

Über die Wechselbeziehungen zwischen Form und Funktion der Skelettknochen.

Vortrag im Verein für Naturkunde zu Cassel gehalten von Dr. med.
Otto Hartmann in Cassel am 11. VIII. 1902.

Schon Jahrhunderte lang hat der Mensch Bauwerke und Maschinenanlagen ersonnen und hergestellt, ohne eine Ahnung davon zu haben, dass sein eigenes Skelett nach ähnlichen mathematischen und mechanischen Gesetzen zusammengestellt ist. Erst der modernen Anatomie im Vereine mit der Chirurgie blieb es vorbehalten, ähnliche mechanische und architektonische Verhältnisse, wie sie uns in der Baukunst auf Schritt und Tritt begegnen, an dem menschlichen Knochenskelette aufzudecken.

Wer kennt nicht den gewölbten Bau unseres Fusses namentlich den arischen Stämmen eigentümlich, der den Menschen seinen elastischen Gang und dem Fusse selbst sein schlankes, zierliches Aussehen verleiht? Ähnlich den keilförmigen Bausteinen eines Rundbogens sind auch die nach der Sohle hin sich verjüngenden Fusswurzelknochen zusammengesetzt und mit derben Bandmassen derartig an einander fixiert, dass den Scheitel dieses Bogens der Unterschenkelknochen mit dem Gewichte des Körpers ohne irgend welche Gefahr belasten kann.

Noch kompliziertere Gesetze der Mechanik und schon der höheren Mathematik sehen wir in dem Bau des Oberschenkelknochens, namentlich im Gebiete des Schenkelhalses, so einfach und unschuldig er auf den ersten Blick zu scheinen vermag, verwirklicht.

Da das Skelett der unteren Gliedmassen dem Körper sowohl als Stütze als auch als Organ der Fortbewegung dient, so musste eine massivere Gestaltung und festere Verbindung mit dem Beckengürtel den Funktionen der unteren Gliedmassen angepasst sein. Um weiter zur Entfaltung grösserer Krafterleistungen von seiten der mächtig entwickelten Becken- und Oberschenkelmuskeln bei Bewegungen der Wirbelsäule sowie der unteren Gliedmassen das Hebelprinzip besser zum Ausdruck zu bringen, musste die Verbindungsstelle der unteren Gliedmassen mit dem Beckenringe, das Hüftgelenk, die seitlichen, höher gelegenen Partien des Beckens einnehmen, wodurch die Entfernung des Angriffspunktes vom Drehpunkte um ein gutes Stück vermehrt wurde. Die gleiche Lage erschien auch wünschenswert, um zeitweise, in der Ruhe, durch Verlagerung der Schwere des Körpers auf die Sitzbeinknorpel die unteren Gliedmassen ganz zu entlasten.

Der äussere Bau des Oberschenkelknochens war dadurch nicht mehr gleichgültig, er durfte nicht mehr so einfach konstruiert sein wie der Oberarmknochen, sondern es musste hier mathematischen Gesetzmässigkeiten Rechnung getragen werden. Der Oberschenkelknochen erhielt deshalb kurz bevor er mit dem Beckenringe in Verbindung trat, eine nach der Mittellinie des Körpers geneigte, winklige Abbiegung, eine Region, die man anatomisch als Schenkelhals bezeichnet.

Bei aufrechter Stellung des Menschen muss der Oberschenkelknochen das ganze Gewicht des Oberkörpers tragen, und um dieser Aufgabe ganz gewachsen zu sein, hat die Natur ihr Möglichstes getan, sie hat den Knochen infolge einer ganz besonderen Struktur und Architektonik mit einer Festigkeit und Elastizität versehen wie keinen anderen Skelettknochen.

Da jedoch die Widerstandsfähigkeit eines Knochens gesetzmässig bedeutend herabgesetzt wird, wenn der Knochen eine Abknickung seiner Achse erfährt, so muss der Schenkelhals als die schwächste Stelle des Ober-

schenkelknochens angesehen werden. Der Oberschenkelknochen würde demnach in dem Momente, wo eine grössere Anforderung an seine Widerstandsfähigkeit gestellt wird, hier sicher Gefahr laufen, zerschellt zu werden, wenn nicht, wie gesagt, die Natur durch einen besonderen Bau dafür Sorge getragen hätte, dass derselbe trotzdem ohne Schaden zu leiden, die Last des Oberkörpers in allen Verhältnissen tragen kann.

