchow gewährt, denen ich hierfür an dieser Stelle meinen innigsten Dank ausspreche.

Fig. 1 Taf. X. zeigt das photographische Bild eines Fournierblattes vom oberen Ende des Femur eines Erwachsenen in natürlicher Grösse. Der Schnitt geht, wie man sieht, in frontaler Richtung mitten durch Kopf, Hals, Trochanter major und Mittelstück des Knochens. — Fig. 2 Taf. XII. ist nach diesem Präparate gezeichnet, und, soweit es der Zweck unserer Explication nothwendig machte, ein wenig schematisch gehalten, im Uebrigen aber, wie man sich leicht überzeugen wird, vollkommen genau dem Vorbilde entsprechend. —

¹⁾ Man thut gut, die Mündungen der gewöhnlichen Wasserleitungshähne mittelst eines durch eine Glasröhre durchbohrten Korkes zu verengern. — Durch Kochen der Präparate in Sodalösung kann man die Reinigung noch erleichtern und denselben zugleich eine schön weisse Farbe geben. Nur darf man natürlich diese letztere Procedur nicht an Knochen jugendlicher Individuen vornehmen, weil sie hier zur Ablösung der Epiphysen führt. — Es ist aber selbstverständlich auf die Methoden der vollständigen Reinigung der Präparate ein sehr grosses Gewicht zu legen; denn sicherlich würden, wenn man sich früher die geringe Mühe gegeben hätte, den Markzelleninhalt vollkommen zu entfernen, die Wunder der spongiösen Knochenregion nicht bis in die Gegenwart sich der Beobachtung der Anatomen entzogen haben.

²⁾ Kein anderer Stoff gibt in der Photographie ein so schönes tiefes Schwarz wieder, als gerade Sammet.

Fig. 1 Taf. XI. ist ein eben solcher Schnitt vom Erwachsenen, in halber natürlicher Grösse photographirt.

Man sieht nun an solchen frontalen Längsschnitten vom Femur constant, wie hier, folgende Verhältnisse:

Die sog. compacte Substanz, in der Mitte des Knochens am dicksten, wird an beiden Seiten nach oben hin allmählich immer dünner, bis sie endlich verschwindet. Dies Verschwinden geschieht auf der lateralen Seite, der des Trochanter major, am unteren äusseren Winkel des Trochanter, und auf der medialen Seite, der der Adductoreninsertion, da, wo die kugelige Wölbung des Gelenkkopfs ihren Anfang nimmt, etwas unterhalb der Epiphysengrenze ($\alpha\beta$ in Fig. 2 Taf. XII.), die sich bis in hohes Lebensalter hinauf noch als Narbe deutlich bemerkbar macht.

Das Dünnerwerden der compacten Substanz aber sieht man vollkommen deutlich dadurch geschehen, dass sich von ihr auf beiden Seiten immer ein Bälkchen nach dem anderen abzweigt, um sich an dem spongiösen Baugerüste zu betheiligen. Es geschieht dies zugleich genau in demselben Maasse, als sich jene Bälkchen abzweigen.

Dem entsprechend stellt sich — wie bereits Hermann Meyer vollkommen richtig bemerkt hat — in der That die sog. compacte Substanz schon makroskopisch als durch eine Zusammendrängung der Bälkchen der Spongiosa gebildet dar. Denn man kann an vielen Stellen einzelne Bälkchen ziemlich weit hinein in die compacte Region verfolgen, so dass man an solchen Stellen oft nicht anzugeben weiss, ob man sich eben noch in der spongiösen Region befindet, oder bereits in der compacten. Namentlich ist dies z. B., wie man aus mehreren Abbildungen der Taf. X. und XI. ersehen kann, im Collum femoris an der Adductorenseite der Fall. — Dass man mikroskopisch viel weiter hinein in die compacte Region, als es mit blossem Auge möglich ist, die Zusammensetzung der Knochensubstanz in dieser Region aus den Bälkchen der Spongiosa wird nachweisen können, kann hiernach wohl kaum einem Zweifel unterliegen ¹⁾.

¹⁾ Wir werden später den mathematischen Beweis dafür finden, dass die Compacta eine zusammengedrängte Spongiosa ist. Ich lege aber besonderes Gewicht darauf, dass wir zu demselben Schluss auch schon hier aus rein anatomischen Gründen gelangen. — Zum Beleg hierfür habe ich

Etwas unterhalb der Höhe des kleinen Trochanter beginnt das spongiöse Gefüge, und erfüllt von da ab den ganzen Raum bis an das obere Ende des Knochens. Es setzt sich zusammen aus etwa fünfzig von dem compacten Gefüge der Adductorenseite und nahezu eben so vielen von dem der Trochanterseite abgegebenen Bälkchen.

Was zunächst die Bälkchen der Adductorenseite betrifft, so schwingen sich die untersten derselben (die zwischen a und b der Fig. 2 Taf. XII. entspringen), mit ziemlich hoher Bogenbildung nach der Trochanterseite in den obersten Theil des Schafts und den untersten des Trochanter major, ziemlich genau einander parallel nach $a_1 b_1$ hinüber. Die nächsten zwischen b und c entspringenden Bälkchen gehen mehr fächerförmig divergirend in den obersten Theil des Trochanter, in das Collum und den äussersten Theil des Caput femoris, so dass sie ihr Ende zwischen $b_1 c_1$ unserer Figur erreichen. Besonders stark divergirend und sogar unterwegs oft fächerförmig Nebenzweige abgebend sind die mittelsten dieser Bälkchen, und zwar diejenigen, die etwa im Scheitelpunkt der abgerundet stumpfwinkligen Biegung, welche der Kopf mit dem Schaft des Femur bildet, entspringen, um gegen den Sattel des Collum femoris hinauf zu verlaufen. Hierauf folgt zwischen c und d wieder

noch Folgendes anzuführen: Einmal zeigt an Knochen jugendlicher Individuen meistens die ganze sog. compacte Substanz kleine der Längsaxe des Knochens parallel gerichtete längliche Lücken, die die Bildung der Compacta aus Bälkchen der Spongiosa ausserordentlich schön zu illustriren geeignet sind. — Unter unseren Abbildungen zeigt sich dies am deutlichsten in Fig. 4 Taf. XI. — Ferner findet sich die Proportionalität zwischen dem Dünnerwerden der Compacta und der Abzweigung von Bälkchen aus ihr in die Spongiosa hinein bei allen Röhrenknochen wieder. — Endlich zeigt sich eine ausserordentlich frappante Bestätigung der in Rede stehenden Thatsache, wenn man Schnitte vom Oberschenkel anfertigt, die durch den Trochanter minor gehen. Das compacte Gefüge, auf dem der Trochanter minor aufsitzt, ist nemlich an den meisten Stellen aus eng zusammengedrängten Längsbalken gebildet, deren Trennungslinien in ihrer ganzen Ausdehnung erkennbar bleiben. — Man wird dies Verhalten sowohl aus Fig. 5 Taf. XI., welche einen durch den Trochanter minor gehenden Längsschnitt, als aus Fig. 6 Taf. XI., welche einen durch denselben gehenden Querschnitt darstellt, erkennen. Doch muss ich bemerken, dass der Schnitt Fig. 5 etwas zu weit am Rande des Trochanter minor, und Schnitt 6 dagegen etwas zu weit durch die Mitte desselben geführt ist, um das erwähnte Verhalten so schön zu zeigen, wie es sich an vielen anderen in meinem Besitz befindlichen Präparaten darstellt.

eine Schicht mehr paralleler schräg nach oben und innen in das Caput femoris gehender Bälkchen, die bei c_2 und d_2 die Epiphysengrenze schneiden. Die letzten schwachen Bälkchen endlich der Grundlage d e vertheilen sich im innersten oder untersten Theil des Caput femoris.

Die dagegen an der Trochanterseite zwischen A und D entspringenden Bälkchen begeben sich sämmtlich in ähnlich hohen und namentlich langgestreckten Bogen nach der Adductorenseite hinüber, wo sie ihr Ende unten bei A_1 , oben bei D_1 , nahe der Epiphysengrenze, finden. Auch hier gehen die mittelsten, zwischen B und C entspringenden Bälkchen mehr fächerförmig auseinander, wiederum öfters mit Abgabe von Nebenzweigen. Dagegen verlaufen die untersten und obersten Bälkchen mehr parallel. Die letzten zwischen D und E der Trochanterseite entspringenden Bälkchen begeben sich in den grossen Trochanter.

Die beiden eben beschriebenen Bälkchensysteme werden vervollständigt durch ein kleines System von Bälkchen, welches sich in der sattelförmigen Vertiefung des Collum femoris bei F an einer kleinen Stelle zu compactem Gefüge verdichtet, und sich von hier aus fächerförmig nach zwei Richtungen verzweigt, nach aussen gegen F_2 in den grossen Trochanter, und nach innen gegen F_1 in das Caput femoris.

An der Spitze des Trochanter major, und zwar an der Insertionsstelle des M. gluteus medius, bei H zeigt sich ferner ein kleines System senkrecht nach unten gehender Bälkchen.

Endlich finden sich in excentrisch geführten Schnitten, wie in Fig. 1 Taf. X., am unteren Ende des Präparats Balkennetze (bei R), die das compacte Gefüge der medialen und lateralen Seite mit einander verbinden, und die als Reste derjenigen Balken anzusehen sind, welche in der Fötalzeit sich ursprünglich an der Stelle der späteren Markhöhle bildeten. Diese Bälkchen sind nach unten ausgeschweift, also in entgegengesetzter Richtung, als die bisher beschriebenen.

Bei genauerer Betrachtung sieht man immer je ein Bälkchen der Adductorenseite und je eins der Trochanterseite sich etwa in der Mittellinie des Knochens kreuzen. Ausserdem findet man, wie die sämmtlichen unzähligen Balkenkreuzungen überall genau unter Winkeln von 90° geschehen, und dass demgemäss alle zwischen den Bälkchen bleibenden Hohlräume Quadrate oder

Rechtecke sind. Allerdings findet man an einzelnen Stellen die Winkel abgerundet; überall aber sieht man auch an diesen Stellen, dass die Seiten der abgerundeten Winkel rechtwinklig auf einander stehen. — Auch zur Oberfläche des Knochens stehen ferner die Enden der Bälkchen überall rechtwinklig.

Schliesslich ist zu bemerken, dass an verschiedenen Stellen der spongiösen Region bald die Bälkchen der Adductorenseite, bald die der Trochanterseite stärker entwickelt sind, dass aber auch diese Verschiedenheiten für bestimmte Stellen immer ganz constante sind. So sind alle zwischen a und b der einen, so wie zwischen A und B der anderen Seite entspringenden Bälkchen stark entwickelt bis zur Mittellinie des Knochens, schwächer in ihren Endstücken. Die zwischen c und d schräg in das Caput femoris aufsteigenden parallelen Bälkchen der Adductorenseite sind so dicht und stark entwickelt, dass sie die der Trochanterseite hier fast ganz verdunkeln. Dicht unterhalb des Winkels, welchen der Trochanter mit dem Sattel des Collum femoris bildet, bei G ist das spongiöse Gefüge sehr dicht, während es zu beiden Seiten dieser Stelle viel lockerer ist, und zugleich an diesen beiden Seiten die langgestreckten Bälkchen der Trochanterseite besonders scharf markirt hervortreten lässt.

Durch die Verschiedenheiten in der Dichtigkeit des Gefüges kommt es nun, dass z. B. dicht unterhalb der Epiphysengrenze oder ihrer Vernarbungsstelle — worauf ich schon hier ganz besonders aufmerksam machen will —, constant drei vollkommen von einander verschiedene Stellen sich scharf kennzeichnen lassen, die man an jedem Präparate wiederfindet. Nach oben, unterhalb des Theils βc_2 der Epiphysengrenze eine kurze Strecke, in der am meisten die nach F_1 und D_1 gerichteten Bälkchen der Trochanterseite hervortreten; in der Mitte, unterhalb der Zone $c_2 d_2$ die dichte Stelle mit den parallelen Bälkchen der Adductorenseite; endlich nach unten, unterhalb der Zone $d_2 \gamma$ ein etwas unregelmässiges, sehr auffälliges Viereck $ed d_2 \gamma$, in welchem die Spongiosa sich als besonders locker und grossmaschig präsentirt; und ein gleiches Gefüge zeigt, wie wir solches dicht oberhalb derselben Zone $d_2 \gamma$ in der Epiphyse finden.

Endlich findet sich noch eine besonders auffällige Stelle bei dem Punkt α unserer Fig. 2 Taf. XII., nemlich da, wo die Linie $\delta \varepsilon$, welche entsteht, wenn wir uns das Caput femoris zu einem

Kreise ergänzt denken, die Längsaxe des Knochens schneidet. Dieser Punkt bildet die Spitze eines Dreiecks $\alpha c G$, an dessen oberer Seite die langgestreckten Bälkchen der Trochanterseite, an dessen unterer Seite die aufsteigenden dichten Bälkchen der Adductorenseite für das Caput femoris besonders scharf markirt sind, während das Innere des Dreiecks — von mehr lockerem Gefüge — vorzugsweise die senkrecht in's Collum aufsteigenden Bälkchen der Adductorenseite hervortreten lässt. (Vgl. auch Fig. 1, 2 und 4 Taf. XI.)

Während sich nun in allen frontalen Längsschnitten aus der oberen spongiösen Region des Oberschenkels, mögen sie genau durch die Mitte des Knochens, also so geführt sein, dass sie durch die Axe desselben gehen, oder mögen sie mehr aus der Nähe der vorderen oder hinteren Fläche desselben entnommen sein, genau dasselbe — so eben beschriebene — Gefüge zeigt, ist unter den sagittalen, in der Richtung von vorn nach hinten durch den Oberschenkel geführten Längsschnitten ein einziger, nemlich der durch die Axe des Knochens gehende Schnitt, durch eine besondere Anordnung der Spongiosa vor allen übrigen, rechts und links von ihm in gleicher Richtung geführten sagittalen Schnitten ausgezeichnet.

Fig. 5 Taf. XI. stellt einen solchen Schnitt, ein auf der Decoupirsäge¹⁾ angefertigtes, sagittales, genau durch die Oberschenkelaxe gehendes und demgemäss gleich ihr gekrümmtes Fournierblatt dar. Das Präparat ist so auf der Sammetunterlage befestigt, dass es sich mit seiner concaven, medialen oder Adductorenseite dem Auge darbietet. Da demnach die der Unterlage zugekehrte Seite convex ist, so kann das Präparat der Unterlage nur zum Theil anliegen. Der obere, dem Caput und Collum femoris entsprechende Theil des Präparats hebt sich von der Ebene der Unterlage immer mehr gegen das Auge des Betrachters hin ab, und dies ist der Grund, weshalb die Photographie, je weiter nach oben, um so undeutlicher und verwaschener ausfallen musste. — Der Rand des Präparats zur Rechten entspricht der Vorderfläche des Femur, und zwar einer von der Foveola capitis femoris gegen die Grenze des äusseren und

¹⁾ Die Decoupirsäge besteht in einem feinen schmalen Laubsägenblatt, welches durch Dampfkraft in senkrecht auf- und absteigender Richtung bewegt wird, während der zu zersägende Gegenstand aus freier Hand in beliebiger Richtung gegen das Sägenblatt angedrückt wird.

mittleren Drittheils der *Linea intertrochanterica anterior* nach aussen gebogenen und von da ab nach unten gehenden Linie dieser Vorderfläche; die Seite zur Linken dagegen einer von der *Foveola* gegen und durch den *Trochanter minor* nach aussen und von da ab nach unten gerichteten Linie der Hinterfläche des Femur.

Die Anordnung der *Spongiosa* in diesem Schnitte ist nun folgende: In dem unteren Theil des Schnitts, und bis über die Gegend des *Trochanter minor* hinaus nach oben, sieht man eine Reihe senkrecht aufsteigender, der *Axe* des Knochens paralleler Bälkchen, und ein zweites das erstere kreuzendes System von Bälkchen, die senkrecht zur Knochenaxe stehen. — Dagegen findet in der Gegend des *Caput* und *Collum* des Schnitts, wie dies meine Präparate zeigen, während es aus der hier undeutlichen Photographie natürlich nicht zu erkennen ist, eine *Convergenz* und *Kreuzung* der von rechts und links her aufsteigenden Bälkchen statt.

Hat man den Schnitt nicht so getroffen, dass er genau sagittal und zugleich durch die Knochenaxe geht, so *convergiren* die Bälkchen auch im unteren Theil der Präparate. In genau sagittal gerichteten Schnitten ist diese *Convergenz* um so grösser, in je grösserer Entfernung von der *Axe* man den Schnitt geführt hat.

Es bleibt uns endlich noch, um eine vollkommene *Einsicht* in den Bau der oberen *Spongiosa* des Oberschenkels zu gewinnen, die Betrachtung der Querschnitte durch diese *Spongiosa* übrig. Fig. 6 Taf. XI. stellt einen senkrecht zur Knochenaxe stehenden Querschnitt, aus der Höhe des *Trochanter minor* eines rechten Oberschenkels dar, von oben her gesehen. Die der Vorderfläche des Femur entsprechende Seite des Präparats liegt nach unten; die der Hinterfläche (mit dem *Trochanter minor*) nach oben; die laterale Seite zur Linken, die mediale zur Rechten. — Man sieht an jeder der vier Seiten des Präparats je eine Reihe von Bälkchen, die der betreffenden Seite parallel sind. Betrachtet man die Photographie mit der Loupe, so erkennt man — da das betreffende von mir aus freier Hand gesägte Präparat etwas dick ist — deutlich die etwas schiefe und *convergent* nach oben gerichtete Stellung jedes einzelnen platten Bälkchens der medialen und lateralen Seite. — Herr Prof. Culmann hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass sich ausser der vierfachen Bälkchenreihe noch zugleich eine hufeisenförmige

Anordnung der Bälkchen in diesem Schnitte findet, so zwar, dass die offene Seite des Hufeisens der medialen Seite zugekehrt ist.

Fig. 7 Taf. XI. ist ein Querschnitt desselben Oberschenkels, und zwar aus dem unteren Theil des Caput femoris, von unten gesehen. Die mediale Seite des Präparats liegt auch hier zur Rechten. In diesem Schnitte erkennt man zunächst lauter concentrische Ringe und zweitens Bälkchen, die radial vom Mittelpunkte des Schnitts gegen die Peripherie hin verlaufen.

Wollen wir uns nun aus dem Befunde der Längs- und Querschnitte ein Gesamtbild der Architectur des oberen Endes des Femur machen, so müssen wir zunächst wieder festhalten, dass dasjenige, was auf den Fournierblattförmigen Schnitten als ein Bälkchen erscheint, in Wirklichkeit meistens¹⁾ ein Theil oder Durchschnitt eines entsprechenden — freilich vielfach durch viereckige Lücken siebförmig durchbrochenen — Plättchens ist.

