Poliklinik f. gr. Haustiere

Aus der Poliklinik für grosse Haustiere der Kgl. Tierärztl. Hochschule zu Berlin.
Vorstand: Prof. Dr. Kärnbach.

Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmässigen und unregelmässigen Gliedmassenstellungen.

INAUGURAL-DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DER VETERINÄR-MEDIZINISCHEN DOKTORWÜRDE
DER
KÖNIGLICHEN TIERÄRZTLICHEN HOCHSCHULE
ZU BERLIN
VORGELEGT VON

RUDOLF GROMMELT,
TIERARZT AUS SCHLODIEN.

Sonderabdruck aus „Monatshefte für praktische Tierheilkunde".
XXIII. Band.

1911

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1912.

Aus der Poliklinik für grosse Haustiere der Kgl. Tierärztl. Hochschule zu Berlin.
Vorstand: Prof. Dr. Kärnbach.

Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmässigen und unregelmässigen Gliedmassenstellungen.

INAUGURAL-DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DER VETERINÄR-MEDIZINISCHEN DOKTORWÜRDE
DER
KÖNIGLICHEN TIERÄRZTLICHEN HOCHSCHULE
ZU BERLIN
VORGELEGT VON

RUDOLF GROMMELT,
TIERARZT AUS SCHLODIEN.

Sonderabdruck aus „Monatshefte für praktische Tierheilkunde“.
XXIII. Band.

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1912.

Gedruckt mit Genehmigung der Königlichen Tierärztlichen Hochschule zu Berlin.

Referent: Prof. Dr. Kärnbach.

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit

gewidmet.

Das Os metacarpale 3 ist vielleicht der einzige Knochen, dem man von jeher, namentlich in tierzüchterischer Hinsicht, eine besonders wichtige Rolle zugeschrieben hat. Als ein wenig von Weichteilen umgebenes Stück des Gliedmaßenskelettes hat man diesen Knochen als sozusagen einheitliches, wichtiges Beurteilungsobjekt gewählt, um von seiner Stärke und Form auf die ganze Kondition, den Wert und die Leistungsfähigkeit eines zur Zucht bestimmten oder zu sonstigen Zwecken zu verwendenden Pferdes gewisse Schlüsse ziehen zu können. Es ist daher selbstverständlich, daß gerade über den Metakarpus nach den verschiedensten Richtungen hin zahlreiche Untersuchungen angestellt worden sind. Längen- und Umfangsmessungen, Untersuchungen der Wandstärke in Mitte des Knochens verschiedenrassiger Tiere, Prüfungen der Biegefestigkeit, selbst mikroskopische Untersuchungen der Kompakta zum Zwecke von Feststellungen eventueller, durch verschiedene Rasse bedingter Unterschiede in der Dichtigkeit des Knochengewebes sind in erschöpfendem Maße an diesem Knochen vorgenommen worden. Hingegen findet man in der Literatur über die Stärkeverhältnisse der einzelnen Wände im Verlaufe des ganzen Knochens und über die Verhältnisse im Innern des Metakarpus, also über das Verhalten der Spongiosa, sowie über die daraus hervorgehenden Beziehungen des Metakarpus zur Statik und Mechanik eigentlich wenig verzeichnet. Auf Anregung meines hochverehrten Lehrers, des Herrn Prof. Dr. Kärnbach, habe ich daher versucht,

in der vorliegenden Arbeit über die letzterwähnten Verhältnisse sowie auch über die Veränderungen im Innern des Metakarpus bei unregelmäßigen Stellungen einige weitere Beiträge zu liefern.

Literatur und Geschichte. Die Kenntnis von der Bedeutung der Knochenspongiosa und dem nach mechanischen Gesetzen geregelten Gesamtbau der Knochen ist noch nicht allzu alt. Freilich, wenn auch schon vor den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts von gewissen Autoren Ansichten über die mechanische Form und Bedeutung der Knochen laut geworden sind, so hat man sich doch erst seit etwa 1830 eingehender mit der Architektur der Spongiosa und mit ihren Beziehungen zu den mechanischen Leistungen der Knochen beschäftigt. Von dem Franzosen Bourgery (1832), dem Engländer Ward (1838), dem Amerikaner Jefferies Wymann (1849), dem Deutschen Engel (1851) und schließlich von G. M. Humphry (1858) sind schon ziemlich genaue Schilderungen von dem Verlauf der Spongiosa und Erklärungen der mechanischen Bedeutung derselben mitgeteilt worden. Man pflegt beim Studium der Literatur vielfach dem Irrtum zu begegnen, daß erst der Züricher Anatom Prof. G. H. v. Meyer die gesetzmäßige Architektur der schwammigen Knochensubstanz entdeckt habe. Wenn nun Prof. H. v. Meyer nach den obigen Angaben auch nicht der erste ist, welcher fand, „daß die Spongiosa eine, wenn man so sagen darf, wohlmotivierte Architektur zeigt, welche mit der Statik und Mechanik der Knochen im engsten Zusammenhange steht und deswegen an demselben Ort in derselben Gestalt wiederkehrt", so muß man ihm doch das große Verdienst einräumen, den Verlauf der Spongiosa an den meisten menschlichen Knochen viel ausführlicher und bestimmter als die früheren Autoren beschrieben und die mechanische Bedeutung der Spongiosa fast stets richtig beurteilt zu haben.