Als im Jahre 1867 der Anatom von Meyer in der Züricher naturforschenden Gesellschaft die feinere Knochenstruktur des Oberschenkelknochens demonstrierte, sprach der Mathematiker Culmann die denkwürdigen Worte aus: „er müsse gestehen, dass er niemals eine freudigere Überraschung aus seinen wissenschaftlichen Arbeiten gewonnen habe, als in dem Momente, in welchen er die wunderbare Übereinstimmung zwischen der Natur und den Ergebnissen seiner graphostatischen Untersuchungen vor sich gesehen habe“.

Culmann verglich den oberen Teil des Oberschenkels mit einem Krahn, dessen Form dieselbe ist, wie die des oberen Oberschenkels, nur dass man sich den grossen Rollbügel, der für die statischen Momente ganz belanglos ist, an den sich nur die von hinten, dem Becken, kommenden Muskeln ansetzen, fortdenken muss.

Bei der Belastung eines einfachen physikalischen, krahnartigen Balken, den man sich aus neben einander liegenden Längsfasern zusammengesetzt vorstellt, werden diejenigen Fasern, die sich auf der konvexen Seite befinden, ausgedehnt, und diejenigen, die der konkaven Seite näher liegen, zusammengedrückt, während eine gewisse mittlere Schicht, die neutrale Axenschicht zu beiden Seiten der neutralen Axe des Krahnes weder eine Ausdehnung noch Zusammenpressung erleidet. Die Ausdehnungen und Zusammenpressungen der verschiedenen Fasern zu beiden Seiten der neutralen Axenschicht, bei denen die Teilchen mit anderen Worten einer Zug- resp. Druckkraft ausgesetzt sind, sind den Abständen von dieser Schicht direkt

proportional, so dass also die von dieser Schicht am meisten entfernt liegenden Fasern einerseits die grösste Ausdehnung und andererseits die grösste Zusammenpressung erfahren.

Im Ständer des belasteten Krahnes, und zwar in unserem Falle zwischen A und B mit 30 kg., wie dies den natürlichen Verhältnissen am Oberschenkel des Erwachsenen am meisten entspricht, liegen die Verhältnisse ebenso wie beim gewöhnlich belasteten krahmartigen Balken. Hier stellen die Belastungskurven auch durch ihre Summierung die Maxima der Druck- und Zugkräfte dar (136,3 kg.); sie stehen hier parallel zu einander und zu der neutralen Axe des Krahnes. Nur im Halse des Krahnes, wo die graphostatischen Kurven den Minima der Spannungen (0,0) immer mehr gleich kommen, ändern sie derartig ihren Lauf, dass die auf der konvexen Seite befindlichen Linien bogenförmig, die auf der konkaven Seite liegenden büschel- oder fächerförmig auseinander gefaltet sind. Sie schneiden hier die neutrale Axe des Krahnes in einem Winkel von 45° und stehen in diesem Schnittpunkte senkrecht auf einander, aber auch auf dem Umriss der Krahnfigur, der letzten und wichtigsten Spannungslinie, in der sämtliche Linien ihr Ende finden.

Um die Gesetze des mathematisch gedachten Krahnes in dem Schenkelhalse verwirklicht zu sehen, durfte die Natur die Knochensubstanz nicht überall mit derselben Mächtigkeit und Stärke versehen. Auf einem Frontalschnitte durch den oberen Teil des Oberschenkelknochens erkennen Sie, meine Herrn, dass auf der konvexen Seite, wo die Knochenteilchen nur der Ausdehnung, der Zugkraft ausgesetzt sind, die immer das Bestreben hat, den Kopf und den Rollbügel auseinander zu zerren, die kompakte Rindensubstanz des Schaftes schon ziemlich früh schwächer wird, um in der Höhe des Rollhügels auf eine minimale Breite reduziert zu werden. Bei genauer Betrachtung beruht jedoch diese Verschmälerung der Rindensubstanz nur darauf, dass von ihr Knochenbälkchen aus-

gehen, die sich in grossem Bogen wie die Zuglinien in der Krahnfigur durch den Schenkelhals zu dem inneren, unteren Abschnitte des Schenkelhalses erstrecken. Man muss demnach die kompakte Rindensubstanz des Schaftes als eine sehr enge Aneinanderlagerung solcher Knochenbälkchen ansehen, die im Schenkelhalsteile zum grössten Teile in ein divergierendes bogenförmiges Lamellensystem übergehen, wodurch die Rindensubstanz des Schaftes immer mehr einer Auflösung entgegengeht.