Unsere Photographien zeigen zunächst, dass eine Reihe solcher Plättchen an der medialen und eine eben solche an der lateralen Seite von vorn nach hinten verläuft, und dass diese Plättchen, indem sie nach oben convergiren, im Wesentlichen eine dachförmige Gestalt haben müssen.

In der unteren Hälfte der oberen Spongiosa des Femur verläuft ferner eine dritte Plättchenreihe parallel der vorderen und eine vierte, parallel der hinteren Fläche von innen nach aussen. Diese beiden Plättchenreihen steigen an einer Stelle, etwa in ihrer Mitte, oder genauer da, wo sie mit der Axe des Knochens in einer und derselben senkrecht auf die Plättchen selbst gerichteten Ebene liegen, parallel zur Knochenaxe, also ohne Convergenz, neben einander auf, während sie zu beiden Seiten von dieser Stelle allmählich immer stärker nach oben dachförmig convergiren.

In der oberen Hälfte der oberen Spongiosa des Oberschenkels dagegen, also im Collum und Caput femoris, sind die vier Plättchensysteme der vorderen, hinteren, medialen und lateralen Seite so in einander übergegangen, dass hier die Spongiosa überall nur aus einfach concentrisch geschichteten Plättchen besteht, die nach oben kegelförmig convergiren.

¹⁾ Ich sage „meistens“, weil zuweilen die Plättchen durch Längslücken der Art durchbrochen sind, dass sie auch in Wirklichkeit als aus einzelnen Längsbälkchen bestehend angesehen werden müssen.

Wir kommen nach dieser anatomischen Darstellung zu der Frage, was diese bestimmte und überall constante Anordnung der Bälkchen oder Plättchen am Oberschenkel zu bedeuten habe.

Es muss als ein ganz ausserordentlich hohes Glück für die Wissenschaft bezeichnet werden, dass Prof. Culmann vom Züricher Polytechnicum, der berühmte Verfasser des ausgezeichneten Werkes über die graphische Statik, in der naturforschenden Gesellschaft zu Zürich die Präparate Meyer's zu sehen bekommen hat. Ohne diesen glücklichen Umstand würde man möglicherweise noch lange Zeit hindurch in der kostbaren Entdeckung Meyer's nichts als eine artige, aber bedeutungslose Spielerei der Natur gesehen haben.

Culmann bemerkte sofort beim Anblick jener Präparate, dass die spongiösen Bälkchen an vielen Stellen des menschlichen Körpers genau in denselben Linien aufgebaut seien, welche die Mathematiker in der graphischen Statik an Körpern entwickeln, die ähnliche Formen haben, wie die betreffenden Knochen, und ähnlichen Kräfteeinwirkungen ausgesetzt sind, wie diese. Er zeichnete nun einen Krahn, d. i. einen gebogenen zum Heben oder Tragen von Lasten bestimmten Balken, dem er die Umrisse des oberen Endes eines menschlichen Oberschenkels gab, und bei dem er eine den Verhältnissen beim Menschen entsprechende Belastung annahm. In diesen Krahn liess er unter seiner Aufsicht die sog. Zug- und Drucklinien von seinen Schülern hineinzeichnen. Und mit welchem Ergebniss! Es zeigt sich, dass diese Linien in allen Punkten dieselben sind, welche die Natur am oberen Ende des Oberschenkels durch die Richtungen, die sie hier den Knochenbälkchen gegeben, in Wirklichkeit ausgeführt hat.

Man vergleiche unsere oben genau beschriebene, nach der Natur gezeichnete Fig. 2 Taf. XII. mit der danebenstehenden Fig. 1, welche den eben erwähnten Culmann'schen Krahn darstellt, und man wird schon auf den ersten Blick von der vollkommenen Uebereinstimmung beider Figuren frappirt sein. Genauer auf diese Uebereinstimmung eingehen will ich an dieser Stelle meiner Arbeit noch nicht. Ich wollte nur vorläufig auf sie aufmerksam gemacht haben, um es gerechtfertigt erscheinen zu lassen, wenn ich hier die Erörterung einiger Sätze aus der graphischen Statik einschalte, deren

Verständniß für den vorliegenden Gegenstand durchaus unentbehrlich ist.

Ich würde aber die Bearbeitung dieses schwierigen Gegenstandes kaum übernommen haben, ich würde wenigstens nicht sicher gewesen sein, überall Richtiges zu sagen, wenn nicht Herr Prof. Culmann in Zürich die ausserordentliche Güte gehabt hätte, mir bei dieser Bearbeitung seinen Rath angedeihen zu lassen, und den bezüglichen Theil meines Manuscripts einer Durchsicht zu würdigen. Indem ich daher in dem Folgenden versuche, dasjenige, worin ich nach Kräften mich einzuarbeiten bemüht gewesen bin, in einer auch für den Nichteingeweihten leicht verständlichen Weise darzustellen, will ich zunächst der angenehmen Pflicht nachkommen, Herrn Prof. Culmann an dieser Stelle meinen innigsten Dank auszusprechen.

Unter einem Balken versteht man in der Statik einen Körper, der durch die Bewegung einer Figur, welche ganz in einer und derselben Ebene liegt, also z. B. eines Kreises oder eines ebenen Vierecks in der Art erzeugt wird, dass der Schwerpunkt der Figur eine continuirliche gerade oder gebogene Bahn beschreibe, und die Figur selbst dabei immer senkrecht auf dieser Bahn stehen bleibe. Die den Balken erzeugende Figur nennt man die Querschnittsfläche; die Bahn des Schwerpunkts nennt man die Balkenaxe. Diese verbindet somit die Schwerpunkte sämmtlicher im Balken möglicher Querschnitte (cf. Culmann, die graphische Statik. Zürich 1866. S. 209).

Es sei nun A B C (Fig. 3 Taf. XII.) ein bei A B eingemauerter gebogener Balken oder Krahn, auf welchem dicht oberhalb C ein eine breite Stelle gleichmässig belastender Körper D ruhe. Die Wirkung dieser Last auf den Krahn ist natürlich dieselbe, als wenn dicht unterhalb C eine zu hebende Last D an einer ebenso breiten Stelle des Krahns hinge.

Man begreift sofort, dass der Balken durch D auf seine Biegungsfestigkeit beansprucht wird, und dass die Last alle zwischen B und C liegenden Theilchen des Krahns zusammendrücken strebt, d. i. auf Druck oder Pressung beansprucht, während sie alle zwischen A und C liegenden Theilchen auseinander zu zerren sucht, d. i. auf Zug oder Zerrung beansprucht. Offenbar muss es nun aber zwischen den auf Pressung und den auf Zerrung

beanspruchten Theilchen des Krahn's eine Schicht geben, in der die Zerrung in die Pressung übergeht, so dass also hier weder diese, noch jene stattfindet. Diese Schicht nennt man die neutrale Faserschicht des Balkens, welche somit letzteren in eine gepresste oder Druckseite E B C und in eine gezerzte oder Zugseite E A C theilt. —

Denken wir uns nun, unsere Fig. 3 Taf. XII. stelle nicht den ganzen Krahn, sondern nur den durch die Balkenaxe — welche in der Figur durch die strichpunktirte Linie E C angedeutet ist — gehenden Längsschnitt des Krahn's dar, so ist die ausgezogene Linie E C, in welcher die neutrale Faserschicht des Balkens den Längsschnitt schneidet, die neutrale Axe des Längsschnitts ¹⁾.

Balkenaxe und neutrale Axe fallen aber nur dann zusammen, wenn die Mittelkraft der ausserhalb eines Querschnitts wirkenden Kräfte diesen Querschnitt im Unendlichen schneidet, d. h. mit demselben parallel ist, wie z. B. in unsrer Figur zwischen C und N (cf. Culmann l. c. S. 178.) Schneidet hingegen diese Mittelkraft den Querschnitt, z. B. in der Entfernung a vom Schwerpunkte, so liegt die neutrale Faser auf der diesem Schnittpunkte entgegengesetzten Seite, und zwar ist ihre Entfernung i vom Schwerpunkte so gross, dass das Product a. i für einen und denselben Querschnitt constant ist.

Je näher nun ein Theilchen der Zerrungsseite des Balkens an der neutralen Schicht liegt, desto geringer wird in ihm die Spannung sein, welche der Zug bewirkt, und wir können demnach die Grösse der Zerrung oder Zugspannung in den einzelnen Elementen der Querschnittshälfte F H (Fig. 3) durch die Länge der gegen C hin gerichteten Pfeile ausdrücken. Aehnlich verhält es sich mit der Druckseite, auf welcher man ebenso durch die Länge der gegen A B hin gerichteten Pfeile die Grösse der Pressung oder Druckspannung für die einzelnen Elemente der Querschnittshälfte H G darstellen kann. Es können somit die Zerrungen durch die Lage der Linie L H zum Querschnitt, die Pressungen durch die der Linie H M zum Querschnitt ausgedrückt werden.

Wenn nach der bereits citirten Stelle (Culmann l. c. S. 178) die neutrale Axe e f z. B. für den Querschnitt A in Fig. 5 Taf. XII. bestimmt ist, so kann man nach der Formel $e = \frac{Q}{F} \left(1 + \frac{c}{1} \right)$ (cf. Culmann l. c. S. 216) die Grösse des

¹⁾ Diejenige Linie, in welcher die neutrale Faserschicht des Balkens sich mit einem Querschnitte schneidet, ist die neutrale Axe des Querschnitts. Dieselbe findet man z. B. in Fig. 1 a, 1 b, 1 c und in Fig. 5 Taf. XII. gezeichnet.

Drucks q auf die äusserste Faser des Querschnitts bei a bestimmen. In dieser Formel bezeichnet Q den Normaldruck auf den Querschnitt ¹⁾, F die Querschnittsfläche, c die Entfernung der äussersten Faser, und i die Entfernung der neutralen Axe von der durch den Schwerpunkt gehenden Balkenaxe. Trägt man den Druck $q = a b$ bei der äussersten Faser a auf, so gibt die gerade Verbindungslinie von b — dem Endpunkte von q — mit dem Schnittpunkte der neutralen Axen des Längs- und Querschnitts den Ort der Endpunkte aller q , d. i. aller Druckgrössen für Fasern in verschiedener Entfernung von der neutralen Axe ²⁾.

Zerrung und Pressung sind aber nicht die einzigen Wirkungen der äusseren Kraft D , welche den Balken belastet. An einem auf Biegungsfestigkeit beanspruchten Körper haben die Theilchen eines jeden Querschnitts das Streben, sich gegen die Theilchen des benachbarten Querschnitts, und die Theilchen jedes Längsschnitts das Streben, sich gegen die des benachbarten Längsschnitts zu verschieben. Die Kraft, mit der dies geschieht, nennt man die Schub- oder Scheerkraft, und es wird demnach in jedem Schnitte noch eine Spannung, die Schubspannung hervorgerufen, welche der Verschiebung zweier benachbarter Schnitte gegen einander Widerstand leistet.

Führt man in Fig. 5 Taf. XII. in der Entfernung $ag = \Delta x$ d. h. in unendlich kleiner Entfernung vom Querschnitt A einen zweiten Querschnitt B durch den Balken, so werden hier die auf die angegebene Weise construirten Druckgrössen q' im Allgemeinen von den Druckgrössen q des Querschnitts A verschieden und ihnen zugleich entgegengesetzt gerichtet sein; verschieden, weil überhaupt die Beanspruchung des Balkens von Querschnitt zu Querschnitt sich ändert; entgegengesetzt, weil in jedem Körper die zu beiden Seiten eines Quer- oder Längsschnitts wirkenden Kräfte ihre Richtungen ändern müssen, um überhaupt drücken, zerren oder abscheeren zu können (cf. Culmann l. c. S. 224). Wird daher ein Stück vom Balken durch einen Längsschnitt cd getrennt, so werden auf die Endflächen des abgeschnittenen Stückes verschiedene Kräfte wirken, und das Gleichgewicht nur durch eine im Längsschnitt wirkende scheerende Kraft σ hergestellt werden können, wie dies in der Figur angedeutet ist.

Die scheerende Kraft ist aber in der neutralen Axe am grössten, weil nemlich die so eben besprochene Differenz der Kräfte

- 1) Wenn die äussere Mittelkraft in zwei Kräfte zerlegt wird, von denen die eine in der Ebene des Schnittes und die andere senkrecht darauf wirkt, so ist die letztere Druckkomponente der Normaldruck.
- 2) Dasselbe geht auch schon aus Fig. 3 hervor, in welcher der Druck auf die äusserste Faser durch die Linie MG bezeichnet wird, und die Linie MH die Endpunkte aller q gibt.

bis zur neutralen Axe hin zunimmt ¹⁾). Wir können demnach z. B. in Fig. 3 Taf. XII. die Grösse der in den einzelnen Elementen des Querschnitts JK wirkenden Scheerkraft durch die in unserer Figur senkrecht auf den genannten Querschnitt gezeichneten Linien darstellen, und gewinnen so durch diese Linien die Curve JNK als Curve der scheerenden Kräfte ²⁾). Hierbei muss als besonders wichtig noch hervorgehoben werden, dass die scheerenden Kräfte in den Querschnitten pro Flächeneinheit genau eben so gross sind, wie im Längenschnitt an derselben Stelle (cf. Culmann I. c. S. 224 seq.).

Die hier erörterten Spannungen, die Zugspannung, die Druckspannung und die Schubspannung muss das Material des Krabns auszuhalten fähig sein, widrigenfalls — und zwar in dem Falle zu grosser Spannungen durch eine zu grosse äussere Last, oder, mit anderen Worten, wenn die Biegezugfestigkeit des Materials durch die äussere Kraft überwunden wird, — ein Zerreißen, Zerdrücken oder Abscheeren erfolgen muss.

Wir kennen also jetzt die Kräfte, die im Innern des Balkens an einem beliebigen Element wirken, wenn wir Querschnitte senkrecht zur Axe und Längenschnitte parallel mit derselben führen. In den Querschnitten bekommen wir nemlich einen Druck oder Zug, den wir mit ρ , und einen Schub, den wir mit σ bezeichnen; in den Längenschnitten dagegen existirt nur ein Schub σ .

Es ist nun weiter nothwendig zu untersuchen, was für Kräfte auftreten, wenn man schiefe Schnitte führt, die mit der Axe irgend einen beliebigen Winkel bilden.

Wenn man ein beliebiges prismatisches Element des Balkens a b c (Fig. 6 Taf. XII.) von unendlich kleiner, aber constanter Höhe

¹⁾ S. 219 seq. in Culmann's Werk sind diese scheerenden Kräfte construirt und berechnet.

²⁾ Um es sich anschaulicher zu machen, dass die scheerenden Kräfte am stärksten in der Nähe der neutralen Schicht sein müssen, denke man sich einen geraden Balken a b c d (Fig. 4 Taf. XII.), der bei a c befestigt und bei b belastet sei, genau in der neutralen Faserschicht (Fig. 4 B.) eingesägt, so wird in Folge der Einsägung die Schubspannung im Längsschnitt keinen Widerstand mehr finden, und die untere Balkenhälfte wird sich bei der gemeinsamen Biegung gegen die obere um das Stück e f verschieben. Das Stück e f wird aber offenbar, wie man aus Fig. 4 C und D ersieht, sehr viel kleiner ausfallen, wenn der Balken durch einen der oberen oder unteren Balkenfläche sehr nahen Längsschnitt in zwei sehr ungleiche Theile zersägt wird. — Ich verdanke diese Erläuterung Herrn Prof. Grossmann, Lehrer der graphischen Statik an der hiesigen Gewerbe-Akademie.

$a b = \Delta y$ und unendlich kleiner, aber variabler Basis $b c = \Delta x$ durch einen Querschnitt und einen Längenschnitt ausschneidet, so sind alle an den Katheten des Elements wirkenden Kräfte bekannt, und zwar wirkt auf die Kathete $a b$ die Scheerkraft σ und die Druckkraft ρ , auf die Kathete $b c$ nur die Scheerkraft $\sigma \frac{\Delta x}{\Delta y}$ ¹⁾. Diese bekannten Kräfte lassen sich nun zu einer einzigen Kraft zusammensetzen, und diese lässt sich wieder nach den Richtungen ρ' und σ' zerlegen, welche die gesuchte, auf die Hypothense des ganzen Elements wirkende Druckkraft ρ' und Scheerkraft σ' geben.

Auf S. 227 in Fig. 102 des Culmann'schen Werkes, ist diese Zerlegung nach den Richtungen ρ' und σ' dargestellt, und es wird daselbst zugleich gezeigt, dass ρ' und σ' pro Flächeneinheit, wenn die Seite $a c$ unserer Figur 6 verschiedene Richtungen annimmt, den Coordinaten eines Kreises proportional sind, dass demnach in 4 um 90° abstehenden Punkten Maxima von ρ' und σ' vorkommen, und dass für die Maxima von ρ' , $\sigma' = 0$ ist.

In Culmann's Fig. 103—106 sind nun zugleich die Richtungen angegeben, in denen diese Maxima vorkommen, und es wird in denselben gezeigt, dass die Richtungen, welche die Maxima von ρ geben, Peripheriewinkel über einem Durchmesser sind, die alle 90° messen, und dass ferner die Richtungen, welche die Maxima von σ geben, Winkel von 45° mit den ersteren bilden.

In den Fig. 103—106 S. 229 sind ferner die Grössen und die Lage der Kräfte für die vier Maximalpunkte besonders herausgezeichnet, und aus Fig. 104 und 106 geht weiter noch hervor, dass für die Schnitte, in welchen die Pressung und die Zerrung Maxima werden, die scheerenden Kräfte $= 0$ sind, dass also in den Richtungen der maximalen Zerrung und der maximalen Pressung keine scheerenden Kräfte vorkommen.

Wenn nun aber in einer gewissen Richtung keine scheerende Kraft wirkt, so können an der betreffenden Stelle die Fasern in dieser Richtung zerschnitten werden, ohne dass die Festigkeit des

¹⁾ Da, wie wir bereits wissen, die Scheerkraft im Längenschnitt pro Flächeneinheit gleich der im Querschnitt an derselben Stelle ist, so muss, wenn σ die Scheerkraft des Querschnitts ist, und $a b = \Delta y$ als Einheit genommen

wird, die Scheerkraft des Längenschnitts $= \sigma \frac{\Delta x}{\Delta y}$ sein.

Balkens darunter leidet. Diese Richtung ist nun freilich an jeder Stelle des Balkens eine andere. Würde man aber an jeder Stelle die Fasern wirklich durchschneiden, so bekäme man zwei Schaa- ren von Linien oder Fäden — die eine Schaar aus der Rich- tung der Maximalpressungen, die andere aus derjenigen der Maxi- malzerrungen —, zwischen welchen allen keine scheerende Kraft stattfindet. Diese zwei Linienschaaren, bestehend aus Stäben oder Pfosten und aus Bändern oder Zugbändern, könnten daher den massiven, vollen Balken ersetzen, wie unsere Fig. 7 — die Repro- duction von Culmann's Fig. 107 S. 236 — ~~es~~ zeigt. Und die Verbindungslinien dieser Richtungen, die Culmann ursprünglich die Spannungstrajectorien nannte, und die bald den kürzeren Namen Druck- und Zugcurven erhielten, sind es, um die es sich hier handelt, und in diesen Linien ist, wie wir zeigen werden, das obere Ende des menschlichen Oberschenkels aufgebaut.