Die Entdeckung der mathematischen Bedeutung des Spongiosaverlaufes fiel dem Begründer der Lehre über Statik und Mechanik, dem Züricher Prof. Culmann zu. „Culmann bemerkte bei Betrachtung der Meyerschen Präparate, daß die Spongiosabälkchen an vielen Stellen des menschlichen Körpers in denselben Linien aufgebaut sind, welche er für solche Körper zu zeichnen gelehrt hatte, die ähnliche Formen haben wie die betreffenden Knochen und ähnlichen Kräfteeinwirkungen ausgesetzt sind wie diese." Durch diese hervorragende Entdeckung Culmanns erhielten nunmehr die weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiet ein ganz neues Ziel, nämlich das, nachzuweisen, daß jeder ganze Knochen, also sowohl Kompakta als auch Spongiosa, in Stärke resp. Richtung letzterer Teile nach rein mathematischen Grundsätzen angelegt sei. Und so folgten denn jetzt in einem Zeitraum von wenigen Jahren die mannigfaltigsten Arbeiten über die verschiedensten Knochen nicht bloß des Menschen, sondern auch der verschiedenen Tiere, Arbeiten, welche alle den Zweck verfolgten, die Lehre der Architektur der Spongiosa und Kompakta und deren mathematische Bedeutung weiter auszubauen. Unter den Werken von Wolff (s. Literaturangaben 31—34), Wolffermann (35), Bardeleben (2—4), Langerhans (16), Roux (24—26) usw. dürften die der Autoren Wolff, Bardeleben und Roux besonders erwähnenswert sein. K. Bardeleben weist in seiner Arbeit „Beiträge zur Anatomie der Wirbelsäule, Jena 1874" nach, daß für den Bau sowohl der menschlichen als auch der tierischen Wirbel-

säule als das zugrunde liegende Schema das Fachwerk zu betrachten sei. An beiden findet man ganz analog den Druck- und Streckbäumen, Streben und Pfosten des Fachwerks eine entsprechende Anlagerung und Richtung der Spongiosa des Wirbels, nur mit dem Unterschiede, daß gewisse Teile des ganzen Systems beim Menschen infolge seiner Aufrechtstellung weniger deutlich in die Erscheinung treten als beim Tier und umgekehrt. So haben wir also in dem Verlaufe der Spongiosazüge die Richtungen zu erblicken, in denen Zug-, Druck- oder andere Kräfte, welche von außen her auf den Knochen einwirken, den konzentriertesten Widerstand im Knocheninnern finden, oder anders gesagt, die Spongiosa verläuft so, daß ihre Richtung sie für die Fortpflanzung einer Gewalteinwirkung von einem Ende zum anderen am geeignetsten macht. Roux gelang es, solche Kraftlinien, die Culmann ursprünglich Spannungstrajektorien nannte, und die bald die Bezeichnung „Druck- und Zugkurven" erhielten, selbst in einem bindegewebigen Organ, der Schwanzflosse des Delphins, in Form von Kurven dichter gefügten Gewebes als Bahnen besonderer Kraftwirkungen nachzuweisen. Schon zu H. v. Meyers Zeiten war man zu der Erkenntnis gekommen, daß die Kompakta nichts anderes sei als eine zusammengedrängte Spongiosa, und daß die Auflösung der Kompakta an den Gelenkenden in die Plättchensysteme nur die Bedeutung haben könne, den auf die Gelenkenden ausgeübten Druck möglichst gleichmäßig auf alle Teile der Gelenkfläche zu verteilen und zu gleicher Zeit die Knochenmasse so anzuordnen, daß ohne Vermehrung ihrer Substanz der Knochen selbst an Raum und somit an Sicherheit in der Führung der Gelenke gewinne. Durch diese Auflösung wird also erzielt, daß der Knochen unter Verwendung von möglichst wenig Material eine möglichst hohe Leistungsfähigkeit zu entfalten vermag. Meyer ahnte bereits, daß diese Gesetzmäßigkeit in der Anordnung der Spongiosa zu mathematisch festgelegten Zug- und Druckkurven sich auch in Knochen von veränderter Form, z. B. den rachitischen zeigen müsse. Er vermutete, daß mithin die Spongiosa in diesen krankhaft veränderten Knochen eine Umlagerung erfahren haben müsse derart, daß sie imstande sei, der infolge der Umformung des Knochens geänderten Inanspruchnahme standhalten zu können. Erst J. Wolff (34) war es vergönnt, die an gesunden und normal beanspruchten Knochen beobachteten Gesetze auf pathologische Knochen ausdehnen zu können. Auf Grund seiner Untersuchungen stellte er fest, daß im Gefolge primärer Abänderung der Form und Inanspruchnahme oder auch bloß der Inanspruchnahme der Knochen bestimmte, nach mathematischen Regeln eintretende Umwandlungen der inneren Architektur und ebenso bestimmte, denselben mathematischen Regeln folgende, sekundäre Umwandlungen der äußeren Form der betreffenden Knochen sich vollziehen. In seinem hervorragenden Werk: „Das Gesetz der Transformation der Knochen" kommt Wolff also zu dem Schluß, daß auch die äußere Form der Knochen, welche L. Fick (12) als durch Druck von seiten der anliegenden Weichteile „geprägt" erklärte, hauptsächlich durch die Inanspruchnahme bedingt sei, indem die äußere Begrenzung der Knochen, ich möchte sagen, die äußerste Hülle, nicht ein willkürliches Ding vorstelle, sondern als die Summe der äußersten Kurven von Zug- und Druckbeanspruchungen anzusehen sei. Wolff spricht freilich ebenso wie Roux (25) und Zschokke (39) im Gegensatze zu H. Hirsch (12) auch den anliegenden Weichteilen eine Beeinträchtigungsfähigkeit der Knochen hinsichtlich ihrer Formung zu.