Die innere, konkave Seite des Schenkelhalses dagegen hat den Druck des auf dem Gelenkkopf lastenden Gewichtes des Oberkörpers zu tragen, sie ist die Druckseite und deshalb erreicht auch hier am inneren, unteren Teile die kompakte Substanz ihre grösste Mächtigkeit. An dieser Stelle wird der Knochen am wesentlichsten beansprucht und verlangt deshalb in der kompakten Rindensubstanz ein entsprechend festes Widerlager.

Zu dieser Stelle, wo also die grösste Belastung in der Rindensubstanz stattfindet, läuft auch das zweite Knochenlamellensystem im Schenkelhalse zusammen, indem die Knochenbälkchen derartig von der gegenüberliegenden Seite, vom Gelenkkopf, vom Rollhügel und vom dazwischen gelegenen Schenkelhalsteile der kompakten Substanz zueilen, dass sie mit dem ersten Systeme ebenfalls in der Axe des Schenkelhalsteiles genau einen gotischen Winkel von 90^0 wie in der Krahnzeichnung einschliessen. Wir haben demnach in dem Schenkelhalsteile zwei vollständig von einander getrennte, verschiedene Lamellensysteme, die den statischen Momenten, d. h. der Belastung des Knochens durch die Körperschwere angepasst sind.

Der Schenkelhals verläuft aber bei ganz sorgfältiger Betrachtung nicht einfach in einen schlanken, frontal nach der Mittellinie des Körpers gerichteten Bogen zur Hüftgelenkspfanne, sondern erfährt ungefähr in seiner Mitte noch eine geringfügige Knickung nach hinten, die durch die an den grossen Rollhügel sich ansetzende Muskulatur hervorgerufen wird, so dass der Schenkelhals nicht nur auf

seine Druck- und Zugfestigkeit von oben nach unten, die durch die Körperschwere ausgelöst wird, sondern auch gegen die Zugkraft von hinten nach vorn beansprucht wird. Der äusseren Form entsprechend haben auch die inneren Knochenbälkchen, wenn auch im geringen Masse, aber auf feinsten Schnitten doch zu bemerken, dieselbe Änderung in ihrem Verlaufe nach hinten erfahren müssen, was ein ausgezeichneter Beweis ist, dass nicht nur jede Art der Belastung, die ein Skelettknochen durch die Körperschwere erleidet, sondern auch jeder stärkere Muskelzug bei der anatomischen Architektur in Ausschlag gebracht ist. Ja man muss als sicher annehmen, dass ausser den statischen Verhältnissen nicht nur eine grössere Muskelgruppe, sondern jeder eine Muskel, ja vielmehr jede einzelne Muskelfaser, wie das selbständige Bälkchensystem im grossen Rollbügel auf der Röntgenphotographie deutlich illustriert, bei der Struktur des Knochens zur Geltung gekommen ist, wodurch noch innigere Beziehungen zwischen dem Skelett und den dasselbe in Tätigkeit setzenden Muskeln dokumentiert werden. Eines bedingt das andere, jedes setzt zu seiner Existenz das Bestehen des anderen voraus und bedarf derselben zum Vollzug seiner Verrichtungen.