Die Eigenschaften dieser Trajectorien sind aber, kurz zusam- mengefasst, folgende (cf. Culmann l. c. S. 230):

Es ist in diesen Curven der Druck oder Zug nicht constant, sondern nimmt von einem Ende bis zum anderen ab. Die Curven stehen da, wo sie die Minima der Maximaldruck- resp. Maximal- zugspannung andeuten, normal zur neutralen Axe und zu den End- fasern des Balkens. Dies ist der Fall an den Endpunkten der Curven, wo sie am meisten auseinandergefaltet sind.

Sie sind da, wo sie die Maxima der Zerrungen und Pressungen andeuten, parallel zur neutralen Axe und zu einander. Dies ist der Fall an den Anfangstheilen der Curven, nahe der Stelle der Einmauerung des Balkens, da, wo die Linien zugleich am dichtesten bei einander stehen.

Sie schneiden die neutrale Axe unter Winkeln von 45° , wäh- rend sie sich unter sich rechtwinklig schneiden.

Es finden endlich in ihnen keine scheerenden Kräfte statt.

Es ist nunmehr ersichtlich, dass wir aus den Druck- und Zug- curven die Grösse und die Art der Inanspruchnahme eines jeden Elements des belasteten Körpers herauslesen können. Oder da, wie wir gesehen, den Spannungen, welche die äussere Kraft ver- anlasst, durch die inneren Widerstände so lange das Gleichgewicht gehalten wird, als nicht die Biegungsfestigkeit des Materials durch

die äussere Kraft überwunden wird, so ersehen wir zugleich aus diesen Liniensystemen, in welchen Richtungen dem im Balken durch die Belastung bewirkten Druck und Zug der grösste Widerstand geleistet wird, und an welchen Stellen dieser Richtungen das Maximum, an welchen das Minimum dieses grössten Widerstandes vorhanden ist.

Diese letztere Eigenschaft der Zug- und Druckcurven führt uns, in Verbindung mit einer zweiten, uns ebenfalls bereits bekannten, zur practischen Bedeutung dieser Curven. Wir haben gesehen, dass in den Richtungen der letzteren keine scheerenden Kräfte vorkommen. Die Elemente des belasteten Körpers zu beiden Seiten derjenigen Flächen, deren Schneidungslinien oder Spuren im Längsschnitt die Zug- und Druckcurven sind, streben also nicht, an einander vorüber zu gleiten ¹⁾.

Können wir somit einen Körper wirklich aus einzelnen gebogenen Stäben und Bändern in den Zug- und Drucklinien aufbauen, so werden dadurch die scheerenden Kräfte beseitigt, und zugleich dem Zug und Druck der Last die grössten Widerstände geleistet. Ein solcher Körper wird demnach eine eben so grosse Belastung aushalten können, ohne zusammenzubrechen, als wäre er solide (cf. Culmann l. c. S. 237). Hierbei ist es klar, dass man ja theoretisch an einem Balken unzählig viele Druck- und Zuglinien neben einander construiren kann. Wie viele von diesen aber, bei einem Problem der practischen Ausführung derselben, in Wirklichkeit aufgebaut werden müssten, das würde offenbar abhängen einmal von der Grösse der Belastung, und zweitens von der Beschaffenheit des zu verwendenden Materials.

Es handelt sich bei den oben erörterten Sätzen nicht um blosser Theorien, sondern um Dinge, die bereits in der Praxis verwirklicht sind. Ich darf nicht unterlassen, hier zu erwähnen, dass der Pauly'sche Brückenträger, der beim Brückenbau der neuesten Zeit eine sehr grosse Rolle spielt, und der u. A. bei der in Mainz über den Rhein gehenden Eisenbahnbrücke in Anwen-

¹⁾ Wenn man, um dies anschaulich zu machen, den Balken in den Richtungen der Zug- und Drucklinien theilweise einsägte, so würde trotzdem, wie bereits oben bemerkt, die Last kein Abschieben der Sägeflächen gegen einander zu Wege bringen.

ung gebracht ist, auf der Theorie der Zug- und Drucklinien basirt ist.

Führt man nemlich von den Druck- und Zuglinien in unserer Fig. 7 Taf. XII. nur die beiden äussersten ce und c_1e practisch aus, fügt man ebenso nach der anderen Seite cf und c_1f hinzu, wie in unserer Fig. 8 Taf. XII., ersetzt man alle inneren Zug- und Drucklinien durch Fachwerk, und hängt man die Brücke an den Pfeilern in der neutralen Axe bei e und f auf, so hat man den Paulyschen Träger. Mit demselben erreicht man, „durch die zweckmässigste Form, welche alle Erschütterungen und Oscillationen an der Brücke möglichst vermeidet, den Materialaufwand und die Kosten der Brückenträger auf ein Minimum zu reduciren“ (cf. Culmann l. c. S. 398 u. 403).

Unsere Fig. 1 Taf. XII. zeigt nun die Construction der im Innern eines Krahn's wirkenden Kräfte und Trajectorien für einen gegebenen Fall, und zwar gerade für den uns hier interessirenden. Der Krahn hat die Umrisse des oberen Theils eines menschlichen Oberschenkels, bei dem nur der Trochanter major abgebrochen gedacht ist. Die schon von Hermann Meyer in seiner Arbeit über die Architectur der Spongiosa theilweise reproducirte Zeichnung wurde von Herrn Prof. Culmann, der die grosse Güte hatte, mir eine Pause des Originals zuzusenden, und mich dadurch in die glückliche Lage versetzte, meiner Arbeit eine directe Abbildung des Originals beizugeben zu können, ursprünglich in doppelter natürlicher Grösse ausgeführt und in dem Maassstabe, dass 0,3 Millimeter = 1 Kilogramm Kraft bedeutet. Ich habe nur die Figur wieder auf die natürliche Grösse reducirt, so dass also in unserer Fig. 1 Taf. XII. 0,15 Millimeter = 1 Kilogramm ist ¹⁾. — Es wurde von Culmann angenommen, dass zwischen A und B des Krahn's — der dem Acetabulum entsprechenden Stelle — eine gleichförmig vertheilte Belastung von 30 Kilogramm auf den Krahn wirke, wie es ja den natürlichen Verhältnissen am Oberschenkel ziemlich genau entspricht. — Bei

¹⁾ Die Reduction der Fig. 1, wie auch der folgenden Figuren 1 a, 1 b und 1 c habe ich, um sicher zu sein, dass meine Zeichnung vollkommen richtig ausfalle, zunächst auf photographischem Wege vornehmen, und nach der Photographie die vorliegenden lithographischen Bilder anfertigen lassen.

dieser Annahme ergab sich durch Berechnung, dass die Maximal-
 pressung für die Querschnitte I.—VIII. des Krahnns folgende ist:

Querschnitt I	=	163,3	Kilogramm.
- II	=	116,6	-
- III	=	100,0	-
- IV	=	71,6	-
- V	=	51,6	-
- VI	=	25,0	-
- VII	=	5,7	-
- VIII	=	3,0	-

Wir ersehen hieraus die ausserordentlich grosse Differenz zwischen dem Maximum der Maximaldruck- resp. Maximalzugspannung im Mittelstück des Knochens, an den flachen, dichtgedrängten und parallelen Anfangstheilen der Trajectorien, und zwischen dem Minimum derselben an ihren auseinandergefalteten Endtheilen, in der Nähe der Gelenkoberfläche, an welcher selbst sie gleich Null werden.

Die Figur zeigt uns nun die Lage der Balkenaxe (strichpunktirt) zur neutralen Axe (ausgezogen), sowie die Kreuzung der Trajectorien mit der neutralen Axe unter Winkeln von 45° und mit einander, wie auch mit den Endfasern des Balkens unter Winkeln von 90° ¹⁾.

Die Figuren 3a, 3b und 3c endlich zeigen uns, in nunmehr leicht verständlicher Weise, für die beispielsweise gewählten Querschnitte I, III und VI die Lage der neutralen Axe des Querschnitts (n. A.) und die des Schwerpunktes (S), ferner die Curve der scheerenden Kräfte (s. K.), wie auch die Grösse der Zerrungen (Z) und der Pressungen (P) für die einzelnen Punkte der senkrecht zur neutralen Axe stehenden und durch den Schwerpunkt gehenden Linie, also für alle Punkte in den verschiedenen Entfernungen von der neutralen Axe. Wir sehen, wie die Spannungen und Pressungen, am grössten in Querschnitt I, in den höheren Querschnitten immer kleiner werden, wie dagegen die scheerenden Kräfte, die im Querschnitt I ganz fehlen, weil dieser Querschnitt senkrecht zur

¹⁾ Wo die Winkel scheinbar keine Rechte sind, wie in dem Viereck rxyz, da sieht man sofort, dass dies thatsächlich dennoch der Fall ist, wenn man an irgend einem Kreuzungspunkte, wie ich es hier bei r gethan habe, die Tangenten an die betreffenden Curven legt. Man überzeugt sich dadurch leicht, dass, wenn die Curven so dicht und in eben so grosser Zahl in den Krahn hineingezeichnet wären, wie sich Bälkchen in der spongiösen Region des Knochens befinden, auch hier lauter Quadrate oder Rechtecke entstehen würden.

Mittelkraft der äusseren Last steht, in den höheren Querschnitten wachsen ¹⁾).

Auch die Querschnitte sind von Culmann genau nach den wirklichen Querschnitten des Knochens gezeichnet worden. Nur wurden auch diese wieder von Culmann um das Doppelte vergrössert, während sie in meiner Zeichnung wieder auf die natürliche Grösse reducirt sind.

Von grosser Wichtigkeit ist, dass die Querschnitte von Culmann ursprünglich voll angenommen, dass also die Trajectorien nicht etwa von vorn herein für einen innen hohlen Krahn, wie es der Knochen ist, gezeichnet wurden, sondern für einen soliden, und dass dennoch diese Annahme zu aussen liegenden Zug- und Drucklinien, also zu dem am Knochen in Wirklichkeit bestehenden in der Mitte hohlen Querschnitt führte.

Wir haben bisher nur die Kräftevertheilung für einen senkrecht zur neutralen Schicht geführten Längsschnitt des Knochens kennen gelernt. Es frägt sich nun noch, welche mathematischen Linien als Ausdruck der Kräftevertheilung in einen sagittal gerichteten und durch die Balkenaxe geführten Schnitt eines Oberschenkel förmigen Krahn hineingezeichnet werden müssten. Ein solcher Schnitt geht ja in seiner ganzen Länge und Breite durch die neutrale Faserschicht, d. h. er stellt die neutrale Schicht selbst dar. Ich fand zunächst meine Vermuthung, dass hier, in der von Zerrungen und Pressungen freibleibenden Schicht, am Knochen selbst nur senkrecht und parallel zur Axe gerichtete Bälkchen vorhanden sein würden, an den Präparaten bestätigt ²⁾, und legte nun Herrn Prof. Culmann die Frage vor, ob dies Verhalten mit der Theorie übereinstimme. Die Antwort war in der That die, dass die theoretischen Linien und demnach auch die Richtungslinien der Knochenbälkchen in der neutralen Faserschicht parallel und senkrecht zur Axe stehen müssen; die geringste Abweichung von der neutralen Schicht aber müsse aus stereometrischen (nicht aus statischen) Gründen ein Conver-

¹⁾ Das Wachsen findet nur bis zum Querschnitt VI statt. In den Querschnitten VII und VIII werden die scheerenden Kräfte wieder kleiner, weil hier nur ein Theil der äusseren Last abscheerend wirkt.

²⁾ Vgl. oben S. 399.

giren der Fasern zur Folge haben. Auch seien am Knochen sehr leicht Abweichungen von den construirten Zug- und Drucklinien möglich, weil die Knochen bald in dieser, bald in jener Richtung zu widerstehen haben, während alle Untersuchungen der Mathematiker von der Voraussetzung ausgehen, dass alle Kräfte in einer Ebene wirken — welche Voraussetzung überdies einen rechtwinkligen Querschnitt verlange. —

Kehren wir nunmehr zu unseren Knochenabbildungen Fig. 1 Taf. X. und Fig. 1 Taf. XI., so wie zu der schematischen Nachbildung des ersteren Präparats in Fig. 2 Taf. XII. zurück, und prüfen wir jetzt genauer die oben nur oberflächlich erwähnte Uebereinstimmung zwischen der Anordnung der Knochenbälkchen der Spongiosa und zwischen dem Verlauf der theoretischen Druck- und Zuglinien am knochenähnlichen Krahn in Fig. 1 Taf. XII. Die Uebereinstimmung ergibt sich uns alsbald als eine vollkommene¹⁾. Wir haben uns beim Knochen und beim Krahn von der Kreuzung je zweier entsprechender Bälkchen resp. Trajectorien in der Mittellinie, so wie von der rechtwinkligen Kreuzung sämtlicher Bälkchen und Trajectorien mit einander und mit der Oberfläche des belasteten Körpers überzeugt. Wir erkennen bei $c_1 d_1$ des Krahns die parallelen, dort in das Caput femoris aufsteigenden Bälkchen der Adductorensseite wieder, bei $b_1 c_1$ die fächerförmig divergenten in Collum und Trochanter aufsteigenden, bei $A_1 F_1$ die

¹⁾ Das in Fig. 1 Taf. XI. photographirte Präparat von einer 25jährigen Frau ist noch weit dünner und durchsichtiger, als das in Fig. 1 Taf. X. photographirte von einem 31jährigen Mann. Ersteres zeigt gewissermaassen wirklich nur eine einzige Längslage des spongiösen Gefüges oder vielmehr die dünnste in Continuität darstellbare Längslage desselben. Die Uebereinstimmung mit Culmann's Krahnzeichnung, vor Allem auch die Orthogonalität der Bälkchen, ist deinzufolge an diesem Präparate — dessen Bild man mit der Loupe betrachten möge — noch viel auffälliger und schöner, als in dem Präparate von Fig. 1 Taf. X. Ich würde es daher vorgezogen haben, ersteres Präparat, zur Erleichterung des Vergleichs mit der Krahnzeichnung auf die in natürlicher Grösse photographirte Tafel zu bringen, wenn nicht das andere Präparat dagegen wieder den Vorzug dargeboten hätte, die sehr wichtigen Verschiedenheiten in der Dichtigkeit der Spongiosa deutlicher zu zeigen, und überdies die nach unten geschweiften Balkennetze am unteren Ende des Präparats zu besitzen.

Endpunkte der dort von der Trochanterseite aus sich erhebenden Bälkchen u. s. w. Wir finden endlich den Krahn frei von Trajectorien an derjenigen Stelle, welche der Markhöhle des Knochens entspricht. Mit einem Worte, wir kommen zu dem bedeutungsvollen Schluss, dass am oberen Ende des menschlichen Oberschenkels ausschliesslich in den Richtungen der mathematischen Spannungstrajectorien Knochensubstanz vorhanden ist, dass demnach der Knochen in Druck- und Zuglinien aufgebaut ist¹⁾.

Aus der schematischen Skizze, welche Hermann Meyer seiner Arbeit beigegeben, war diese Uebereinstimmung nicht in ganz überzeugender Weise zu ersehen gewesen. So hatte Meyer z. B. zwischen den obersten und untersten Bälkchen der Adductorenseite eine Lücke gelassen, welche in Wirklichkeit nicht existirt, sondern vielmehr vollkommen im Sinne der Culmann'schen Curven durch die gerade aufwärts gegen den Sattel des Collum femoris steigenden Bälkchen der medialen Seite ausgefüllt ist. Vor Allem aber hat Meyer die Bälkchen der Adductoren- und die der Trochanterseite sich stellenweise unter spitzen Winkeln schneiden lassen.

Bei den ersten Belehrungen über die hier in Betracht kommenden Kapitel der graphischen Statik, welche Herr Stud. techn. Ed. Nikig mir ertheilte, erfuhr ich, dass die Spannungstrajectorien sich rechtwinklig schneiden müssen. Ich prüfte hierauf die Meyer'sche Skizze, an der ich die Orthogonalität nicht wiederfand. Da ich aber schon bei meinen ersten Untersuchungen des Oberschenkels eine noch viel grössere Uebereinstimmung der Bälkchen und Trajectorien constatirt hatte, als Meyer's Skizze sie ergab, so durfte ich annehmen, dass ich auch in Bezug auf diesen Punkt das Postulat der Mathematik an den Knochen erfüllt sehen würde. Und in

¹⁾ Ich erinnere daran, dass wir oben (S. 411) auch für die neutrale Faserschicht die Uebereinstimmung der Bälkchenrichtung mit den theoretischen Linien constatirt haben. — Auch habe ich noch die merkwürdige Uebereinstimmung der Balkennetze bei R (Fig. 2 Taf. XII.) mit den Druck- und Zuglinien am eingemauerten Theil des Blechkrahns in Taf. 11. des Culmann'schen Werkes zu erwähnen. Die Linien sind daselbst ebenso nach unten ausgeschweift, wie wir sie hier am unteren Ende unseres Präparats — und übrigens auch weiter unten am Oberschenkel bis gegen das Kniegelenk hin — vorfinden.

der That fand ich bald an allen meinen Präparaten die gesuchte Thatsache in der prägnantesten Weise bestätigt.

Das aber gerade war für mich von vorn herein das Imponirendste an den Verhältnissen der Knochenarchitectur, dass ich die rechten Winkel nicht zufällig und nicht zuerst an meinen Präparaten gefunden hatte, dass es sich vielmehr hier um eine mathematisch vorausbestimmte und nachträglich in Wirklichkeit bestätigt gefundene Thatsache gehandelt hat. Dadurch vor Allem wurde es mir klar, dass es sich bei dem vorliegenden Gegenstande um Sicherheiten handelt, wie wir deren unzweifelhaft nur höchst selten in den medicinischen Disciplinen werden aufzuweisen haben. Und in der That muss ja an den überall zu constatirenden rechtwinkligen Kreuzungen mehr, als an irgend einem anderen Umstande, jeder etwaige Versuch scheitern, die statische Bedeutung der inneren Architectur der Knochen zu bezweifeln. Und wir werden weiter unten sehen, dass ebenso auch mit an ihnen jeder Versuch scheitern muss, die letzten Trümmer der Juxtapositionstheorie für das Knochenwachsthum aufrecht erhalten zu wollen.