In der Veterinärmedizin haben sich um die Erforschung des inneren Baues der Knochen und um die mathematische Begründung

der gefundenen Architekturverhältnisse namentlich Zschokke (39) und Eichbaum (6) verdient gemacht. Daß sich am Fesselbein nach erfolgter Bruchheilung ebenfalls in dem inneren baulichen Gefüge jene Umwälzungen abspielen, welche zur Entwicklung einer der neuen Form und Inanspruchnahme des Knochens genügenden Spongiosa führen, dafür brachte Silbersiepe (30) einen sicheren Beweis. Zum Schlusse möchte ich erwähnen, daß Giese (7) nachgewiesen hat, daß bei Pferden der regelmäßigen, bodenweiten und bodenengen Stellung am Fessel- und Kronenbein Unterschiede in der Stärke der Kompaktae wie auch der später zu besprechenden Druckaufnahmeplatte und der Spongiosazüge vorhanden sind, bedingt durch die der Stellung entsprechende, physiologisch stärkere Belastung einer Seite. Um in dem eben besprochenen Abschnitte durch Einzelheiten nicht die allgemeine Uebersicht über die gegebene Einführung zu verwischen, habe ich mir erlaubt, besondere, zur Literatur gehörige Angaben in die betreffenden Abschnitte meiner Arbeit einzufügen.

Material und Untersuchungsmethoden.

Mit Ausnahme der Metakarpen jüngerer Tiere sowie der Fohlenröhrbeine, für deren freundliche Uebersendung ich Herrn Gestütsobertierarzt Matthias-Trakehnen meinen ergebensten Dank ausspreche, verschaffte ich mir das ganze übrige, zur Untersuchung gelangende Material aus der Berliner Zentralroßschlächterei. Obgleich dort täglich durchschnittlich 30 Pferde geschlachtet werden, machte es doch ziemliche Schwierigkeiten, gewünschte Art und Zahl von Vorderröhrbeinen zusammenzubekommen, da, in der Annahme, daß sich Veränderungen in der Struktur des Knochens nur bei Pferden mit stark ausgeprägter unregelmäßiger Stellung zeigen würden, nur Metakarpen von besonders typisch gestellten Tieren verwendet werden sollten. Ich wollte meine Untersuchungen hauptsächlich an Metakarpen von Pferden regelmäßiger, bodenweiter und bodenenger Stellung vornehmen, sie aber auch auf Röhrbeine anderer anormaler Stellungen ausdehnen. Das Hauptkontingent der zur Schlachtung bestimmten Tiere bildeten ostpreußische Pferde, unter denen teils recht edle mit ganz korrekter Stellung, teils jene leichten Tiere mit ganz schmaler Brust und entsprechend stark bodenweiter Stellung in ziemlich befriedigender Anzahl ausgesucht werden konnten. Große Schwierigkeiten hingegen bereitete die Beschaffung von Metakarpen rein bodeneng stehender Pferde. Einmal ist es natürlich, daß unter den unregelmäßigen Stellungen bei den leichten warmblütigen Tieren die bodenweite Stellung gegenüber der bodenengen bedeutend dominiert, wogegen unter den kaltblütigen Rassepferden mit starker Brust bodenenge Stellung