Wie in dem Ständer des Krahnes die mathematischen Linien einen grossen linienfreien Raum einschliessen, so finden wir im Schaftknochen auch einen balkenfreien Raum, den wir als Markhöhle bezeichnen, während im Halsteile die sich kreuzenden Bälkchen weitmaschige Lücken wie in der Krahnfigur umgeben. Diese gewebelosen Räume befinden sich tatsächlich da, wo sich keine spannenden Kräfte geltend machen, wo also ein Gleichgewichtszustand vorhanden ist. Hier würde demnach wirklich vorhandene Knochensubstanz nur überflüssigen und unnützen Ballast ausmachen. Wie weiter der Umriss der Krahnzeichnung den Abschluss und die letzte und, wie erwähnt, die wichtigste Kurve des gesamten mathematischen Systemes bildet, da sie als die am meisten von der Axe

des Krahnes entfernt liegende Linie den grössten Spannungen ausgesetzt ist, so muss auch das äusserste Knochenbälkchen in der Rindensubstanz, das mit wenig anderen den Schenkelhals in toto umgiebt, als das schwerwiegendste des ganzen Bälkchensystems angesehen werden. Aus dieser Annahme resultiert aber nichts anderes, als die Form, wie sie der Schenkelhals gerade besitzt, ist für die Beanspruchung des Knochens die einzig mögliche und richtige: Der Knochen hat eine Gestalt, die nur durch seine Funktionsleistung bedingt ist.

In dem Bau des Oberschenkelknochens, der die Gestalt eines Krahnes besitzt ist demnach in vollkommener Weise die zweckmässigste Form mit einem Minimum von Materialaufwand erreicht, und wir müssen gestehen, dass der geschickteste Architekt bei der Herstellung grosser Bauwerke, wie z. B. beim Überbrücken von tiefen Tälern und weiten Meeresarmen und bei der Aufstellung anderer Monumentalbauten, ich brauche nur an den Eiffelturm zu erinnern, nicht ökonomischer und zugleich harmonischer mit der Verwendung des zum Aufbau notwendigen Materials verfahren konnte, als die Natur en miniature die beste Lösung dieser schwierigen Aufgabe gefunden hat.

Aus dieser soeben ausgesprochenen Annahme, dass die Form des Oberschenkelknochens nur den jedesmaligen Funktionen entspricht, muss man das Fazit ziehen, dass die Struktur und Architektonik des Knochens der Belastung des Körpers nicht mehr gewachsen sein kann, sobald die statischen Verhältnisse im Knochen durch eine plötzliche oder allmähliche Formveränderung andere geworden sind. Dann werden die Komponenten der Schwere des Körpers, die maximale Zug- und Druckkraft nicht mehr im Sinne der beschriebenen Knochenbälkchen wirken können, sondern sie werden mit diesem Bälkchensysteme grössere oder kleinere Winkel einschliessen, wodurch die

Elastizität und Widerstandskraft des Knochens ganz erheblich herabgesetzt wird.

Infolge einer derartigen Formveränderung ist noch eine andere Erscheinung von der grössten Bedeutung, dass nämlich die Kraftkomponenten zum grössten Teile ausserhalb der Belastungsbälkchen in eine neutrale Zone, in die Markhöhle des Schaftknochens und in die zwischen den Bälkchen gelegenen Gewebslücken des Schenkelhalses hineinfallen, wo die Natur infolge des Gleichgewichtszustandes von vorn herein am nötigen Material gespart hat. Es könnte demnach äusserst leicht der Fall sein, dass der Knochen, da Wirkung und Gegenwirkung nicht mehr gleich und entgegengesetzt sind, schon bei der gewöhnlichen Beanspruchung versagen und zerschmettert würde. Der Knochen kann nur unter der Bedingung der maximalen Druck- und Zugkraft gehörigen Widerstand entgegen setzen, wenn seine innere anatomische Struktur mit den Richtungen dieser Kräfte identisch ist.

Dieser neuen, wohl begründeten Anschauung von den Wechselbeziehungen zwischen Form und Funktion der Knochen musste sich auch die Lehre von den Frakturen und anderen Erkrankungen des Knochenskeletts anpassen. Während man früher bei der Zusammenheilung von Knochen den Schwerpunkt der Heilung in den Verkittungsprozess der Knochenenden (Callusbildung) legte, weiss man heute, dass derselbe gegenüber den Umwandlungsprozessen der inneren Knochenstruktur, der jedesmaligen Funktion entsprechend von ganz untergeordneter Bedeutung ist.