Fassen wir aber nunmehr das alles zusammen, und bringen es zur Nutzenanwendung, was die Erörterungen aus dem Gebiete der graphischen Statik und der Nachweis von dem Aufbau des Knochens in Druck- und Zugcurven uns gelehrt haben, so werden wir den Knochen fortan mit ganz anderen Augen betrachten, mit einem Blicke des Verständnisses, das uns eine Befriedigung ganz seltener und grosser Art gewähren muss. — Wir sehen zunächst, wie ich allem Anderen vorausschicken will, den mathematischen Beweis für die Thatsache geliefert, von der wir uns — in Uebereinstimmung mit Hermann Meyer — anatomisch bereits oben überzeugt haben, dass das compacte Gefüge eine zusammengedrückte Spongiosa darstellt. Denn indem wir die absolute Uebereinstimmung zwischen den Richtungen der Spannungstrajectorien und denen der architectonischen Elemente des Knochens kennen gelernt haben, so ergibt sich hieraus zugleich der unwiderlegliche Beweis, dass wir in der compacten Region des Knochens die Analoga der dichten und parallelen Anfangstheile der Trajectorien zu suchen haben, und

dass wir die einzelnen Schichten des compacten Gefüges als directe Fortsetzungen und Stützen entsprechender Bälkchen der Spongiosa betrachten müssen.

Es ist somit bewiesen, dass an dem architectonischen Aufbau des Knochens die sog. compacte Substanz eben so betheiligt ist, wie die spongiöse, und dies ist der Grund, weshalb ich meiner Arbeit nicht, wie Meyer, den Titel der „Architectur der Spongiosa“ gegeben habe, sondern den der inneren Architectur der Knochen. — Ebenso wird man, nach den obigen Erörterungen, begreifen, weshalb ich es in meiner Arbeit vermieden habe, mich der gewöhnlichen Bezeichnungen einer compacten und spongiösen „Substanz“ zu bedienen. Man kann wohl eine compacte und spongiöse Region des Knochens unterscheiden — oder eine „Compacta“ und „Spongiosa“ sc. regio —, ebenso ein compactes und spongiöses Gefüge. Aber die alte Unterscheidung zweier Substanzen im Knochen ist entschieden fortan unzulässig.

Weiterhin wissen wir jetzt, dass der Oberschenkel, wie der Krahn, durch die Körperlast auf seine Biegungsfestigkeit beansprucht wird, dass dadurch alle Theilchen der Trochanterseite auseinandergezerrt, alle Theilchen der Adductorenseite zusammengedrückt werden. Wir werden somit jene die Zugseite, diese die Druckseite des Oberschenkels nennen müssen.

Wir verstehen jetzt die Bedeutung der Bälkchen oder Plättchen der spongiösen Substanz. Die von der Adductorenseite ausgehenden sind Druckbälkchen oder Druckplättchen, in denen die scheerenden Kräfte aufgehoben sind, und welche zugleich der Druckwirkung der Körperlast auf die Adductorenseite den kräftigsten Widerstand entgegensetzen. Es wird ausschliesslich in den Richtungen dieser Bälkchen das obere Ende des Oberschenkels gedrückt, und wenn daher in diesen Richtungen keine oder nicht entsprechend starke Bälkchen vorhanden wären, so müsste der Druck zu einem Zerdrücken des Knochens führen. Die Bälkchen der Trochanterseite dagegen sind Zugbälkchen, in denen ebenfalls keine scheerenden Kräfte stören, und welche zugleich dem durch die Körperlast bedingten auf die Trochanterseite wirkenden Zug am besten zu widerstehen geeignet, welche demnach ein Auseinanderreißen des Knochens zu verhindern bestimmt sind.

Wir begreifen ferner nunmehr, warum der Röhrenknochen in seinem Mittelstück die grösste Stärke des compacten Gefüges hat und haben muss. Wir sahen am Krahn die Zug- und Drucklinien, je weiter ihre Entfernung von der Stelle der Belastung wird, um

so mehr parallel und nach der Oberfläche hin zusammenlaufen, und hier zugleich den Maximalwerth der Spannkkräfte repräsentiren. Ebenso drängen sich die Bälkchen der Spongiosa gegen das Mittelstück des Knochens hin zu compactem Gefüge zusammen, welches am festesten und dicksten sein muss im Mittelstück des Knochens, fern von der Stelle der Belastung, da, wo Zug und Druck der Körperlast ihren Maximalwerth haben, wo also der Knochen am meisten auszuhalten, und am meisten dem Zusammenbrechen zu widerstehen hat.

Und wenn wir uns der oben angeführten Zahlenwerthe für die Maximalpressungen und -zerrungen in den verschiedenen Querschnitten erinnern, die ja bei einer Belastung des Knochens mit 30 Kilogramm für einen Querschnitt aus dem Mittelstück des Knochens 163,3 Kilogramm ergaben, während wir gegen die Gelenkoberfläche hin eine successive Verkleinerung dieses Werthes bis auf 0 fanden, so wissen wir jetzt, weshalb, je näher zum Gelenk, desto schwächer das compacte Gefüge wird, und weshalb endlich, dicht am Gelenk selbst, der Knochen — ganz ohne compactes Gefüge — mit den auseinandergefalteten Bälkchen der Spongiosa seinen Zweck zur Genüge erfüllt.

Wir begreifen ebenso, warum der Knochen in der Mitte seine grosse Markhöhle hat. Man hat sich zwar immer schon eine dunkle Vorstellung davon machen können, dass die Markhöhle, ebenso wie das schwammige Gefüge der Knochenenden, die Bedeutung einer Materialersparniss habe, bei gleichzeitiger Erzielung eines so grossen Umfanges, wie ihn der Knochen für den Ansatz seiner reichlichen Musculatur braucht. Aber erst, nachdem wir von den Mathematikern gelernt haben, wo das Material nothwendig und wo es entbehrlich ist, nachdem uns, wie wir gesehen, Culmann gezeigt hat, dass auch in einem voll angenommenen Querschnitt aus der Diaphyse die construirten Trajectorien alle nach aussen zu liegen kommen, können wir einsehen, dass das Material nicht etwa an einer willkürlichen Stelle gespart ist, sondern an Stellen, wo es überflüssig sein, wo keine Inanspruchnahme desselben stattfinden würde.

Wir gewinnen schliesslich ein Verständniss für die Bälkchenrichtung in der neutralen Faserschicht des Knochens. Wir begreifen, dass hier die Bälkchen wenigstens im unteren Theil der oberen Spongiosa des Femur senkrecht und parallel zur Axe stehen müssen,

weil nur diese Anordnung den Ausdruck für die Indifferenz dieser weder gezerzten noch gedrückten Schicht geben kann. Wir können es uns endlich erklären, warum diese indifferente Faserrichtung nicht auch im obersten Theil derselben Spongiosa wiedergefunden wird. Denn es ist ja in diesem obersten Theil, woselbst der Kopf des Femur allseitig vom Acetabulum umfasst und auf Widerstand nach allen Richtungen hin eingerichtet ist, die Voraussetzung der Mathematiker, dass alle Kräfte in einer Ebene wirken, ganz und gar nicht mehr zutreffend ¹⁾).

Und somit kommen wir denn zu der Anschauung — die, wenn wir sie einmal gewonnen haben, uns als so natürlich und selbstverständlich erscheint —, dass die Art, in der der Knochen aufgebaut ist, die einzig mögliche Architectur desselben ist. Bei jeder anderen Anordnung würde ja der Oberschenkel, falls er nicht etwa ganz oder nahezu solide wäre, die Last des Körpers nicht tragen können. Die Anforderungen, die wir fortdauernd an diesen Knochen stellen, würden, ohne den zweckentsprechenden Widerstand der Zug- und Druckbälkchen, sofort zu einer Continuitätstrennung durch Zerreißen, Zerdrücken oder Abscheeren führen, also die Veranlassung zu einem Knochenbruche geben müssen.

Wir haben somit aus allem oben Erörterten ersehen, dass die Natur den Knochen aufgebaut hat, wie der Ingenieur seine Brücke, nemlich, um hier noch einmal Culmann's Worte anzuführen, so, dass „mit einem Minimum von Materialaufwand die zweckmässigste Form erreicht wird“. Nur hat die Natur unendlich viel vollendeter und grossartiger gebaut, als es der Ingenieur vermag. Wir haben gesehen, dass die Ungefügigkeit des Materials es dem Ingenieur beim Pauly'schen Brückenträger nur gestattete, zwei Zug- und Druckbalken wirklich auszuführen; die übrigen mussten durch Fachwerk ersetzt werden. Die Natur war mit ihrem auf das Vollkommenste gefügigen Material keiner Beschränkung in Bezug auf die Anzahl der in Wirklichkeit auszuführenden Zug- und Drucklinien unterworfen. Sie hat darum die Anzahl der Bälkchen einzig und allein von der Grösse der Belastung der Knochen abhängig gemacht, und

¹⁾ Hinsichtlich der hufeisenförmigen Anordnung im Querschnitt Fig. 6 Taf. XI. (vgl. oben S. 399) bemerkt mir Herr Prof. Culmann, dass sich dieselbe vielleicht aus der Form des Querschnitts erklärt; doch hofft er, auch noch einen statischen Grund für diese Anordnung zu finden.

deshalb z. B. bei den grossen Säugethieren — wie ich mich beim Rind davon überzeugt habe —, so viel mehr Bälkchen ausgeführt, als beim Menschen, dass bei jenen das spongiöse Gefüge an vielen Stellen fast die Dichtigkeit des compacten erlangt. Die Natur hat also mit dem Bau des Knochens, so zu sagen, ein mathematisches Problem gelöst, und eine wunderbare Bestätigung der Theorie der Zug- und Drucklinien gegeben. Es erklärt sich hieraus das grosse Interesse, welches an dem vorliegenden Gegenstande zugleich die Mathematiker haben müssen, und es mag mir gestattet sein, hier anzuführen, dass Prof. Culmann, dem die Wissenschaft so viel in dieser Frage verdankt, und ebenso Prof. Zeuner vom Züricher Polytechnicum, als denselben Herr Prof. Meyer eine ihm von mir eingesandte Probephotographie eines Fournierblattes vom Oberschenkel gezeigt hatte, an mich die Bitte um Zusendung mehrerer solcher Photographien richten liessen, „um dieselben für die Belehrung in der Theorie der Mechanik zu verwenden.“ — Noch einleuchtender wird die Bedeutung des vorliegenden Gegenstandes für die Mathematik aus folgenden Worten werden, die Herr Prof. Culmann am 27. December v. J. mir freundlichst geschrieben: „Bestätigt doch die Bildung der Spongiosa in den Knochen auf unwiderlegliche Weise die Theorie über die Vertheilung der Kräfte im Innern des Balkens. Und wenn diese richtig ist, so muss ja auch die des Fachwerks, des Gewölbes u. s. w. richtig sein, und wir dürfen, den alten verrosteten Practikern gegenüber, mit viel mehr Nachdruck auf die Resultate unserer Forschungen hinweisen.“

Und weil es mir von Wichtigkeit zu sein scheint, zu wissen, ob unsere Schlussfolgerungen vor dem Richterstuhl der Mathematik Bestand haben, und zu sehen, ob hier Mathematiker und Mediciner zu gleichem Endergebniss gelangen, so sei es mir gestattet, an dieser Stelle — mit ausdrücklicher freundlicher Erlaubniss des Herrn Prof. Culmann — noch folgende Worte anzuführen, die mir derselbe am 10. Januar d. J. schrieb, nachdem er den ihm eingesandten betreffenden Theil meines Manuscripts gelesen hatte: „Zu Ihren Schlussfolgerungen auf den Knochen habe ich nichts weiter zu bemerken, als dass mir dieselben wie aus der Seele gesprochen erscheinen, und dass es mich

ungemein freut, dass der Bau der Knochen sich als ein so musterhaft rationelles Kunstwerk herausstellt.“

Nachdem wir alles bisher Besprochene auf das obere Ende des Oberschenkels bezogen haben, erübrigt hier zunächst noch ein die Architectur der Knochen an anderen Körperstellen betreffendes Wort.

Es kann nach dem Nachweis, den wir für das Femur geliefert haben, von vorn herein nicht dem geringsten Zweifel unterliegen, dass es sich hier um ein allgemeines, für alle Körperstellen geltendes Gesetz handelt, dass überall die Knochen einen ihrer Inanspruchnahme entsprechenden architectonischen Aufbau besitzen, dass jede Art der Belastung, die der Knochen erfahren kann, ja schon jeder stärkere Muskelzug bei seiner Architectur, so zu sagen, in Anschlag gebracht ist. Die Beobachtung bestätigt dies in vollkommenster Weise.

So zeigt der menschliche Humerus, dessen statische Verhältnisse ja durchaus andere sind, als die des Femur, auch eine vollkommen von der des Femur verschiedene, übrigens an sich ebenfalls höchst interessante Architectur der Spongiosa, auf die ich indess an dieser Stelle nicht näher eingehen will. Dagegen zeigt der Humerus der vierfüßigen Thiere — wie ich mich vorläufig beim Reh und beim Rind davon überzeugt habe —, natürlich eine Anordnung, welche der an ihrem Femur sehr ähnlich ist.

Es ergibt sich ferner, dass, wenn wir die Inanspruchnahme und Belastungsstelle eines Knochens kennen, und namentlich aus der Betrachtung seiner äusseren Form festgestellt haben, ob der Knochen nur auf Druckfestigkeit, oder auch auf Biegungsfestigkeit beansprucht wird, wir hieraus schon vorher wissen können, welche Architectur wir in der spongiösen Substanz werden finden müssen. So vermuthete ich bei der Betrachtung des oberen Endes des Humerus vom Reh, dessen Form und Inanspruchnahme der des menschlichen Femur viel ähnlicher ist, als der Humerus des Rinds, dass dort die Architectur der am menschlichen Femur sehr ähnlich sein müsse. Beim Aufsägen des Knochens fand ich meine Vermuthung auf's Vollkommenste bestätigt.

Umgekehrt ergibt sich, dass wir aus der Betrachtung der Architectur der Spongiosa Schlüsse auf die Inanspruchnahme und Belastungsstelle des Knochens ziehen können. Wo wir Zug- und Druck-

linien sehen, muss es sich um eine Inanspruchnahme auf Biegungsfestigkeit handeln; wo sich die nach unten geschweiften und gekreuzten Liniensysteme finden, die wir am unteren Ende des Oberschenkels (Fig. 2 Taf. XII. bei R) kennen gelernt haben, da wissen wir — wie ich hier nur kurz erwähnen will —, dass wir das untere Ende eines langen, und an diesem unteren Ende auf einfachen Druck beanspruchten Knochens vor uns haben ¹⁾.

Es bleibt hier für die weitere Forschung ein grosses und sicherlich sehr lohnendes Feld. Freilich werden diese Verhältnisse kaum an einer anderen Körperstelle so leicht zu deuten sein, wie am Oberschenkel. Wenigstens ist bei den meisten übrigen Röhrenknochen die Inanspruchnahme derselben eine viel complicirtere, und demgemäss müssen wir auch ein viel mehr complicirtes und viel schwerer zu deutendes Durcheinandergehen verschiedener Bälkchensysteme an solchen Knochen vorfinden. Ich selbst behalte mir weitere Mittheilungen für die Zukunft vor, und verweise hier zunächst theils auf Meyer's schematische Abbildungen, theils begnüge ich mich mit einem Hinweis auf die meiner Arbeit noch beigegebenen Photographien vom oberen Ende der Tibia und vom Calcaneus.

Auf senkrechten, und zwar frontalen Schnitten mitten durch das obere Ende der Tibia — wie ein solcher in Fig. 8 Taf. XI. in halber natürlicher Grösse dargestellt ist — sieht man drei Systeme von Linien, die schichtweise von dem nach oben immer dünner werdenden compacten Gefüge abgegeben werden. Die äusserste Schicht des compacten Gefüges jeder Seite entfaltet sich in gerade nach oben aufsteigende parallele Bälkchen; die mittlere Schicht gibt Bälkchen ab, die sich von beiden Seiten her in der Epiphysengrenze oder bei ausgewachsenen Individuen in der Vernarbungslinie derselben begegnen, und, indem sie hier einen Kreuzungspunkt bilden, sich in die Epiphyse derart fortsetzen, dass die Bälkchen der medialen Seite gegen den Ansatzpunkt des Lig. cruciatum der lateralen Seite hin verlaufen, und umgekehrt. Die innerste Schicht des compacten Gefüges jeder Seite endlich löst sich in — etwas weniger deutliche — Balken auf, die in ziemlich hohen Bogen nach der je entgegengesetzten Seite hinüber laufen. Die Endstücke dieser letzteren Bälkchen bleiben unterhalb der Epiphysengrenze, und laufen schliesslich ziemlich parallel mit ihr. Bei Er-

¹⁾ Cf. oben S. 413 Anmerkung.

wachsenen gewinnt es dadurch den Anschein, dass der Narbenstrang, der hier aus der Knorpelfuge zwischen Dia- und Epiphyse entstanden ist, selbst zu dem System der letzterwähnten Bälkchen gehört.

An senkrechten, und zwar sagittalen Schnitten mitten durch den Calcaneus (Fig. 10 Taf. XI.) sieht man — im Allgemeinen entsprechend der Méyer'schen schematischen Abbildung — ein System langer Bälkchen, die von der Stelle des Astragalusgelenks und von der oberen Fläche des Knochens her nach hinten und unten in die Hacke verlaufen, und ein zweites System kürzerer Bälkchen, die in ähnlicher Weise von dem compacten Sattel am vorderen Ende des Astragalusgelenks aus sich ablättern, nach vorn und unten laufen, und fächerförmig ausgebreitet, am Würfelbeingelenk enden. Mit diesen beiden Systemen kreuzt sich ein drittes mehr horizontales, welches an einer kleinen Stelle der unteren Fläche des Calcaneus, nahe dessen vorderem Rande, zu compactem Gefüge verdichtet ist, und sich von hier fächerförmig nach vorn und oben gegen das Würfelbeingelenk hin, und nach hinten und oben gegen die Tuberositas Calcanei hin ausbreitet. Die Kreuzung der hinteren Ausbreitung mit dem erstgenannten vom Talusgelenk in die Hacke verlaufenden verticalen System geschieht auch hier unter rechten Winkeln, und die Architectur der Hacke stellt somit offenbar ebenfalls Druck- und Zugbalken dar, auf deren specielle Bedeutung ich hier nicht weiter eingehe. — Es existirt endlich ein viertes Bälkchensystem im Calcaneus, bestehend aus einer Reihe paralleler längs der hinteren Fläche des Fersenhöckers von oben nach unten verlaufender Bälkchen, die offenbar eine besondere Beziehung zur Wirkung des Tendo Achillis haben. Das Merkwürdigste am Calcaneus ist der Umstand, dass zwischen den drei erstbeschriebenen Bälkchensystemen, mitten in dem spongiösen Gefüge constant eine dreieckige Lücke bleibt, die der Markhöhle der langen Knochen entspricht, und aus der wir erschen, dass auch in den kurzen Knochen überall da keine Knochenbälkchen vorhanden sind, wo eine Inanspruchnahme des Materials nicht stattfinden würde.