der Schenkel häufiger zu beobachten ist. Gerade aber jene schweren Kaltblüter waren am Schlachtort außerordentlich selten zu finden. Wie ich mir habe sagen lassen, ist der Grund für diese Seltenheit der schweren Schlachttiere der, daß letztere fast alle von auswärtigen Händlern gekauft und ins Rheinland, nach Sachsen usw. zur Verwertung als Fleischware transportiert werden. Trotzdem aber gelang es mir auch von der rein bodenengen Schenkelstellung eine erwünschte Zahl Metakarpen zu bekommen. Außer den Metakarpen der drei erwähnten Hauptstellungen wurden auch noch Röhrbeine von X- und O-beinigen und sonst noch abnorm stehenden Pferden untersucht. Im ganzen gelangten 45 Vorderröhrbeine zur Untersuchung: 12 der regelmäßigen, 9 der bodenweiten, 8 der bodenengen Stellung, 6 der O- resp. X-beinigen und 5 anderer abnormer Stellungen, 5 Fohlenmetakarpen im Alter von 2 Tagen bis 1/2 Jahr.

Mit ganz wenigen Ausnahmen wurde immer nur ein Vorderröhrbein eines Pferdes untersucht. Um keinen Täuschungen zu unterliegen, wurden die auserwählten Tiere genau in Ruhe und im Schritt auf Stellung und entsprechenden Gang geprüft.

Die Knochen wurden nach dem Entfernen der Weichteile durch Abkochen erst im ganzen in bezug auf das jeweilige Verhalten der Gelenkflächen, Verwachsung der Griffelbeine, Einziehung der einzelnen Wände genau betrachtet. Sodann wurden sie in der Elfenbeinschneidefabrik von Francke & Co., Berlin, Schmidtstraße, mit Hilfe eines Vertikalgatters, welches etwa 450mal in der Minute sich auf und ab bewegte, erst in der Frontalebene durchsägt. Die Frontalebene wurde durch den Knochen derart gelegt, daß sie die distale Gelenkfläche auf ihrer Höhe, die jederseitigen Bandgruben, Epicondyli, Parepicondyli und die Mitte der proximalen Gelenkfläche traf, also mediale und laterale Knochenwand halbierte. Zur Prüfung der Verhältnisse an der vorderen und hinteren Wand des Metakarpus wurden, nachdem die nötigen Furnierblätter entnommen waren, vordere und hintere Knochenhälfte genau in der Mitte durch einen Sagittalschnitt geteilt, so, daß der distale Gelenkkamm auf seiner Höhe durchtrennt wurde. Eine Entnahme von Furnierblättern gleich nach der ersten Knochenhalbierung war insofern unvorteilhaft, als bei den gewünschten Schnitten von 0,6 mm Stärke durch das in der Spongiosa befindliche Mark zu viel feine Knochenblättchen ausgerissen wurden. Die halbierten Knochen wurden daher erst in

schwacher Sodalösung kochend vollkommen vom Fettmark befreit, wodurch bereits eine recht deutliche Uebersicht über die Spongiosa der beiden Knochenhälften und über die Grenze zwischen ihr und der Kompakta erzielt wurde. Leider aber zeigte sich beim Sägen der Furnierblätter auch nach der eben erwähnten Behandlung der Knochen, daß namentlich am Beginn der Aufblätterung der Kompakta in die Spongiosa, also am Uebergange der Markhöhle in die schwammige Region große Stücke dieses feinen Gewebes von der Blattsäge fortgedrängt wurden und, wenn die Säge endlich gefaßt hatte, dennoch sehr viel Spongiosateilchen aussprangen. Infolgedessen war natürlich eine deutliche Uebersicht nicht möglich. Zufolge eines glücklichen Einfalles füllte ich versuchsweise die Knochenlängshälften mit einer 58prozentigen geschmolzenen Paraffinmasse an. Das wieder erstarrte Paraffin hielt, wie sich später beim Sägen der Furnierblätter zeigte, die einzelnen Spongiosateilchen so fest zusammen, daß auch nicht ein einziges Stückchen ausbröckelte. Ein Heruntergehen unter 0,6 mm Furnierblattstärke verlohnte sich nicht, weil dann der Spongiosaverlauf nicht mehr übersichtlich genug war. Die Furnierblätter wurden durch Einlegen in Xylol von der eingelagerten Paraffinmasse befreit, darauf auf ein feinmaschiges Drahtnetz gelegt, durch kräftigen Wasserstrahl der letzten eingelagerten Fett- und Zellmassen entledigt und schließlich in Wasserstoffsuperoxyd gebleicht. Die notwendigen Messungen der Kompaktastärke der vorderen, hinteren und beiden seitlichen Wände wurden mittels einer Schublehre mit Nonius in Entfernung von Zentimeter zu Zentimeter im Verlaufe des ganzen Knochens vorgenommen.