Ich zeige Ihnen, meine Herrn, die Zeichnung eines geheilten Schienbeinbruches, bei dem eine starke Verschiebung der Knochenfragmente stattgefunden hat. Sie sehen, dass die frühere Markhöhle, in der sich vor dem Unfalle keine spannenden Kräfte geltend machten, jetzt mit einem wohl geordneten Bälkchensystem ausgekleidet ist. Auch weit von der Bruchstelle sehen Sie eine Umwandlung der früheren Struktur, die sich den jetzigen, ver-

änderten statischen Verhältnissen angepasst hat. Und da, wo der grösste Druck stattfindet, ist die kompakte Rindensubstanz mächtig entwickelt, ähnlich dem inneren, unteren Teile des Schenkelhalses. Weiter zeige ich Ihnen hier einen infolge englischer Krankheit (Rachitis) verbogenen Unterschenkelknochen. Das symetrische Bälkchensystem des daneben stehenden Knochens hat einem verzerzten, ungleichförmigen Systeme Platz gemacht. Eine mächtig entwickelte Rindensubstanz sehen Sie auch hier an der konkaven Seite des Knochens, wo die grösste Belastung stattfinden muss. „Die Natur“, sagt J. Wolf, „kehrt als keineswegs so viel als möglich zu den ursprünglichen Formen zurück, sondern nur so viel als möglich zu der ursprünglichen Funktion, und sie erzeugt demgemäss neue, von den ursprünglichen ganz abweichende Formen, welche der Funktion unter den veränderten statischen Verhältnissen angepasst sind.

Jüngst war mir an dieser Stätte Gelegenheit geboten, den Oberschenkelknochen des viel besprochenen und für die Anthropologie so wichtigen und berüchtigten Neandertalmenschen in Augenschein zu nehmen. Neben anderen Veränderungen präsentiert sich hier eine ganz andere äussere Form des Schenkelhalses, der viel massiver und plumper ist und unter einen kleineren Winkel, annähernd einem rechten, von dem Schafte abbiegt. Selbstverständlich muss dieser äusseren Form entsprechend auch die innere Struktur eine andere sein, die Knochenbälkchen, die allenthalben, wie wir gesehen haben, den Richtungen der stärksten Beanspruchung entsprechen, werden in dem Schenkelhalse des Neandertalmenschen ein etwas anderes graphostatisches System bilden.

Da nun die Natur die Organe, wie wir gesehen haben, mit der zweckmässigsten und für die Funktion jedesmal passendsten Form versieht, so müssen aus einem anderen Bau des Schenkelhalses auch andere Leistungen gefolgert werden; es müssen eben die statischen Momente im Schenkelhalse des Neandertalmenschen andere gewesen

sein. Es wird demnach bei jener Primatenform des Menschen, bei der der Schenkelhals fast unter einem r. Winkel vom Schafte abbiegt, weniger ein aufrechter Gang zur Geltung gekommen sein, die damaligen Menschen müssen sich wie die Affen meistens hockend und kletternd fortbewegt haben.

Die schlanke, gestreckte Form des Schenkelhalses ist erst als das Postulat der aufrechten Stellung des Menschen anzusehen. Denn da mit der aufrechten Haltung des Menschen die oberen Gliedmassen nur noch als Greiforgane dienten und die Fortbewegung allein den unteren Gliedmassen zufiel, musste der Oberschenkelknochen infolge grösserer Belastung seine jetzige schlanke Form annehmen.

Je mehr also das Gebiet von den Transformationsgesetzen der Knochen, aber auch der Weichteile, deren Verhältnisse in dieser Hinsicht noch recht wenig aufgeklärt sind, und von den wechselseitigen Beziehungen unter einander, ausgebeutet wird, ein desto herrlicher Ausblick bietet sich den Forschern dar, die Lücke, die in der Darwin'schen Descendenzlehre noch zu recht besteht, auszufüllen. Aus der Struktur und Architektonik der aufgefundenen Knochen wird man dann auf die Knochen umkleidenden und sie in Tätigkeit setzenden Weichteile schliessen können, um ein möglichst klares Bild zu gewinnen.

Cassel, im August 1902.



ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Abhandlungen und Berichte des Vereins für Naturkunde Kassel](#)

Jahr/Year: 1903

Band/Volume: [48](#)

Autor(en)/Author(s): Hartmann Otto

Artikel/Article: [Über die Wechselbeziehungen zwischen Form und Funktion der Skelettknochen 307-316](#)