Herr Stud. Nikig hat mir für einen dem Fersenbein ähnlich geformten Balken, bei dem ich ähnliche Belastung von vorn und oben her an der Stelle des Astragalusgelenks und gleichen Widerstand von unten her, und zwar einerseits am hinteren unteren Winkel, wo die Ferse den Fussboden berührt, und andererseits am

vorderen unteren Winkel, wo der Proc. ant. Calcanei zunächst durch das Würfelbein gestützt wird, die mathematischen Zug- und Drucklinien hineingezeichnet. Die Uebereinstimmung mit den oben beschriebenen Bälkchensystemen ist auch hier eine frappante, doch gehe ich darauf nicht weiter ein, weil für den Zweck der vorliegenden Arbeit mir das eine weitläufig explicirte und zugleich leichter verständliche Beispiel vom Oberschenkel zu genügen scheint.

Ich komme nunmehr zum zweiten Theile der vorliegenden Untersuchungen, zu den Folgerungen nemlich, welche sich aus der inneren Architectur der Knochen für die Frage vom Knochenwachsthum ergeben.

Bis zu den Zeiten Du Hamels ist die Frage, auf welche Weise der Knochen wachse, nicht Gegenstand der Discussion gewesen. Man hielt es für ganz selbstverständlich — was jetzt darzuthun, eines so grossen Aufwandes von Beweismitteln bedarf — dass der Knochen wachse, wie alle übrigen vascularisirten Gewebe, — durch Expansion und unter lebendigem Antheil aller seiner einzelnen Theilchen. Seitdem Du Hamel — vor 130 Jahren — seine experimentellen Untersuchungen über die Knochen veröffentlichte, hat sich, wenn auch nur zum geringsten Theil durch das Verschulden des genannten Forschers selbst, bekanntlich eine neue, überaus gekünstelte, in ihrer ganzen Ausdehnung erst von John Hunter und Flourens vertretene Anschauung vom Knochenwachsthum geltend gemacht, nach der eine beständige Auflagerung an den Enden und Oberflächen, und eine entsprechende beständige Resorption im Innern des Knochens stattfinden sollte.

Alles Knochengewebe sollte aus einer heterogenen Matrix entstehen, theils aus Periost, theils aus Knorpel. Nach Verknöcherung der ursprünglichen Knorpelanlage sollten somit bis zum Ende des Wachsthumes immer wieder massenhafte, neue Knorpelschichten an der Epiphysengrenze und ebenso massenhafte neue osteogene Periostschichten sich Neubilden, damit nur ja diese Matrix stets vorhanden bleibe.

Diese „alte, ehrwürdige Theorie,“ wie sie noch der jüngste Autor über das Knochenwachsthum meinen experimentellen Unter-

suchungen gegenüber nennt, hat man bis auf unsere Tage als ein unerschütterliches und unantastbares Dogma angesehen. Man hat ihr eine unglaublich wichtige Herrschaft in allen Anschauungen vom gesunden und kranken Knochen zugestanden. Man hat, ihr zu Liebe, fast überall den Knochen als eine vollkommen passive, geradezu starre und todte, so wie aller inneren Metamorphosen unfähige Masse angesehen, und die Wenigen, die, wie in neuester Zeit Virchow, Welcker, und vor Allen R. Volkmann, die Widersprüche erkannten, zu welchen die Annahme von der Passivität des Knochengewebes führte, haben den interstitiellen Vorgängen im Knochen auch nicht den geringsten Einfluss auf das gröbere Knochenwachsthum zugestehen zu dürfen geglaubt. — Ja, man ist so weit gegangen, anzunehmen, dass das Knochengewebe gar nicht erkranken könne, dass vielmehr auch unter pathologischen Verhältnissen alle Störungen auf Arrosionen an den Flächen oder auf Anlagerungen auf dieselben zurückzuführen seien. Und als meine experimentellen Untersuchungen die Unhaltbarkeit der Juxtappositionstheorie direct dargethan hatten und ich zu dem Resultat gekommen war, dass das Längenwachsthum zum sehr grossen Theil und das Dickenwachsthum fast ausschliesslich interstitiell geschehe, da häufte man noch von vielen Seiten auf mich den Vorwurf, ich sei zu weit gegangen und habe den Antheil der interstitiellen Vorgänge beim Knochenwachsthum viel zu hoch angeschlagen.

Jetzt ergibt es sich im Gegentheil, dass ich nicht weit genug gegangen bin, dass vielmehr alles Längen- und alles Dickenwachsthum, wie ich mit mathematischen Gründen im Folgenden beweisen zu können hoffe, ausschliesslich geschehe durch Intussusception.

Den letzten entschiedenen Schritt in dieser Frage zu thun, gilt es darum für mich in der vorliegenden Arbeit. Es gilt, an die noch übrigen, schon ohnedies wankend genug gewordenen Trümmer der „alten, ehrwürdigen“ Theorie die letzte Hand zu legen, und damit die Beseitigung der irrthümlichen Anschauungen anzubahnen, zu welchen die Consequenzen dieser Theorie geführt haben. Es gilt, dem Knochengewebe sein volles Recht, zu den lebendigen Geweben gerechnet zu werden, endlich nach allen Richtungen hin wiederzugeben. Es gilt, damit zugleich zu erweisen, wie unrichtig es war, denjenigen Wachsthumsvorgang, der den unvascularisirten,

empfindungs- und leblosen Epithelialgebilden eigen ist, einem so edel und vollkommen organisirten Gewebe, wie dem des Knochens zuschreiben zu wollen.

Ehe ich hierauf genauer eingehe, mag nur kurz angedeutet werden, dass in folgender Beziehung sich schon auf den ersten Blick aus unseren obigen Erörterungen über die innere Architectur der Knochen eine fast unüberwindbare Schwierigkeit für die Juxtapositionstheorie ergibt.

Wie man nehmlich dieser Theorie zu Liebe die Passivität des Knochengewebes annahm, so hat man auch ein Fundament und zugleich eine unumgängliche Consequenz jener Theorie in der Vorstellung einer vollkommenen statischen Gleichwerthigkeit aller einzelnen Partikelchen des Knochens zu haben geglaubt. Es sollte jedes Theilchen das andere ersetzen und an dessen Stelle wandern können. Was am Knochen aussen lag, sollte innen werden, was oben war, unten, und was unten war, oben werden können.

Nun haben wir aber im Obigen gesehen, dass von einer statischen Gleichwerthigkeit der verschiedenen Knochentheilchen gar keine Rede sein könne. Es ist vielmehr jede Schicht der compacten und jedes Bälkchen der spongiösen Region als eine Säule oder ein Bauelement anzusehen, das an dem Ort, an welchem es gerade liegt, einen ganz bestimmten statischen Zweck erfüllt, und darum an diesem Orte ganz unentbehrlich ist. Wie soll man sich nun vorstellen, dass diese so mannichfach gestalteten Bauelemente einer Wanderung fähig sein sollen, ohne dass das Gebäude dabei zusammenstürze? Wie soll ein von oben entnommenes Bauelement an einer Stelle unten passend werden können, und umgekehrt? Fürwahr, es werden mir Viele zugeben, dass die das Wandern der Bauelemente voraussetzende Appositionstheorie vermuthlich gar nicht erst entstanden wäre, wenn man zur Zeit ihrer Entstehung die mathematische Bedeutung der architectonischen Anordnung im Knochengewebe gekannt hätte.

Indess es kann mir nicht darauf ankommen, mich weiter auf die Darlegung von Unwahrscheinlichkeiten der Juxtapositionstheorie einzulassen, wo ich die Unmöglichkeit derselben beweisen kann.

Der Standpunkt, welchen Hermann Meyer in seiner Arbeit zur Knochenwachstumsfrage eingenommen hat, ergibt sich aus sei-

ner folgenden kurzen und einzigen Andeutung über diesen Gegenstand. „Es bietet sich,“ sagt er (Reichert's und du Bois-Reymond's Archiv 1867. S. 625) „eine wichtige Hauptfrage nach dem Nachweis, wie die statischen Verhältnisse, welche in dem Knochen zur Geltung kommen, im Stande sind, die Entstehung solcher Bildungen, wie die beschriebenen sind, zu veranlassen; — eine weitere, wichtige Frage ist die, wie die innere Metamorphose in dem Knochen vor sich geht, damit in jedem Wachstumsstadium (wie es, so weit ich bis jetzt sehen konnte, der Fall ist) jene Bildung möglichst diensttauglich vorhanden sei.“

Man ersieht, wie mir scheint, aus diesen Worten, dass der ausgezeichnete Mann, der zuerst Regel und Gesetz im inneren Aufbau der Knochen erkannte, wohl herausgeföhlt hat, wie Apposition und Resorption von den Oberflächen des wachsenden Knochens her unabwendbar den schönen Bau desselben in Unordnung bringen und demgemäss in Trümmer legen müssen. Aber er ist dennoch weit entfernt davon, die Juxtapositionstheorie, zu deren allereifrigsten Vertretern er ja bekanntlich in seinen früheren Arbeiten gehörte, aufzugeben. Vielmehr scheint er anzunehmen, dass die statischen Verhältnisse im Knochen immer wieder aufs Neue Ordnung in die Bauwürmer zu bringen vermögen, und dass somit durch physikalische Kräfte immer wieder dasjenige hergestellt wird, was durch die innere Metamorphose, welche die Theorie der Apposition und Resorption verlangt, niedergerissen worden ist.

Nun ist aber, wie wir sehen werden, die innere Architectur des Knochens in jedem Lebensalter vollkommen diensttauglich vorhanden — nicht, wie Meyer andeutete, „möglichst diensttauglich,“ — und man wird ohne Weiteres einsehen, dass eine vollkommene jederzeitige Diensttauglichkeit die Möglichkeit einer Unordnung im Bau oder des Vorhandenseins von Bauwürmern, sei es auch nur für Augenblicke, absolut ausschliessen muss. Denn in jedem Augenblicke muss ja der Knochen der höchstmöglichen Belastung gewärtig sein, und er würde sich bei Unordnungen im Bau offenbar kaum anders verhalten, als eine fehlerhaft construirte Brücke, bei der man sich etwa der Hoffnung hingeben wollte, dass das öftere Hinwegsauen des Eisenbahnzuges über dieselbe die Fehler der Construction ausgleichen könnte, anstatt die Brücke zu zerschmettern.

Ich habe oben für den Erwachsenen gezeigt, dass die Architectur, welche z. B. der Oberschenkel hat, die für seine Form, für seine Inanspruchnahme und für die Voraussetzung eines möglichst sparsamen Materialaufwandes einzig mögliche ist, falls er nicht unter der Last des Rumpfes zusammenbrechen soll. Ich habe den mathematischen Beweis hierfür zu führen gesucht, und ich habe zum grossen Theil gerade deswegen mich so weitläufig auf die mathematische Beweisführung eingelassen, um jetzt schon a priori darthun zu können, dass auch für den Nichterwachsenen, und zwar in jedem beliebigen Lebensalter genau dieselbe Architectur wieder die einzig mögliche ist. Der Oberschenkel hat ja auch beim jugendlichen Individuum den Rumpf zu tragen; er wird auch hier vermöge seines gebogenen oberen Endes auf seine Biegungsfestigkeit beansprucht; folglich ist die mathematische Vertheilung der Kräfte in ihm dieselbe, wie beim Erwachsenen; folglich muss es auch die innere Architectur sein, in der wir ja den Ausdruck dieser Kräftevertheilung kennen gelernt haben.

Die Beobachtung bestätigt das eben Gesagte auf das Vollkommenste, wie meine Untersuchungen über die Beschaffenheit der Architectur jugendlicher Knochen zeigen. Was das Ergebniss dieser Untersuchungen betrifft, so lasse ich die photographischen Abbildungen meiner Präparate selber sprechen.

Fig. 2 Taf. XI. ist in halber linearer Grösse die Photographie eines Fournierblattes, welches in frontaler Richtung aus der Mitte des Femur eines 20jährigen jungen Mannes herausgesägt ist. Alle Verhältnisse sind hier genau so, wie bei den beiden früher demonstirten Präparaten vom Erwachsenen; nur existirt an der Epiphysengrenze, sowohl im Gelenkkopf, wie auch am Trochanter, noch keine knöcherne Verbindung, so dass in kochendem Wasser an Präparaten, wie dem in Rede stehenden, der Trochanter und das obere Ende des Gelenkkopfes sich noch abtrennen. — Fig. 3 Taf. XI. stellt ein ähnliches Fournierblatt vom Femur eines 13jährigen Knaben, Fig. 4 ein solches von einem 7jährigen Mädchen dar. In beiden Präparaten zeigt sich die Ossification bis auf die Spitze des grossen Trochanter und bis auf die linienförmige Fuge zwischen dem Hauptstück des Knochens und seinen beiden oberen Ausstattücken vollendet. Die Breite dieser Fuge ist aber kaum eine bedeu-

tendere, als beim 20jährigen, dem Anscheine nach vollkommen ausgewachsenen Individuum.

Fig. 2 Taf. X. ferner ist ein frontales Fournierblatt vom Femur eines 3jährigen Mädchens in natürlicher Grösse. Hier ist im Trochanter nur erst ein kleiner Knochenkern vorhanden, während die Fuge zwischen Dia- und Epiphyse am Caput femoris noch eine gewisse Breite hat, und mit der Trochanterfuge eine einzige zusammenhängende Linie bildet.

Man sieht sofort, dass die innere Architectur des Knochens in allen diesen vier Präparaten genau dasselbe Bild gibt, wie in den Fig. 1 Taf. X. und Fig. 1 Taf. XI. abgebildeten Präparaten von erwachsenen Individuen. Vollkommen zweifellos erkennt man an jedem Präparate die Druck- und Zugbalken und ihre rechtwinkligen Kreuzungen. Genau an entsprechenden Stellen, wie beim Erwachsenen, sieht man die stärkere oder schwächere Entwicklung bald der Zug-, bald der Druckbalken. Ueberall findet man die auffällige Kreuzungsstelle wieder, welche dem Punkt α der Fig. 2 Taf. XII. entspricht, überall das dreifach verschiedene Bild der dicht unterhalb der Epiphysengrenze des Caput femoris liegenden Schicht der spongiösen Region. Mit einem Worte, die Beschreibung, welche wir oben für die Fig. 1 Taf. X und Fig. 1 Taf. XI. gegeben haben, könnte unverändert auch für jedes der Bilder 2—4 der Taf. XI. und 2 Taf. X. gelten. Ja auch noch in den Figuren 3 und 4 Taf. X., welche frontale Femurlängsschnitte vom 1½jährigen Kinde resp. vom Neugeborenen darstellen, und auf die wir später noch einmal zurückkommen, ist die gleiche Anordnung, soweit eben hier die Ossification vollendet ist, zu erkennen.

Wie beim Femur, so bietet aber natürlich auch an allen anderen Körperstellen die Architectur der Knochen jugendlicher und erwachsener Individuen dasselbe Bild dar. Ein Blick auf Fig. 5 Taf. X., welche in natürlicher Grösse ein sagittales Fournierblatt des Calcaneus eines 5jährigen Mädchens, und auf Fig. 9 Taf. XI., welche in halber Grösse ein frontales Fournierblatt aus dem oberen Ende der Tibia desselben Mädchens darstellt, und ein Vergleich derselben mit den entsprechenden Bildern vom Erwachsenen in Fig. 8 und 10 Taf. XI. wird genügen, dies ohne Weiteres zu beweisen. Besonders interessant ist die Lücke mitten in dem spongiösen Gefüge des Calcaneus, wie auch die Balkenkreuzung in

der Mitte der Epiphysengrenze der Tibia, die wir in Fig. 5 Taf. X. resp. 9 Taf. XI. wiederfinden.

Es ist hiernach klar, dass wenn man ein Präparat von einem jüngeren Individuum vergrössert photographiren liesse, und zwar genau in der Grösse des Bildes eines von einem älteren Individuum entnommenen Präparates, beide Abbildungen unter Umständen zum Verwechseln ähnlich werden müssen. Kurz, es ergibt sich aus allem eben Gesagten, dass die innere Architectur der Knochen in allen Lebensaltern ein geometrisch ähnliches Bild darbietet.

Dass diese geometrische Aehnlichkeit zwischen den verschiedenen Präparaten immer eine vollkommene sei, ist keineswegs ein mathematisches Postulat. Wie wir gesehen, ist es nur erforderlich, dass die Balkchen der oberen Spongiosa des Femur stets die Richtung von Spannungstrajectorien haben. Aus den uns bekannt gewordenen Eigenschaften dieser Trajectorien aber ergibt es sich von selbst, dass letztere, ebenso wie z. B. Ellipsen, zwar geometrisch ähnliche Figuren sein können, es aber keineswegs immer sein müssen. Jede geringste Veränderung der Balkenform, oder bei gleichbleibender Form jede geringste Aenderung in der Belastung bedingt ja eine entsprechende Aenderung in der Richtung der Trajectorien, durch welche, unbeschadet aller ihrer sonstigen nothwendigen Eigenschaften, ihre vollkommene geometrische Aehnlichkeit aufgehoben werden muss.

Daher kann am Oberschenkel die innere Architectur bei zwei Individuen, und überdies in verschiedenen Altersstufen, nur dann vollkommen ähnlich sein, wenn die äussere Form beider Oberschenkel bis in's kleinste Detail ähnlich, und die Belastung bei beiden eine auf's Haar entsprechende ist — was ja natürlich nicht immer der Fall sein wird.

Auch behält sich, wie ich mich überzeugt habe, und wie es zum Theil unsere Photographien schon zeigen, die Natur hier, wie überall innerhalb der strengen Grenzen ihrer Gesetze noch einen gewissen Spielraum für individuelle Varietäten vor. Diese Varietäten können sich auf die Stärke der Balkchen, bis zu einem gewissen Grade auch auf die Zahl derselben und auf die der viereckigen Hohlräume, endlich auch auf das Längenverhältniss zwischen der compacten und spongiosen Region beziehen, und es lassen sich für dieselben eben keine statischen Gründe aufstellen, sondern nur hereditäre oder constitutionelle.

Wie dem allem aber auch sein mag, so ist es doch sicher, dass bei einem und demselben Individuum in der Regel die äussere Form des Oberschenkels beim Wachsen sich vollkommen ähnlich bleibt, und dass die Last des Rumpfes sich genau proportional zur Vergrösserung des Oberschenkels erhöht. Hiernach muss es offenbar die Norm sein, dass die geometrische Aehnlichkeit der inneren Architectur der Knochen eines und desselben Individuums beim Wachsen eine vollkommene bleibt. Man wird mir, glaube ich, diesen Satz als erwiesen zugeben, wenn ich auch vorläufig nicht in der Lage bin, zwei verschiedenen Altersstufen entsprechende Präparate gleichnamiger Knochen eines und desselben Menschen neben einander zu zeigen, und wenn es

auch immer noch eine schwierige Aufgabe sein würde, selbst in diesem Falle die noch so zweifellose vollkommene geometrische Aehnlichkeit an den Präparaten selbst, so wie an ideal gezeichneten Figuren, mit Formeln, Zahlen und Messungen zu beweisen.