Anatomie. Der Hauptmittelfußknochen, das Os metacarpale 3, Mc. 3, Vorderröhrbein, Röhre, ist ein echter Röhrenknochen. Seine Diaphyse hat eine dorsale, glatte, gewölbte Rücken-, eine volare Sohlenfläche und zwei abgerundete Seitenränder, die ich lieber als Seitenflächen bezeichnen möchte. Die von den meisten Anatomen als „fast eben" beschriebene volare Wand kann nach J. Hildebrandt (9) bald volar gewölbt, bald eben, bald sogar dorsal eingedrückt sein. Bezüglich dieses Verhaltens dürfte seiner Ansicht nach die Rasse der betreffenden Pferde eine Rolle insofern spielen, als die Metakarpalknochen der „Blutpferde" eine volar gewölbte, die der Kaltblüter hingegen eine ebene bzw. dorsal eingedrückte Hinterfläche besäßen. Bei volarer Wölbung gehen nach seinen Beobachtungen die Seitenränder mehr im Bogen (werden meines Erachtens also mehr Fläche), andernteils mehr eckig in die hintere Fläche über. Außerdem erweckt es den Anschein, als ob die rauhen, zur Anheftung der Griffelbeine dienenden Stellen bei dorsal gewölbter Fläche ausgehöhlt sind. Die von Hildebrandt hinsichtlich des Verhaltens der volaren Wand bei Kalt- und Warmblütern gefundenen, eben be-

schriebenen Unterschiede kann ich durch meine Untersuchungsergebnisse bestätigen.

An der dorsalen Fläche erhebt sich in der Nähe der proximalen Gelenkfläche die für die Anheftung der Sehne des M. extens. carp. rad. bestimmte Mittelfußbeule. An der volaren Fläche des äußersten proximalen Knochenendes befindet sich jederseits eine kleine Gelenkfläche zur Artikulation mit dem betreffenden Griffelbein. Das an der volaren Wand befindliche Ernährungsloch liegt nach meinen Untersuchungen regelmäßig 7—9 cm unterhalb der proximalen Gelenkfläche, also etwa am Uebergange des ersten zum zweiten Knochendrittel. Die mit dem Os carpale 2, 3, 4 artikulierende proximale Gelenkfläche wird durch eine am hinteren Teile jedes der beiden Seitenränder gelegene Bandgrube in eine vordere und hintere Region getrennt. Die distale Epiphyse bildet eine Gelenkwalze, welche durch einen stark vorspringenden Sagittalkamm in eine größere mediale und in eine kleinere laterale Gelenkfläche geteilt wird. Die laterale Gelenkfläche scheint nur bei ganz besonders fehlerhaften Stellungen mit ausschließlicher Belastung des lateralen Knochenteiles gegenüber der medialen Gelenkfläche größere Ausdehnung zu besitzen. Der volare Teil der Gelenkwalze artikuliert mit den beiden Gleichbeinen, während ihre vordere Region sich mit dem Fesselbein gelenkig verbindet. Seitlich von der Gelenkrolle findet sich je eine rauhe Bandgrube, über der sich jederseits ein „Epikondylus", Bandhöcker, erhebt. Ueber jenem wieder zeigt sich eine als „Parepikondylus" bezeichnete Anschwellung der Seitenränder. Von diesen Parepikondyli aus ziehen an der volaren Fläche des Knochens je eine niedrige Knochenleiste schräg nach aufwärts, um sich etwa am Uebergang des mittleren zum unteren Drittel der Volarwand in deren Mittellinie zu schneiden. Auf diese Weise wird am distalen Teil der volaren Wand ein mehr oder weniger deutliches Dreieck begrenzt. Auf eine genauere Beschreibung der beiden Griffelbeine erübrigt es sich meines Erachtens hier einzugehen, da dieselben wegen ihres rudimentären Verhaltens gegenüber dem Hauptmittelfußknochen auf die Beziehung dieses zur Statik und Mechanik einen nennenswerten Einfluß nicht ausüben.

Von den im Verlaufe des Metakarpus sich befindlichen Faszien, Sehnen und Bändern sind zu erwähnen:

1. Die Fascia superficialis, welche, von den oberen Schultergliedmaßenteilen kommend, im Bereiche des Metakarpus als dünnes Blatt mit der unter ihr liegenden Fascia profunda verschmilzt.

2. Die ebenfalls von den oberen Gliedmaßenteilen kommende Fascia profunda setzt sich von der lateralen Karpusseite aus in Form einer 2—3 Finger breiten, starken, aber nicht scharf begrenzten Sehnenplatte schräg auf den Metakarpus fort und tritt an die Sehne des Musc. ext. dig. lat. und, von hier aus sich verbreitend, an die Sehne des M. ext. dig. comm. und verbindet sich mit der sehr dünnen, den übrigen Teil des Metakarpus überziehenden Fascia, die sich zehenwärts allmählich fast ganz verliert. An der Beugeseite des Karpus bildet die Fascia profunda das mehrere Millimeter dicke Bogenband der Vorderfußwurzel, Lig. transversum carpi, welches sich ohne Grenze noch auf die proximale Hälfte der volaren Fläche des Metakarpus fortsetzt, wo es sich von einem Griffelbein zum anderen ausspannt und die Beugesehnen in der Lage erhält. Zehenwärts schwächer werdend, verliert es sich bald ganz.