Aus der geometrischen Aehnlichkeit der Knochenarchitectur in den verschiedenen Altersstufen ergibt sich aber Folgendes: Die Vergrößerung eines so complicirten Gebildes, wie es der architectonische Bau der Knochen darstellt, kann mit Erhaltung der geometrischen Aehnlichkeit nur so geschehen, dass jedes einzige Partikelchen des ganzen Gebildes in genau proportionaler Weise an der Vergrößerung des Ganzen Antheil nimmt. Dagegen müsste offenbar die geometrische Aehnlichkeit sofort gestört werden, wenn die Vergrößerung durch Hinzufügung neuer Theilchen an den Oberflächen, bei vollkommener oder theilweiser Inactivität der bereits fertigen Partikelchen vor sich ginge, wenn demnach die oberflächlichen Theilchen einer späteren Wachstumsperiode angehörten, als die tieferen.

Die Natur kann hier eben nicht anders verfahren, als der Mathematiker oder der Künstler, dem die Aufgabe einer genau ähnlichen Vergrößerung irgend eines Gebildes gestellt wird. Der Zeichner z. B., der eine unserer Oberschenkelphotographien vergrößert wiedergeben sollte, könnte dies nur durch genau proportionales Vergrößern jedes einzelnen Striches des Originals erreichen. Der Photograph stellt nur darum ähnliche Bilder her, weil sein Apparat ebenfalls jedes Theilchen des Objects gleichmässig vergrößert oder verkleinert. Der Bildhauer benutzt zum Copiren im vergrößerten oder verkleinerten Maassstabe die auf dem Princip des „Storchschnabels“ begründete Collas'sche Maschine, durch welche jeder einzelne Strich des Griffels am Original in genau gleichem Verhältnisse an dem Griffel für die Copie vergrößert oder verkleinert wird. Genau dasselbe leistet dem Geometer sein Stangenzirkel.

Aber wenn auch selbst einem scrupulösen Raisonement der obige Nachweis der Erhaltung der geometrischen Aehnlichkeit nicht genügen sollte, und wenn wirklich einmal die geometrische Aehnlichkeit beim Wachsen dadurch gestört würde, dass die Last des Rumpfes sich in einem anderen Verhältniss vergrößert, als der Oberschenkel ¹⁾, so kommen wir dennoch auch noch auf anderem

¹⁾ Ich habe hier noch zu bemerken, dass möglicherweise die geometrische Aehnlichkeit nicht für alle Stellen zweier entsprechenden Knochen aus verschie-

Wege zu demselben Schluss. Denn es folgt allein schon aus der Natur der Spannungstrajectorien, dass bei Aenderung der Form oder der Belastung die der Aenderung entsprechenden Trajectorien aus den ursprünglichen Trajectorien nur entstehen können durch eine stetige, gleichzeitige und ausschliesslich der veränderten Form und Belastung entsprechende Richtungsänderung jedes kleinsten Theilchens, nie aber durch Zwischenlagerung in einer bestimmten Linie, oder durch Auflagerung an einer Fläche. Daher kommt es, dass alle Mathematiker, denen ich unsere beiden Knochenwachsthumstheorien klar gemacht habe, und die ja sicherlich die Sache vollkommen nüchtern beurtheilten, mir jeden Einwand gegen das ausschliesslich interstitielle Wachstum aus mathematischen Gründen für völlig unhaltbar erklärt haben. Es scheint mir hierbei besonders bemerkenswerth, dass kein einziger von diesen Mathematikern sich etwa für incompetent erklärt hat, in dieser medicinischen Frage sein Urtheil abzugeben.

Indem sich somit aus der geometrischen Aehnlichkeit oder selbst, wenn diese unvollkommen ist, aus dem Aufbau der Knochen in der Richtung von Spannungstrajectorien die unbedingte Unmöglichkeit des Appositionswachsens ergibt, würde mit dem bisher Gesagten meine Aufgabe eigentlich bereits vollkommen erfüllt sein.

Indess ich glaube, dass viele meiner Fachgenossen einen solchen vorzugsweise auf mathematischer Reflexion beruhenden Nachweis doch nicht für allein ausreichend halten, sondern noch directere Nachweise an den Präparaten oder durch das Experiment verlangen werden. Ich bin aber in der Lage, auch dieser Anforderung zu genügen, und zwar durch die Beweisführung, die ich bereits in meiner vorläufigen Mittheilung (Centralblatt 1869. No. 54) angedeu-

denen Altersstufen in genau gleichen Proportionen vorhanden ist. Denn wir wissen ja, dass z. B. die Röhrenknochen in der Mitte ihrer Diaphyse ein trägeres Wachstum haben, als gegen die Gelenkflächen hin, und hiernach ist es möglich, dass überhaupt die Lebhaftigkeit des Wachstums genau der Entfernung von der Gelenkoberfläche entspricht, also auch innerhalb der spongiösen Region in mehrfach verschiedenen Proportionen vorhanden ist — ein Umstand, auf den wir später noch einmal zurückkommen werden. — Für unsere Argumentation würde dieser Umstand ohne Belang sein. Denn die Aehnlichkeit in den kleinsten Theilen und selbst in den einzelnen Zonen bleibt ja dadurch unangetastet.

tet habe. Für diese Beweisführung ist es nothwendig, zunächst das Längen- und Dickenwachsthum der Röhrenknochen gesondert zu betrachten.

Was das Dickenwachsthum betrifft, so bemerke ich zunächst historisch, dass meine früheren Untersuchungen bereits mit vollster Evidenz die Annahme einer Resorption an der Markhöhlenfläche der Röhrenknochen widerlegt haben. (Berl. klin. Wochenschrift 1868. No. 6 seq.)

Ich zeigte u. A., dass ein in die Markhöhle eines jungen Thieres geschobener Draht an der Markhöhlenfläche des Knochens so fest anhaftend werden kann, dass er sich nur gewaltsam von dieser Fläche abreißen lässt. Dies wäre, wenn hier eine beständige Resorption stattfände, vollkommen unmöglich.

Dasselbe Experiment ferner, mit welchem in erster Reihe Flourens für die Appositionstheorie eintreten wollte, das alte Du Hamel'sche Experiment mit einem um den Knochen gelegten festen Ringe, hat es mir möglich gemacht, den vollständigen Irrthum, in welchem Flourens sich befunden, nachzuweisen. Ich habe gezeigt, dass der wachsende Knochen an der Stelle, wo der Ring liegt, eingebogen wird. Ich habe an mikroskopischen Schnitten nachgewiesen, dass die Haversischen Kanälchen sämmtlich die Einbiegung mitmachen, welche der Knochen makroskopisch erkennen lässt, dass also die den Markkanal verengende eingebogene Stelle nicht etwa eine nachträgliche Neubildung, sondern der alte Knochen selbst ist. Indem also der Ring ein Mittel wird, diejenigen Knochenpartien, welche zur Zeit der Vornahme des Experiments schon vorhanden waren, als solche erkennbar zu erhalten, und von später gebildeten Knochentheilchen unterscheidbar zu machen, zeigt das Experiment zugleich, dass eben nichts von dem, was zur Zeit der Umlegung des Ringes nach innen vom Ringe lag, resorbirt wurde, dass es vielmehr als mechanisch eingeengte Knochenpartie erhalten geblieben ist, wenn auch inzwischen der Knochen um das Doppelte seiner Länge oder noch mehr gewachsen war. — Ein neuerdings vorgenommener, demnächst in meinen experimentellen Untersuchungen über das Knochenwachsthum zu veröffentlichender Versuch hat ein ähnliches Resultat für das Schädelwachsthum ergeben. Ich legte bei einem jungen Hunde subcutan — in einer

hier nicht genauer zu erörternden Weise — einen zu einem festen Ringe zusammengeschnürten Silberdraht um den Schädel, und zwar zwischen Palatum durum und Ossa bregmatis. $2\frac{1}{2}$ Monate später, nachdem inzwischen das Thier erheblich gewachsen war, wurde dasselbe getödtet. Der Draht ist an einzelnen Stellen bis in die Hirnhöhle gedrungen; aber dies ist erst geschehen, nachdem er das Schädeldach in der ganzen Länge seines eigenen Verlaufs gegen das Hirn hin eingebogen hat. Diese Einbiegung beweist aber auch hier, dass die vielfach angenommene Resorption an der Tabula vitrea durchaus nicht stattfindet. Denn wäre eine solche vorhanden, so hätte eben der Ring ungehindert und ohne Einbiegung des Knochens in die Hirnhöhle wandern müssen.

Wenn ich somit früher nachgewiesen habe, dass es eine Flächenresorption beim Wachsthum nicht gibt, so bin ich jetzt im Stande, zu zeigen, dass es eine solche auch nicht geben kann und darf. Man betrachte Fig. 2 Taf. XII. Man nehme an, sie sei das Bild eines noch im Wachsthum begriffenen Femur, und denke sich das compacte Gefüge des Oberschenkels, wie in der Figur angedeutet, in vier Längsregionen rs, st, tu, uv unterschieden. Wir wissen aus dem Früheren, dass die Schicht rs die Stütze und Fortsetzung der jetzt nur noch in excentrischen Schnitten theilweise vorhandenen, im Centrum aber untergegangenen und durch den Markhöhlenraum ersetzten fötalen Balkennetze R ist, dass die Schicht st die Grundlage und Fortsetzung der von a b und AB ausgehenden Balken der Spongiosa darstellt; desgleichen tu für die Balken bc und BC, uv für die Balken ce und CE. Würde nun zunächst die innerste Schicht rs beim Wachsthum resorbirt, so müssten die Balkennetze R unwiederbringlich zu Grunde gehen, und man könnte eben keine Reste derselben in excentrischen Schnitten finden. Würde nun gar auch noch die nächste Schicht st z. B. an der Druckseite resorbirt, so müssten damit die zu dieser Schicht gehörenden von a b entspringenden Druckbalken der Spongiosa ihre Stütze verlieren. Ohne Stütze bleiben und somit frei in der Markhöhle schweben können diese Balken aber nicht; denn dies würde unfehlbar zu einem Zusammenbruch des ganzen Baues führen. Sie müssen also entweder zugleich mit der compacten Schicht st, zu welcher sie gehören, resorbirt und durch neue Balken ersetzt werden, oder sie müssten statt ihrer Stütze st eine neue Stütze erhalten.

Im ersteren Falle, wenn sie also etwa resorbirt werden sollten, so müssten die zwischen b und c und später die zwischen c und e entspringenden Druckbalken nach unten rücken, um die resorbirten Balken zu ersetzen. Dabei müssten sich die herabrückenden Balken zugleich nach unten biegen. Denn behielten sie ihre nach aufwärts strebende Gestalt, so würden sie, unten angelangt, nicht die für die untersten Balken erforderliche Richtung nach der Zugseite hinüber haben können. Nun ist aber dieses Biegen nach unten eine volle Unmöglichkeit. Denn es müssten dabei die langen Druckbalken des Caput femoris im Collum sich verkürzen und im Anfangstheil der Diaphysis femoris wieder sich verlängern, was ernstlich wohl Niemand als wahrscheinlich wird erachten wollen. Was aber noch viel schlagender ist, es müssten bei einer Biegung und Wanderung der obersten Druck-, und ebenso der obersten Zugbalken nach unten in den Balkenkreuzungen offenbar alle möglichen Winkelstellungen zwischen 0 und 180° entstehen, während wir ja doch thatsächlich die Orthogonalität in jedem Lebensalter erhalten finden.

Oder aber zweitens, die Druckbalken a b und die Zugbalken A B werden nicht gleichzeitig mit der compacten Schicht s t, zu welcher sie gehören, resorbirt, so müssten sie, statt ihrer untergegangenen Stütze s t eine neue Stütze in der nach innen rückenden Schicht t u erhalten. Diese Schicht ist aber, wie wir mathematisch und anatomisch nachgewiesen haben, die an ihrer Stelle vollkommen unentbehrliche Stütze und Fortsetzung der Druckbalken b e, und es erscheint fast müssig, erst noch zu zeigen, dass diese Stütze nicht an einer beliebigen Stelle von ihren Balken abbrechen kann, um nachher die Stütze einer anderen Balkengruppe zu werden ¹⁾.

Nachdem wir somit gesehen haben, dass jede Annahme einer Resorption an der Markhöhlenfläche der Röhrenknochen zu absurden Consequenzen führt, kommen wir zur Frage von der Apposition neuer Knochenlagen vom Periost her. Ich habe früher, theils eben daraus, dass innen nichts resorbirt wird, theils aus anderweitigen

¹⁾ Wenn es, wie man voraussetzen darf, gelingt, die Zusammensetzung der sog. compacten Substanz aus den Bälkchen der spongiösen mikroskopisch in noch weit ausgedehnterem Maasse nachzuweisen, als makroskopisch, so muss auch der Nachweis gelingen, dass die Continuität eines jeden Bälkchens mit seiner Verlängerung innerhalb der Compacta nirgends eine Einbusse erleidet, also kein Abbrechen und Verschieben der erwähnten Art erfolgen kann.

directen Experimenten, und zwar namentlich solchen mit Krappfütterung und mit Metallplättchen, die ich unter das Periost schob, gefolgert, dass eine Auflagerung vom Periost, wenn sie beim normalen Wachsthum überhaupt vorkomme, quantitativ nur äusserst gering und kaum in Betracht kommend sein könne. Auch in Bezug auf diesen Punkt kann ich jetzt nachweisen, dass es sich so verhalten müsse, wie meine Experimente gezeigt haben.

Wie bereits erörtert, ist in jedem Lebensalter die äusserste Schicht des compacten Gefüges *u v* (Fig. 2 Taf. XII.) Fortsetzung der äussersten Druckbalken *ee* und der äussersten Zugbalken *C E*. Letztere müssen beständig die äussersten bleiben, weil sie ohne Verletzung der Orthogonalität nicht nach innen wandern können. Würde nun nach aussen von der Schicht *u v* neue Knochensubstanz aufgelagert, so könnte dieselbe, da alle Balken der Spongiosa schon mit einer Stütze in der Compacta versehen sind, keinen zugehörigen Balken der Spongiosa bekommen. Sie wäre also statisch werthlos und somit überflüssig, und es würde eine Inanspruchnahme derselben auf Zug- und Druckspannung nicht stattfinden.

Vielleicht ist — das lässt sich wenigstens, wie ich glaube, nicht ganz leugnen — im Mittelstück der Diaphyse bei *v* eine solche ganz dünne, vom Periost gebildete, statisch überflüssige Knochenlage vorhanden, die selbst keine directe Druck- und Zugspannung erleidet, sondern höchstens indirect dadurch gespannt wird, dass sie mit gedrückten und gezerzten Knochenheilchen in Continuität steht, die aber, gleich der vorhin erwähnten innersten Markhöhlenschicht *rs* den Knochen da, wo er dem Maximum der Spannkraft ausgesetzt ist, verdickt, und somit an der gefährdetsten Stelle den Schutz des Knochens einigermaassen vermehrt. Selbstverständlich aber kann eine solche, ja nicht einmal nachweislich vorhandene, Auflagerung vom Periost während der ganzen Dauer des Lebens nur quantitativ äusserst gering werden. Denn jedes nennenswerthe Quantum einer Periostauflagerung müsste, da sie eben nicht nach innen rücken kann, den Knochen in unzumuthbarer Weise verdicken und verunstalten. Es ist daher auch die ganze Frage, ob ein Minimum von Periostauflagerung stattfinden kann, oder gar keine solche stattfindet, eine durchaus unerhebliche.

Man hat mir vielfach eingewendet, die reichliche periostale Ossification bei der Callusbildung und die bedeutende osteogenetische

Kraft des transplantierten Periosts, wie sie sich bei Ollier's und meinen eigenen Untersuchungen ergeben hat, mache die Unthätigkeit des Periosts beim normalen Knochenwachsthum sehr unwahrscheinlich. Darauf erwidere ich, dass ein derartiger Schluss von der pathologischen Ossification auf die normalen Knochenwachsthumverhältnisse nicht zulässig ist. Dies zeigt sich am deutlichsten aus Präparaten über die Callusbildung, die ich besitze, und deren ich hier nur kurz erwähnen will. Ich habe bei Fracturen des Radius an Thieren, deren Knochen vor Erzeugung der Fractur durch Krappfütterung rothgefärbt waren, eine scharfe Sonderung und überall deutliche Unterscheidbarkeit des Periostcallus vom Markcallus erzielt. Hierbei ergibt sich, dass der letztere quantitativ bedeutender sein kann, als der Periostcallus. Wie wir nun hieraus nicht etwa schliessen dürfen, dass das Mark beim Wachsthum Knochen bilde — da dies ja zu einer Obliteration der Markhöhle führen müsste —, so dürfen wir offenbar auch für das Periost aus seinem Verhalten im gereizten und transplantierten Zustande keine Normen für sein Verhalten beim Wachsthum herleiten wollen. — Zu genau gleichen Schlussfolgerungen führen die von Goujon und die von Baikow ganz neuerdings mitgetheilten Versuche, bei denen eine Ossification transplantierte Marksubstanz beobachtet wurde.

In Bezug auf das Längenwachsthum der Röhrenknochen habe ich zunächst voranzuschicken, dass ich auf der Dresdner Naturforscherversammlung der Section für Anatomie und Physiologie bereits zwei Präparate von Knochen gezeigt habe, an denen das Längenwachsthum ohne Betheiligung einer Apposition vom Epiphysenknorpel vor sich gegangen war. In dem einen Präparate hatte ein zwischen Mitte der Tibia eines Kaninchens einerseits und unterer Epiphyse desselben Knochens andererseits befestigter Draht keine grössere Krümmung des wachsenden Knochens hervorgerufen, als in einem ganz analogen Falle ein Draht, der die Mitte der Diaphyse und einen dem Epiphysenknorpel sehr nahen Punkt derselben Diaphyse fest mit einander verbunden hatte. — Bei dem zweiten Präparate hatte ich drei Drahtstiftchen im unteren Ende der Tibia eines jungen Kaninchens befestigt, das eine in der Epiphyse, das zweite 3 Mm. vom ersten entfernt in der Diaphyse, das dritte 3 Mm. weiterhin in derselben Diaphyse. Nach 13 Tagen betrug die Entfer-

nung des zweiten Stifchens vom dritten $5\frac{1}{2}$ Mm. und die des zweiten vom ersten ebenfalls nur $5\frac{1}{2}$ Mm. Ich erwähnte damals, dass ich wahrscheinlich häufiger ähnliche Resultate aufzuweisen gehabt haben würde, wenn es mir öfter gelungen wäre, in dem weichen Gewebe nahe der Epiphysengrenze junger Thiere die Stifchchen, die an dieser Stelle gar zu leicht aus ihren Bohrlöchern wieder herausfallen, genügend zu befestigen. Jedenfalls widerspreche aber kein Resultat aller meiner anderen Versuche dem, was aus dem letzten Präparate mit positiver Sicherheit zu schliessen sein würde, dass nemlich an der Epiphysengrenze eine Apposition von Knochengewebe nicht stattfindet. In den letztvergangenen Monaten habe ich ähnliche Experimente an grösseren Säugethieren, und zwar an Lämmern, so wie an Hunden von sehr grosser Race wiederholt, auf's Neue mit dem an einer anderen Stelle genauer mitzutheilenden Ergebniss, dass alles Wachstum nahe der Epiphysengrenze durch die besonders lebhaft Expansion im Bereich der spongiösen Knochenregion geschehe, ohne Theilnahme einer Apposition vom Knorpel her.