3. Die Sehnen des Musc. ext. dig. comm., ext. dig. lat., flex. dig. ped. prof., flex. dig. ped. subl. und Musc. inteross. medius, sowie das Unterstützungsband des Hufbeinbeugers.

4. Die die Verbindung zwischen Metakarpus und den Karpalknochen vermittelnden Bänder.

5. Die seitlichen Fesselbeinbänder und die übrigen am Fesselgelenk befindlichen Bandapparate.

Statik und Mechanik.

Jede Substanz setzt der durch eine äußere Gewalt erstrebten Aenderung ihres Aggregatzustandes einen gewissen Widerstand entgegen, welcher als „Kohäsion oder Festigkeit" bezeichnet wird. Je fester in einem Element die Moleküle aneinander haften, einer um so größeren Kraft wird es demnach bedürfen, um eine Aenderung dieses Aggregatzustandes zu bewirken. — Will man zwei Punkte, welche durch zwischen ihnen wirkende Kräfte in ihrer gegenseitigen Lage erhalten werden, voneinander entfernen, so werden sie je nach der Dichtigkeit des betreffenden Körpers diesem Bestreben einen gewissen Widerstand entgegensetzen, den Zugwiderstand = absolute Festigkeit.

Sucht man hingegen die beiden Punkte in Richtung ihrer Verbindungslinie einander zu nähern, so muß man den Druckwiderstand = rückwirkende Festigkeit des Körpers überwinden, d. h. man beansprucht also den Körper entweder auf Druck oder, im ersten Falle, auf Zug.

Selbstverständlich kann diese Zug- resp. Druckbeanspruchung in den verschiedensten Richtungen erfolgen. Immer aber bleibt der Akt selbst ein Zug oder Druck. Eine neue Art der Entfernung der gedachten Punkte voneinander entsteht erst, wenn man sie auf einer zur Verbindungslinie senkrecht stehenden Bahn, welche man in den zu bewegenden Punkten errichte, gegeneinander fortzubewegen sucht. Dann entsteht die sog. Schiebung, Scherung, Abscherung. Die gegen den Schub sich geltend machende Kraft des Körpers ist die Schub- oder Scherkraft. Die beiden weiter möglichen Beanspruchungsarten sind nicht wie die ersten drei Grundarten einfacher Form, sondern setzen sich aus diesen zusammen. Es sind dieses die Drehungsbeanspruchung = Beanspruchung auf Torsionsfestigkeit, welche, weil in der vorliegenden Arbeit nicht in Betracht kommend, nicht näher erörtert werden soll, und fünftens die Beanspruchung auf Biegungsfestigkeit = relative Festigkeit. Letztere setzt sich vornehmlich aus Zug und Druck zusammen. Denn wenn man bei einem wagrechten, an einem Ende befestigten Balken am anderen Ende einen Druck aus-

übt, so wird bei der dadurch entstehenden Biegung die untere konkave Hälfte ein Zusammendrücken der einzelnen Teile, die obere konvexe hingegen eine Zerrung erfahren. Da aber, wo Druck und Zerrung ineinander übergehen, wird sich eine Zone finden, in der weder Zug noch Druck stattfinden; diese Zone hat man als neutrale Faserschicht bezeichnet.

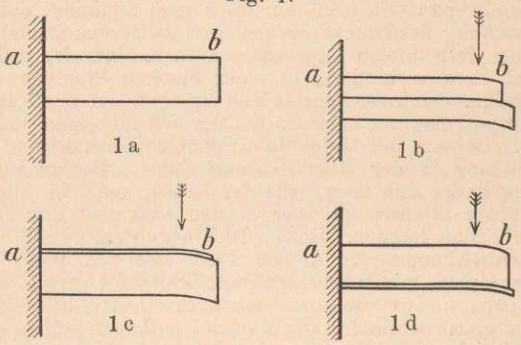
Es sei mir gestattet, die bei der Druck- resp. Zugbeanspruchung sich abspielenden Vorgänge an dem von Roux (27) angeführten Beispiel zu erklären. Uebt man auf einen elastischen Würfel an zwei gegenüberliegenden Flächen einen Druck aus, so wird jener in der Druckrichtung verkürzt, in der senkrecht zu ihr stehenden Richtung hingegen dicker. Es muß mithin bei dem stattgehabten Druck nicht bloß sich eine Beanspruchung auf Druck in der Druckrichtung, sondern auch eine solche auf Zug, also auf Entfernung der Moleküle voneinander, senkrecht zur Druckrichtung eingestellt haben. Das Zustandekommen dieser Zugbeanspruchung kann man sich erklären, wenn man annimmt, daß die Moleküle bei Ausübung des Druckes gegen- und zwischeneinander geschoben werden, dabei aber infolge ihrer eigenen Expansivkraft, welche ein zu starkes Sichnähern verhindert, in einer anderen Richtung wieder abgestoßen werden. Ein umgekehrtes Bild entsteht, auf analogen Ursachen beruhend, wenn man an dem elastischen Würfel einen beiderseitigen Zug ausübt. Der auf die Moleküle ausgeübte Druck kommt am stärksten zur Geltung in der Druckrichtung selbst. Der gleichzeitig entstehende Zug findet sich zwar, wie der Druck, auch in allen anderen Richtungen, am intensivsten aber in den senkrecht zur Hauptdruckrichtung stehenden Bahnen. Solche Richtungen stärkster Uebertragung von Gewalteinwirkungen, in diesem Falle also von Druck- und Zugkräften, nennt man, wie früher erwähnt, Trajektorien, Zug- oder Drucklinien, und würde man nun z. B. einen Würfel zu statischen Zwecken mit einem Minimum von Material aufbauen sollen, so brauchte man das Material nur in den eben beschriebenen Linien stärkster Kraftübertragung anzuordnen, um dem Würfel für einen gewissen Grad von Druck oder Zug genügende Festigkeit zu geben. Ueber die Zahl der anzubringenden Trajektorien würde natürlich die Stärke des Elementes einerseits und die Höhe der Beanspruchung anderseits entscheiden.

Schwieriger als die eben besprochenen Vorgänge bei Druck- und Zugbeanspruchung an statischen Elementen gestalten sich die Verhältnisse bei Inanspruchnahme auf Biegungsfestigkeit. Zur Erklärung der bei der Biegung sich abspielenden Vorgänge sei ein einfacher Balken, der an einem Ende mit einer gewissen Last auf Biegung beansprucht werde, angeführt. Unter einem Balken versteht man nach der Culmannschen Definition einen Körper, der durch Bewegung einer ebenen Figur in der Art erzeugt wird, daß der Schwerpunkt der Figur eine kontinuierliche Bahn bildet, und die Figur selbst dabei immer senkrecht auf dieser Bahn stehen bleibt; die Bahn des Schwerpunktes wird dann zur Balken-

achse. Wie eingangs erwähnt, setzt sich die Biegung zusammen aus einer Kombination von Druck und Zug auf entgegengesetzten Seiten. Da, wo Druck und Zug ineinander übergehen, wo also gar keine Druck- und Zugkräfte wirken, befindet sich die neutrale Faserschicht.

Außer diesen Druck- und Zugspannungen machen sich am gebogenen Balken jedoch auch noch andere Widerstände geltend. Bei der Biegung nämlich treten Kräfte auf, welche sämtliche Balkenquerschnitte, somit auch jeden Punkt des einen gegen einen Punkt des anderen Querschnittes zu verschieben streben. Es sind dies die früher genannten Scherspannungen. Im Gegensatz zu dem ständigen Abnehmen der Druck- resp. Zugspannungen nach der neutralen Ebene hin werden nach Culmanns Berechnungen diese Scherspannungen nach der neutralen Ebene zu immer stärker. Während sie an der Balkenoberfläche gleich Null sind, kommen sie in der neutralen Ebene am meisten zur Geltung. „Um

Fig. 1.



es sich anschaulicher zu machen," sagt Wolff, „daß die scherenden Kräfte in der Nähe der neutralen Schicht am stärksten sein müssen, denke man sich einen geraden Balken a b, der bei a befestigt und bei b belastet sei, genau in der Mitte (der neutralen Faserschicht) eingesägt. Infolge der Einsägung wird die Schubspannung im Längsschnitt keinen Widerstand mehr finden, und die untere Balkenhälfte wird sich bei der gemeinsamen Biegung gegen die obere um ein Stück verschieben; dies Stück wird aber offenbar sehr viel kleiner ausfallen, wenn der Balken durch einen der oberen oder unteren Balkenfläche sehr nahen Längsschnitt in zwei sehr ungleiche Teile zersägt wird" [vgl. Fig. 1 (1a bis 1d)].

Culmanns Berechnungen ergaben, daß die scherenden Kräfte auch in den Richtungen größten Zuges und Druckes gleich 0 sind. (Die Richtungen größten Zuges resp. Druckes an einem auf Biegung beanspruchten Balken kann man sich selbstverständlich ebenso als Linien denken wie an dem vorher als Beispiel angeführten Würfel.) Wenn man mithin den Balken in den Richtungen der Druck- und Zuglinien teilweise

einsägte, so würde trotzdem ein Vorbeigleiten der Schnittflächen gegeneinander nicht erfolgen, weil eben in diesen Richtungen stärkster Krafteinwirkung keine Schiebekräfte vorkommen. Es würde ein solcher für Biegungsbeanspruchung bestimmter Körper, wenn man zwecks Materialersparnis ihn in Form von Stäben, welche in Richtung stärksten Druckes und Zuges verlaufen, aufbaute, ebensoviel Widerstand leisten wie ein solider Gegenstand, weil eben die außerhalb der Maximaldruck- und Zugrichtung vorkommenden hinderlichen Scherspannungen völlig dadurch beseitigt wären. Für diese Zug- und Druckkurven gelten aber nach der graphischen Statik folgende Grundsätze (34):

„1. Es ist in diesen Kurven der Druck oder Zug nicht konstant, sondern nimmt von einem Ende bis zum anderen ab.