Auch in Bezug auf das Längenwachsthum bin ich nun aber jetzt auf Grund meiner Untersuchungen über die innere Architectur der Knochen wiederum in der Lage, zu zeigen, dass unmöglich irgend ein über diesen Gegenstand anzustellendes Experiment ein anderes, als das eben erwähnte Resultat — dass nemlich keine Apposition an den Enden der Diaphyse stattfindet —, geben könne und dürfe. — Wir kehren zu unserer Fig. 2 Taf. XII. zurück, die wiederum das Bild eines noch wachsenden Femur darstellen mag. — So lange man annahm, dass die Spongiosa ein beliebig wirres Netzwerk unregelmässiger und statisch vollkommen gleichwerthiger Bälkchen sei, da hinderte allerdings nichts die Annahme, dass diejenigen Theilchen der Spongiosa, die heute dicht unterhalb der Epiphysengrenze im Caput femoris liegen, in einem späteren Wachsthumstadium weiter nach unten in das Collum, dass sie später in den Anfangstheil der Diaphyse, und schliesslich an die Grenze zwischen Spongiosa und Markhöhle gelangen, um hier der Resorption anheimzufallen.

Wir wissen aber jetzt, dass jede Stelle des Caput, jede Stelle des Collum und des Anfangstheils des Schaftes vom Oberschenkel ein ganz bestimmtes und an jeder betreffenden Stelle mit Nothwendigkeit in seiner bestimmten Form vorhandenes architectonisches

Bild darbietet. Wir können uns daher jetzt mit der grössten Leichtigkeit durch directen Augenschein von der Richtigkeit oder Unrichtigkeit jener Annahme eines nach unten Wanderns der oberen Lagen der Spongiosa überzeugen.

Wenn jetzt Jemand behaupten will, dass die dicht unterhalb der Epiphysengrenze im Caput femoris liegende Schicht der Spongiosa eines jugendlichen Individuums, die, wie wir aus Fig. 2 Taf. XII. ersehen, jenes dreifach verschiedene oben genau beschriebene Bild darbietet, beim Wachsen nach unten rücke, so können wir ihm an Präparaten nächst älterer und erwachsener Individuen direct zeigen, dass dies nicht der Fall ist, dass vielmehr diese durch ihre dreifache Verschiedenheit stets ganz unverkennbare Schicht in jedem Lebensalter dicht unter der Epiphysengrenze bleibt. Wir können ihm beweisen, und mit einer Sicherheit, die jeder allerstrengsten mathematischen Anforderung genügt, dass dies Verbleiben der erwähnten Schicht an ihrer Stelle auch nicht ein Minimum einer Apposition an der Epiphysengrenze zulassen kann. Wir können ihm endlich zeigen, dass im Collum femoris ja auch gar kein Platz für etwa von oben herunterrückende Knochenlagen vorhanden sein würde. Denn das Collum hat ja selbst wieder seine ihm eigenthümliche, durch alle Lebensalter unabänderliche und unveräusserliche Architectur, die sich nicht nach unten drängen lassen kann.

Das kleine lockere, unregelmässige Viereck $e d_2 \gamma$ an der Adductorensseite ist besonders geeignet, das Gesagte zu erhärten. Wir finden es an jedem Präparate aus beliebiger Altersstufe stets in gleicher Lage und Form, stets direct unterhalb der Epiphysengrenze, so dass der unterste Theil der letzteren $d_2 \gamma$ die eine Seite des Vierecks bildet, stets von einer Grösse, die in gleicher Proportion zur Grösse des ganzen Präparats steht, kurz in allen Präparaten einander im Wesentlichen ebenso geometrisch ähnlich, wie die ganzen Präparate selbst. Nehmen wir an, es werde an der Epiphysengrenze Knochen aufgelagert, so müssten wir entweder, — wenn nemlich die direct oberhalb des Vierecks aufgelagerte Knochen-substanz ein anderes Gefüge zeigte, als es im Viereck selbst vorhanden ist — das Viereck später im Collum oder im Anfangstheil des Schaftes wiederfinden; oder aber, — wenn die Auflagerung im Sinne des Gefüges dieses Vierecks geschieht — so müsste das Viereck bei gleichbleibender oder wenig veränderter Höhe beständig

in die Breite wachsen, und somit seine Form vollkommen ändern. Es ist aber weder das eine, noch das andere der Fall.

Ebenso lässt sich für die langen von $c d$ aus entspringenden Druckbalken, die sich über die Epiphysengrenze hinaus, gerade so, als wäre diese gar nicht vorhanden, in das Caput femoris gegen das Acetabulum hin fortsetzen, zeigen, dass dieselben bei einer etwaigen Auflagerung von Knochengewebe im Bereich des Theils $c_2 d_2$ der Epiphysengrenze ganz unverhältnissmässig in die Länge wachsen müssten, während ein gleicher Wachstumsgrund für die in's Collum gehenden, die Epiphysengrenze nicht kreuzenden Druckbalken $b c$ nicht vorhanden wäre. Da aber die Druckbalken $b c$ zu den Druckbalken $c d$ stets proportionale Länge behalten, so ist eine Zwischenlagerung in der Linie $c_2 d_2$ vollkommen unmöglich.

Am allerschlagendsten ist der Beweis, der sich für den Punkt α unserer Figur, welcher die Spitze des Dreiecks $\alpha c G$ bildet, führen lässt. Dieser durch eine besonders scharf markirte Kreuzung der von c ausgehenden Druckbalken mit den von C ausgehenden Zugbalken gekennzeichnete Punkt liegt, wie wir gesehen, stets da, wo die Linie $\delta \varepsilon$, welche entsteht, wenn wir uns das Caput femoris zu einem Kreise ergänzt denken, die neutrale Faserschicht des Femur schneidet. Da sie also in der Peripherie des gedachten Kreises liegt, so wächst ihre Entfernung von der Gelenkoberfläche proportional dem Radius des Gelenkkopfs, während sie doch natürlich schnell in eine relativ viel weitere Entfernung von der Gelenkoberfläche gelangen müsste, wenn eine Apposition bei $\beta \gamma$ stattfände.

Noch viel grösser muss offenbar die Verlegenheit der Anhänger der Appositionstheorie werden, wenn man annimmt, dass auch in der Fuge $\mathcal{J} \eta$ zwischen Trochanter major und Schaft des Femur Knochensubstanz apponirt werden soll. — Aber, wenn wir auch ganz von einer Apposition an dieser Stelle absehen, so müsste schon in blosser Consequenz einer Apposition in der Linie $\beta \gamma$ der Trochanter major entweder sich in ganz unverhältnissmässiger Weise vom Caput femoris entfernen, — was ja nicht der Fall ist —; oder er müsste sich, um seine thatsächlich stets proportional bleibende Entfernung vom Caput zu behalten, an der für ihn besonders vorhandenen Knorpelgrenze $\mathcal{J} \eta$ beständig gegen die in der Gegend von b entspringenden Druckbalken nach oben schieben. Diese Druck-

balken setzen sich ja aber über die Linie $\mathcal{S}\eta$ hinaus direct in den Trochanter fort, wodurch eine Verschiebung in der Linie $\mathcal{S}\eta$ als unmöglich erscheinen muss. —

Es ist klar, dass sich noch für viele andere Punkte unseres Bildes ein gleicher Beweis liefern lassen würde; doch scheint mir durch das bisher Gesagte die volle Unmöglichkeit einer Knochenapposition in den Fugen zwischen Mittel- und Endstücken der Röhrenknochen bereits endgültig und fast zum Ueberfluss bewiesen.

Den bisherigen Erörterungen gegenüber kann der etwaige Einwand, dass in den Epiphysenlinien frühzeitig eine knöcherne Verschmelzung eintreten müsste, wenn sie nicht einen Heerd für anzugewandte Knochensubstanz darstellten, weder zulässig noch stichhaltig erscheinen. Das lange Weichbleiben der Knochen in den Epiphysenlinien ist nichts, als eine Jugendeigenthümlichkeit der Knochen, wie es deren noch viele andere gibt, und hat keine andere Bedeutung, als z. B. das lange Weichbleiben der obersten Spitze des Trochanter major, wie wir dasselbe in unseren Abbildungen noch bis zum 14. Lebensjahr hinauf verfolgen können. — Ueberdies lässt sich denjenigen, die durchaus teleologisch die Frage stellen wollen, wozu denn die Epiphysenfugen anders dienen sollen, als zur Production jener ungeheuren Massen von Knorpelgewebe, welches die Matrix für alle die Verlängerung des Knochens bewirkende Knochensubstanz sein soll, noch Folgendes erwidern: Einmal ist es durchaus nicht bewiesen, ja auch gar nicht möglich zu beweisen, dass — wie man bisher annahm — das Ende des Wachsthums genau mit der Verknöcherung der knorpligen Fugen zusammenfällt. So scheint mir das Präparat von dem 20jährigen Manne (Fig. 2 Taf. XI.) eher zu beweisen, dass das Ende des Wachsthums der vollständigen Verknöcherung vorausgeht. — Alsdann verknöchern einzelne Theile der Epiphysenlinien schon im jugendlichen Alter. So stellt, wie unsere Abbildungen zeigen, die Epiphysengrenze des Caput und Trochanter femoris ursprünglich eine einzige zusammenhängende Linie dar, die sich schon vom 4. Lebensjahr ab durch Verknöcherung ihres Mittelstücks trennt und zugleich immer mehr verkleinert. — Endlich — und dies ist das Wichtigste — findet, wie ich an Präparaten von einem 13jährigen Individuum zeigen kann, zuweilen schon in diesem Lebensalter ein dendritisches Ineinandergreifen der Dia- und Epiphysengrenze statt, welches, wie von selbst ersichtlich

ist, ein Auseinanderweichen durch einzulagernde Knochenschichten völlig unmöglich macht.

Es bleibt nur noch übrig, anzudeuten, dass unsere Beweisführung nicht etwa bloss für den Oberschenkel, sondern auch ebenso für jede andere Körperstelle gilt. Betrachten wir z. B. den frontalen Durchschnitt des oberen Endes des Unterschenkels, so ist auch hier die innerste die Markhöhle begränzende Längslage des compacten Gefüges jeder Seite Stütze und Fortsetzung der untersten Balken der Spongiosa, welche ihre Richtung nach der entgegengesetzten Seite hinüber nehmen. Eine Resorption jener Lage der Compacta müsste auch hier eine Wanderung der zu ihr gehörenden Balken der Spongiosa bewirken, und eine solche ist ohne Zerstörung der geometrischen Aehnlichkeit undenkbar. Ebenso müsste bei einer Apposition an der Epiphysengrenze die Balkenkreuzung, die wir in der Mitte dieser Grenzlinie finden, vernichtet werden. Denn die Spitze der unteren Hälfte des Kreuzes müsste beim Wachsen nach unten rücken, und sich von der Spitze der oberen, in der Epiphyse liegenden Hälfte immer weiter entfernen. Dagegen müssten zwei seitliche neue Kreuzungsstellen entstehen, da, wo die aufsteigenden Balken der einen Seite sich mit den gekreuzten Balken der entgegengesetzten Seite begegnen.

Von ganz besonderem Interesse ist noch ein Blick auf die Wachstumsverhältnisse des Calcaneus. — Die Anhänger der Appositionstheorie haben bisher immer geschwiegen, wenn die Rede auf die kurzen Knochen kommen sollte. Bei diesen fehlte ja die sogenannte Ossificationslinie, an der die Auflagerung, und die Markhöhle, an der die Flächenresorption hätte stattfinden können. Das Loch inmitten des spongiösen Gefüges des Calcaneus, das man sicherlich schleunigst als einen glücklichen Fund für eine Resorptionswerkstätte in Anspruch genommen haben würde, war gar nicht bekannt, sondern ist erst von H. Meyer entdeckt worden. — Wenn daher wohlweislich die Anhänger der Appositionstheorie die Wachstumsfrage der kurzen Knochen unerörtert gelassen haben, so wird es für uns, nach allem bisher Gesagten, keiner weitläufigen Erörterung bedürfen, dass der Calcaneus des Erwachsenen aus dem des Kindes unmöglich anders entstehen kann, als durch Expansion und unter einer dem Ganzen proportionalen Theilnahme jedes einzelnen

Knochenbälkchens. Ein blosser Hinweis auf unsere photographischen Abbildungen des jugendlichen und erwachsenen Calcaneus wird genügen, um zu zeigen, dass hier jeder andere Wachsthumsvorgang undenkbar ist.

Wir sind bei dem Resultate angelangt, dass alles Wachstum am Knochen interstitiell geschieht. Wir sehen die Anschauung des alten Clopton Havers sich wieder herstellen, nach dessen Darstellung bereits das Wachsen in die Breite und in die Länge sich vollzog an jedem einzelnen der Partikelchen, aus welchen er die „Filamente“ des Knochens zusammengesetzt sein liess (cf. Cl. Haversii Novae observat. de ossibus. Lugd. Bat. 1734. 8. p. 161 u. 163). Wir kehren zu der so einfachen, so natürlichen, ja fast selbstverständlichen Auffassung zurück, für die Albrecht v. Haller mit der ganzen Macht seines Wortes, wenn auch freilich mit Beweismitteln, die nach dem heutigen Standpunkt der Wissenschaft überall als ungenügend erscheinen, eingetreten ist, zu der länger als ein Jahrhundert durch eine folgenschwere entgegenstehende Theorie verdrängt gewesenen Anschauung, dass der Knochen wachse, wie alle anderen vascularisirten Gewebe — ausschliesslich durch Intussusception und unter lebendig bleibendem Antheil aller schon fertigen Theilchen.

Es knüpft sich an das Resultat, zu dem wir gekommen sind, zunächst die Frage, wie wir uns die genaueren Vorgänge beim interstitiellen Wachsthum vorzustellen haben. Diese Frage bleibt zum allergrössten Theil der mikroskopischen Forschung überlassen, welche demnach ein hohes Interesse für sich in Anspruch nehmen muss. Aber man darf nicht vergessen, dass das Endergebniss, dass nemlich alles Knochenwachsthum interstitiell geschehe, der mikroskopischen Untersuchung vorgeschrieben ist, dass dem Mikroskop nicht mehr die Frage nach dem Ja oder Nein, sondern nur die nach dem Wie des interstitiellen Wachsthum obliegt, und dass jedes etwaige Ergebniss der mikroskopischen Forschung für die Apposition gegen mathematische Wahrheiten verstossen würde.

Nachdem ich im Jahre 1868 gesagt hatte, „dass aus meinen

Experimenten noch bestimmter, als aus den Arbeiten von Volkmann und Uffelmann, welche makroskopische Erfolge des interstitiellen Wachstums nicht annahmen, das Postulat für die mikroskopische Forschung sich ergebe, den Modus, wie die Expansion fertigen Knochengewebes vor sich geht, festzustellen,“ hat neuerdings C. Ruge den — zuerst von R. Volkmann betretenen — Weg der mikroskopischen Forschung als den auch für die Frage nach der Existenz des interstitiellen Wachstums „am sichersten zum Ziele führenden“ bezeichnet. (Vgl. dieses Archiv Bd. XLIX.)

Ich halte es nicht für ganz unmöglich, dass es vielleicht in Zukunft gelingen werde, auch allein auf mikroskopischem Wege den Nachweis des interstitiellen und des ausschliesslich interstitiellen Wachstums zu führen. Was aber Ruge's bisherige Untersuchungen betrifft, so haben sie, wie ich glaube, zur Lösung der Frage selbst, ob das Wachstum durch Intussusception oder Juxtapposition geschehe, nichts beigetragen. Wenn Ruge gezeigt hat, dass die Abstände der Knochenkörperchen beim Wachsen grösser werden, die Intercellularsubstanz also sich vermehrt, so widerspricht diese an sich verdienstliche Beobachtung doch keineswegs der Juxtappositionstheorie. Die Anhänger der letzteren haben ja gar nicht direct bestritten, dass das mikroskopische Verhalten der Knochen älterer Individuen ein anderes sein könne, als das jüngerer, um so weniger, als zufolge der Integralerneuerung, die nach dieser Theorie stattfand, in jeder höheren Altersstufe der Knochen der je jüngeren Altersstufe in allen seinen Theilen untergegangen sein sollte. Der an Stelle des untergegangenen tretende vom Periost und an der sogenannten Ossificationsgrenze gebildete vollkommen neue Knochen, mit dem man es zu thun zu haben glaubte, konnte ja aber sehr wohl, ganz unbeschadet der alten Theorie, weitere Abstände der Knochenkörperchen darbieten, als sie dem untergegangenen Knochen eigen waren. Zum allermindesten hätte doch Ruge, wenn er auf dem von ihm eingeschlagenen Wege etwas für die Existenz oder Nichtexistenz des interstitiellen Wachstums beweisen wollte, vergleichende Messungen der Abstände der Knochenkörperchen zwischen den dem Periost und den dem Mark näher liegenden Schichten einer und derselben Knochenwand anstellen müssen. — Mir scheinen übrigens auch alle die Schlüsse, welche Ruge bei und aus seinem einem Experiment mit einem Hunde gezogen hat, dem er die Tibia

amputirt hatte, äusserst gewagt, und das Endresultat, dass in jenem Falle nach Verlauf von 39 Tagen etwa die Hälfte des Dickenwachstums des Femur der gesunden Seite periostal, die Hälfte intercellular geschehen sei, ist somit ganz unerwiesen, und überdies ja auch nach allen unseren hier vorliegenden Erörterungen jedenfalls ganz irrhümlich.

Wie nun aber auch die Resultate der weiteren voraussichtlich sehr ergiebigen mikroskopischen Forschung ausfallen mögen, so lässt sich bezüglich der genaueren Vorgänge beim Wachstum wenigstens Folgendes jetzt schon sagen.

Wir haben den Knochen als ein Gebilde kennen gelernt, das aus vielen einzelnen, im Mittelstück zusammengedrängten, an den Enden dagegen auseinander gefalteten Elementen besteht, welche auf Fournierschnitten als Balken oder Säulen erscheinen, in Wirklichkeit aber an den Enden vielfach durchbrochene dach- oder kegelförmige, im Mittelstück mehr continuirliche cylindrische Platten sind. Eine jede dieser Platten ist wie wir gesehen haben, unveräusserlich, und, wenn keine pathologischen Störungen eintreten, persistent durch die ganze Lebensdauer. Hiernach kann das mathematische Architecturbild nur erhalten bleiben, wenn jede einzelne Säule resp. Platte in jedem höheren Lebensalter entsprechend breiter, dicker und länger wird, wenn also das Wachsen sich vollzieht an jeder einzelnen Säule oder Platte, und gewissermaassen an jede einzelne gebunden bleibt.

Ich zweifle nicht, dass auch noch die mikroskopische Untersuchung Anhaltspunkte für die Richtigkeit einer solchen Auffassung geben wird. Jedenfalls bietet sie uns ein ausserordentlich klares und ungezwungenes Bild vom Wachstumsvorgang.

Wenn wir uns die cylindrischen Platten des compacten Gefüges des Mittelstücks in Wirklichkeit aus den einzelnen Säulen zusammengesetzt denken, in denen sie sich auf Fournierblättern darstellen, so muss, sobald jede einzelne Säule dicker und breiter wird, der Durchmesser der später aus dicken und breiten Säulen zusammengesetzten Platten natürlich ein grösserer sein, als der Durchmesser der aus schmalen und dünnen Säulen zusammengesetzten Platten. Letztere werden also weiter, und es erklärt sich so auf das Natürlichste die Vergrösserung der Markhöhle.

Auf das Interessanteste gibt uns die Vorstellung, dass das

Wachsthum sich an jeder einzelnen architectonischen Platte vollzieht, zugleich eine Erklärung für das trägere Längenwachsthum der Röhrenknochen im Mittelstück ihrer Diaphyse. Diese Wachsthumsträgheit, welche sonderbarer Weise zu der so verbreiteten und bedeutungsvoll gewordenen, und erst durch meine Versuche widerlegten Vorstellung geführt hat, dass es sich statt einer Trägheit um eine Unthätigkeit handle, und dass diese Unthätigkeit sogar sich auf den ganzen Knochen erstreckt, ist für das Mittelstück der Diaphyse auch durch mich experimentell festgestellt worden. Betrachtet man die Linien am Culmann'schen Krahn, so findet man, dass hiernach die Trägheit des Längenwachsthums da stattfindet, wo die Linien am wenigsten complicirt sind, wo sie einfach neben einander parallel laufen, an der einzigen Stelle also, an welcher weder die Verlängerung, noch die Verkürzung der Linien eine wesentliche Veränderung des architectonischen Bildes, zu welchem sie gehören, bewirken würde. — Es scheint mir aber dieses interessante Factum geeignet, die mathematische Auffassung, welche wir vom Verhalten des Knochengewebes überhaupt gewonnen haben, noch mehr zu befestigen, auf's Neue eine Bestätigung dafür zu geben, dass in der That die sog. Substantia compacta eine zusammengedrückte Spongiosa ist, und zu zeigen, dass alle Erscheinungen an den Knochen, vermuthlich also auch die pathologischen, die Probe auf unsere mathematische Untersuchung aushalten müssen.

Eine zweite Frage, die sich an das von uns erlangte Resultat anknüpft, betrifft die allgemeine Lehre vom Stoffwechsel. Indem wir aus dem Vorangegangenen die Persistenz und Unveränderlichkeit jedes einzelnen Plättchens der Spongiosa und Compacta durch alle Wachsthumstadien kennen gelernt haben, ergibt sich hieraus eine bereits in einer früheren Arbeit (Berl. klin. Wochenschrift 1868. No. 9) von mir angedeutete, wichtige Folgerung. Nach der Juxtapositionstheorie nahm man die beständige sog. Integralerneuerung der Knochen an. Es sollte nicht bloss ein Stoffwechsel der Säfte in den Knochen stattfinden, sondern das ganze Gewebe sollte fortwährend schichtweise beim Wachsen untergehen, um durch neues ersetzt zu werden. Dies hat zu Vermuthungen geführt, dass ebenso vielleicht auch an allen anderen Geweben eine Integralerneuerung stattfindet. So gipfelt das berühmte, und doch in jedem einzigen Satze

angreifbare Werk von Flourens über die Knochen in den Worten: „La matière n'est, selon l'heureuse expression de G. Cuvier, que dépositaire des forces de la vie. La matière actuelle, la matière qui est à présent, ne les a qu'en dépôt; elle les a reçues de la matière qui l'a précédée et ne les a reçues que pour les rendre à la matière qui la remplacera bientôt. Ainsi donc, la matière passe et les forces restent. La loi, la grande loi qui fixe le rapport des forces avec la matière, dans les corps vivants, est donc, d'une part, la permanence des forces et de l'autre la mutation de la matière.“ (Théorie expérimentale de la formation des os p. 130. Paris 1847). In demselben Sinne spricht sich Valentin aus: „Es lässt sich mit Recht vermuthen, dass dieser bei den Schichtgebilden unaufhörliche Umwandlungsprozess allgemeiner sein dürfte, und dass er nur bei den anderen Geweben ihrer Natur und Localität entsprechende Abweichungen darbieten werde.“ — Und an einer anderen Stelle: „Die ganze Masse des Thiers oder des Menschen wird so, da diese Metamorphose wahrscheinlich alle Organtheile betrifft, in einem längeren oder kürzeren Zeitraum eine andere,“ (Wagner, Handwörterbuch der Physiologie Art.: Ernährung). — Ich will hier eben nur kurz auf den Irrthum derartiger Anschauungen hinweisen, da, wie wir gesehen haben, bei dem einzigen vascularisirten Gebilde, bei dem man die Integralerneuerung erwiesen zu haben, und von dem man weitere Schlüsse ziehen zu dürfen glaubte, bei dem Knochen, eine solche Integralerneuerung eben mit Bestimmtheit nicht stattfindet.

Es bleibt mir zum Schluss drittens noch eine überaus wichtige und namentlich für die pathologischen Verhältnisse bedeutungsvolle Frage zu erörtern übrig, nemlich die Frage nach dem Einfluss der statischen Verhältnisse, unter denen der Knochen sich befindet, auf die Entstehung ihrer Architectur, so wie auf die Erhaltung und die Störungen derselben. — Die von mir in dieser Beziehung bisher angestellten Untersuchungen zeigen zunächst, dass die erste Entstehung des architectonischen Aufbaues der Knochen nicht erst eine Folge der statischen Verhältnisse ist, dass vielmehr die Architectur für jede einzelne Körperstelle — so weit eben die knorpelige Anlage bereits verknöchert ist — schon im Fötalzustande und zu einer Zeit, in der die späteren statischen Beziehungen noch nicht zur Geltung kommen, vorgebildet ist. Fig. 3 Taf. X. ist ein frontales Fournierblatt vom Oberschenkel eines 1½jährigen, Fig. 4

ein solches von einem neugeborenen Knaben. So weit die Verknöcherung vorgeschritten ist, erkennen wir auch schon hier die dem verknöcherten Theil entsprechenden Zug- und Druckbalken. Nur die obersten, nahe der Trochanteranlage entspringenden Zugbalken (entsprechend den Balken C E der Fig. 2 Taf. XII.) und die obersten Enden der Druckbalken des Caput und Collum femoris sind noch nicht vorhanden, weil die denselben entsprechenden Theile noch knorpelige Beschaffenheit haben.

Somit zeigt es sich, dass der Oberschenkel die Zug- und Druckbalken nicht erst erhält, wenn das Kind anfängt zu stehen und zu gehen, sondern dass sie durch Vererbung vom elterlichen Organismus auf den Fötus übertragen werden, und bei den ersten Steh- und Gehversuchen schon in ihrer späteren von uns nachgewiesenen vollkommenen „Diensttauglichkeit“ vorhanden sind.

Sobald irgend eine Stelle des Knorpels ossificirt, bekommt sie sofort die für diese Stelle später nothwendige Architectur. Der erste Ossificationspunkt in der Mitte der für die spätere Diaphysis femoris bestimmten Knorpelanlage differenzirt sich sofort im Sinne der Balkennetze R (s. Fig. 2 Taf. XII.), die später grösstentheils untergehen, und wie unsere Fig. 4 Taf. X. zeigt, schon beim Neugeborenen fast vollkommen verschwunden sind, um der Markhöhle Platz zu machen. Ebenso entwickeln sich in dem Theil der Knorpelanlage, welcher der Stelle des späteren Collum femoris entspricht, sofort bei der ersten Verknöcherung die für diese Stelle charakteristischen, gerade aufwärts steigenden Druckbalken und die auf- und medialwärts steigenden Zugbalken, während bei der Verknöcherung der Knorpelanlage für das Caput femoris sich eine Differenzirung in die architectonisch von jenen vollkommen verschiedenen Druck- und Zugbalken dieser Stelle zeigt.

Diese Betrachtung führt uns nun aber zu dem wichtigen und bisher vollkommen unbekannt gebliebenen Gesetze bei der Ossification der knorpeligen Anlage, dass dieselbe nemlich an jeder einzelnen Stelle in einer vollkommen differenten, für jede Stelle in einer derselben eigenthümlichen Richtung vor sich geht.

Es ergibt sich ferner, dass die ganze spätere Architectur des Knochens gewissermaassen an den entsprechenden Stellen des Knorpels schon latent in diesem vorhanden ist. Diese Thatsache der

Latenz der Knochenarchitectur schon im Knorpel und ihres Vorhandenseins schon längst vor dem Eintritt der statischen Beziehungen, für die sie berechnet sind, hat aber in keiner Weise etwas Ueberraschendes. Sie ist nur dem analog, was wir auch von allen übrigen Organen des Körpers wissen. Ebenso wie das Auge schon im Fötalzustande diensttauglich vorhanden sein muss, wie die zarten Muskelchen der Hand, die erst im reiferen Lebensalter für unsere tausendfachen Handfertigkeiten in Function treten, von Anfang an vorgebildet sind, ebenso muss auch die zweckentsprechende Knochenarchitectur schon mit dem ersten Beginn der Ossification sich entwickeln.

In wie weit die Erhaltung der normalen Architectur während der ganzen Lebensdauer abhängig ist von einem normalen Verhalten der statischen Beziehungen, und ihre Störungen von eingetretenen Veränderungen in denselben, das muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Ich behalte mir zunächst für die Zukunft vor, zu untersuchen, ob ein nach subperiostaler Resection sich regenerirender Knochen unter dem Einfluss von im Wesentlichen normal gebliebenen statischen Beziehungen wieder normale Architectur bekommt, und ob ein in Folge von Rachitis gekrümmt gebliebener aber wieder functionsfähig gewordener Knochen seine Architectur entsprechend der veränderten Form und Inanspruchnahme umändert ¹⁾. — Von vornherein vermute ich, dass Beides der Fall ist, und dass sich somit unter pathologischen Verhältnissen die statischen Beziehungen als das direct Bedingende der Architectur werden nachweisen lassen. Denn es scheint mir fast zweifellos, dass die Knochenbälkchen da, wo sie in Folge einer eingetretenen Krümmung nicht mehr in Anspruch genommen werden, schwinden, und dass sich dagegen in denjenigen Richtungen, in welchen — sowohl bei der Knochenregeneration, als auch bei eingetretenen Knochenkrümmungen — nunmehr Material in Anspruch genommen werden soll, neue Knochenpartikelchen sich an bilden müssen.

Es mag hiermit nur angedeutet sein, dass für die pathologischen Verhältnisse der Knochen die Untersuchung ihrer inneren Architectur voraussichtlich ein nicht minder weites und lohnendes Feld darbieten

¹⁾ Herr Prof. Virchow hat die ausserordentliche Güte gehabt, mir eine durch Rachitis in hohem Grade gekrümmte Tibia eines Erwachsenen aus seiner Sammlung behufs einer derartigen Untersuchung zur Verfügung zu stellen.

wird, als für die physiologischen. So ergibt sich z. B. für die Rachitis, die nach der heutzutage allgemein geltenden Anschauung überall in directem Zusammenhang mit der Appositionstheorie erklärt wird, nicht bloss zunächst negativ die Nothwendigkeit einer entsprechenden Modification dieser Anschauung, sondern es sind eben auch noch positive Resultate für den rachitischen Prozess aus der Untersuchung der veränderten Architectur der Knochen zu erwarten.

Von den Resultaten, zu denen ich hier in der Frage vom Knochenwachsthum gelangt bin, weiss ich, dass sie mit den bisherigen Annahmen der ausgezeichnetsten Männer, namentlich unter den Mikroskopikern, in Widerspruch stehen. Schon dieser Umstand allein war Grund genug für mich, auf das Allerreichlichste zu erwägen, ob ich mich auf den Standpunkt stellen dürfe, den ich hier eingenommen. Aber je häufiger und je vorsichtiger ich die Gründe für meine Schlussfolgerungen in Erwägung gezogen habe, desto bestimmter wurde ich immer wieder zu dem einen Schlusse geführt, dass ganz unmöglich das Knochenwachsthum anders geschehen könne, als ausschliesslich interstitiell. Und darum hoffe ich, dass es meinen geneigten und meine Gründe erwägenden Lesern ebenso ergehen werde, wie mir selber. Ich glaube, dass die Differenz meiner Anschauung mit derjenigen der betreffenden Mikroskopiker sich dadurch erklären wird, dass die letzteren für das Wachsthum nur fötale oder doch zum grossen Theil noch knorpelige Knochen untersucht haben. Es durfte aber aus dem unbestrittenen Apponiren von Knochen seitens der ursprünglichen Knorpelanlage noch keineswegs ohne Weiteres der Schluss gezogen werden, dass eine beständige Neubildung von Knorpel an der Epiphysengrenze behufs fortgesetzter Apposition auch noch die ganze Zeit des Wachsens hindurch stattfinden müsse.

Schon nach dem Erscheinen meiner vorläufigen Mittheilungen über den vorliegenden Gegenstand (Centralblatt vom 6. December 1869.), in denen ich zum ersten Male die Möglichkeit jedes anderen Wachsthums, als des interstitiellen, bestritt, ist mir die hohe Freude einer Bestätigung meiner Anschauungen zu Theil geworden. Richard Volkmann, der sich schon früher um die Knochenwachsthumsfrage durch die Widerlegung der Passivität des Knochengewebes so hohe Verdienste erworben, hat sich (Centralbl. vom 20. Febr. 1870.) auf einen

Standpunkt gestellt, der kaum noch von dem meinigen verschieden ist. Er nimmt jetzt, und zwar aus durchaus treffenden und unwiderleglichen Gründen der klinischen Beobachtung, auch den makroskopischen Erfolg des interstitiellen Wachsthum's an, und lässt „das Längenwachsthum der grossen Röhrenknochen zu einem so vorwiegenden Theile durch interstitielle Wachsthumsvorgänge erfolgen, dass dagegen die Einschaltungen an den Epiphysengrenzen wenig in Betracht kommen.“

Und so gebe ich mich denn der Zuversicht hin, dass sich noch viel mehr ähnliche Stimmen werden erheben müssen, und dass man bald auch nicht mehr von einem „Wenig in Betracht Kommen“ des Appositionswachsthum's sprechen, sondern vielmehr eben so unbedingt und eben so unumwunden, wie ich es in der vorliegenden Arbeit gewagt habe, jeden letzten Rest der Juxtappositionstheorie über Bord werfen werde.

Erklärung der Abbildungen.

Tafel X.

Die Figuren dieser Tafel sind genau in natürlicher Grösse photographirt. Die in Fig. 1, 2 und 5 abgebildeten Präparate sind auf der Elfenbeinsägemaschine geschnitten, die in Fig. 3 und 4 aus freier Hand gesägt.

Fig. 1. Fournierblattartiger frontaler etwas excentrisch, und zwar der hinteren Fläche näher gelegener Längsschnitt vom oberen Ende des rechten Oberschenkels eines 31jährigen Mannes.

Fig. 2. Ein ähnlicher, aber mehr central gelegener Längsschnitt vom Oberschenkel eines 3jährigen Mädchens.

Fig. 3. Desgl. von einem 1½jährigen Knaben.

Fig. 4. Desgl. von einem neugebornen Knaben.

Fig. 5. Sagittaler Längsschnitt durch die Mitte des Calcaneus eines 5jährigen Mädchens.

Tafel XI.

Sämmtliche Figuren dieser Tafel sind genau in halber linearer Grösse der natürlichen photographirt. Es ist vortheilhaft, diese Tafel durch die Loupe zu betrachten, da Alles, was von den Schönheiten der Präparate durch die verkleinerte Darstellung etwa verloren gegangen ist, sich durch solche Betrachtung wieder vollkommen herstellt.

Die in den Figuren 1—4 und 8—10 abgebildeten Präparate sind auf der Elfenbeinsägemaschine geschnitten, das in Fig. 5 dargestellte mittelst der Decoupir-Maschinsäge, die in Fig. 6 und 7 aus freier Hand zersägt.

- Fig. 1. Frontaler central gelegener Längsschnitt vom Femur einer 25jährigen Frau.
- Fig. 2. Desgl. vom Femur eines 20jährigen Mannes.
- Fig. 3. Desgl. von einem 13jährigen Knaben.
- Fig. 4. Desgl. von einem 7jährigen Mädchen.
- Fig. 5. Sagittaler der gebogenen Axe des Knochens folgender, und demnach die neutrale Faserschicht des letzteren darstellender Längsschnitt vom oberen Ende des linken Oberschenkels eines 29jährigen Mannes, von der concaven (medialen, Druck- oder Adductorensseite) her gesehen. Der die hintere Fläche des Oberschenkels durchschneidende Rand des Präparats mit dem Trochanter minor liegt zur Linken.
- Fig. 6. Querschnitt (normal zur Axe stehender Schnitt) vom rechten Oberschenkel desselben Mannes, und zwar in der Höhe des Trochanter minor durch den Knochen geführt, und von oben her gesehen. Die der Vorderfläche des Oberschenkels entsprechende Seite des Präparats liegt nach unten, die der Hinterfläche (mit dem Trochanter minor) nach oben, die der Zugseite entsprechende zur Linken, die der Druckseite entsprechende zur Rechten.
- Fig. 7. Querschnitt desselben Oberschenkels, und zwar aus dem Caput femoris, etwa in der Gegend zwischen dessen mittlerem und unterem Drittheil, von unten gesehen. Hier liegt die der Vorderfläche des Oberschenkels entsprechende Seite wieder nach unten, und die der Hinterfläche entsprechende nach oben, dagegen die Zugseite zur Linken und die Druckseite zur Rechten.
- Fig. 8. Frontaler Längsschnitt durch das obere Ende des Unterschenkels einer 28jährigen Frau.
- Fig. 9. Desgl. von einem 5jährigen Mädchen.
- Fig. 10. Sagittaler Längsschnitt durch die Mitte des Calcaneus eines 35jährigen Mannes.

Tafel XII.

- Fig. 1. Darstellung der im Innern eines Knochens wirkenden Kräfte und Trajectorien. Nach dem von den Schülern des Prof. Culmann und unter dessen Aufsicht, und zwar in doppelter Grösse eines menschlichen Oberschenkels gezeichneten Original. Diese Originalzeichnung wurde zunächst auf photographischem Wege wieder auf die natürliche Grösse reducirt, und hiernach lithographirt. Fig. 1 a, b und c stellen den Kräfteentwurf für die beispielsweise gewählten Querschnitte I, III und VI dar.
- Fig. 2. Schematische Nachbildung des in Fig. 1 Taf. X. photographirten Präparats.
- Figg. 3—7 gehören zu den Erläuterungen aus der graphischen Statik auf S. 402—407.
- Fig. 8. Schematische Darstellung einer nach dem Pauly'schen System gebauten Brücke.