2. Die Kurven stehen da, wo sie die Minima der Maximaldruck- resp. Maximalzugspannungen andeuten, normal zur neutralen Achse und zu den Fasern des Balkens. Dies ist der Fall an den Endpunkten der Kurven, wo sie am meisten auseinandergefaltet sind. Dagegen sind sie da, wo sie die Maxima der Zerrungen und Pressungen andeuten, parallel zur neutralen Achse und zueinander. Dies ist der Fall an den Anfangsteilen der Kurven, nahe der Stelle der Einmauerung des Balkens, da, wo die Linien zugleich am dichtesten beieinander stehen.

3. Die Kurven schneiden die neutrale Achse unter Winkeln von 45°, während sie sich unter sich rechtwinklig schneiden.

4. Es finden in Richtung dieser Kurven keine scherenden Kräfte statt.“

Je nach Richtung der einwirkenden Kraft werden also die Trajektorien einen verschiedenen Verlauf nehmen. Wolff gelang es, zum Beweis für den mathematischen Aufbau des Knochens alle diese notwendigen Eigentümlichkeiten der Trajektorien aufs genaueste an der Spongiosa und Kompakta des oberen menschlichen Femurendes darzulegen. Alle anderen, die ihm folgten, vermochten ebenfalls an anderen Skelettteilen deren Aufbau nach statisch-mechanischen Grundlagen zu erklären. Danach ist die Kompakta, welche man nun nicht mehr als eine besondere Substanz, sondern nur als eine bestimmte Region der Spongiosa anzusehen hat, nichts weiter als die durch den fern von der Belastungseinwirkung bedingten, gedrängt parallelen Verlauf der Spongiosatrajektorien entstandene Knochenmasse zu betrachten. An jedem Röhrenknochen sieht man, daß die Markhöhle, jene Stelle also, wo eine Anlagerung von Knochensubstanz statisch völlig überflüssig, wenn nicht gar schädlich wäre, sich stets da befindet, wo die Knochenwände, die Kompaktae, am stärksten gebaut sind, d. h. da, wo die auf den ganzen Knochen von oben und

unten her einwirkenden Außenkräfte am stärksten zur Geltung kommen, sich konzentrieren. Gleichsam wie sich hier die Außenkräfte konzentrieren, so scharen sich hier auch die Spongiosabälkchen in parallelem Verlauf dicht zur Kompakta zusammen. Und durch alle diese Einrichtungen erhält der Knochen einen genügenden Umfang zwecks Anheftung der Sehnen, Anlagerung von Muskeln, und bekommt anderseits bei einem Minimum von Materialaufwand dennoch die höchste Leistungsfähigkeit für entsprechende Beanspruchung. „Nachdem wir diese Eigenschaften der Druck- und Zugkurven kennen gelernt haben," sagt Wolff (34), „ist es klar, daß wir aus diesen Kurven die Größe und die Art der Inanspruchnahme eines jeden Elementes des belasteten Körpers herauslesen können. Oder da, wie wir gesehen haben, den Spannungen, welche die äußere Kraft veranlaßt, 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." Kurz, die Veränderung der physiologischen Beanspruchung des Metakarpus muß sich in einer Umänderung seiner inneren Struktur geltend machen.

Die bisher gegebenen, das Gebiet der Statik und Mechanik betreffenden Erläuterungen würden für die Deutung des statisch-mechanischen Baues der Knochen im allgemeinen genügen. Für die Erklärung der Beziehungen des Metakarpus als eines längeren Röhrenknochens zur Statik und Mechanik ist aber eine Vorausschickung gewisser Grundsätze, welche sich auf Stäbe oder Röhren beziehen, noch nötig.

Die früher erläuterten Druck-, Zug- und Biegungsbeanspruchungen kann man, wenn sie an Stäben oder Röhren auftreten, etwa folgendermaßen einteilen:

1. Reine Normalpressung (Druck oder Zug). Kraftrichtung und Stab fallen zusammen.
2. Reine Biegung (jeder Stabquerschnitt wird teils gedrückt, teils gezerrt).
3. Kombinierte Normal- und Biegungsspannung.

Also sowohl Normalpressung als auch Biegungsbeanspruchung. Dabei werden die Normalspannungen, also Druck-

oder Zugspannungen durch die Biegungsspannungen auf der einen Seite vermehrt, auf der anderen vermindert.

Sollen an einem für kombinierte Beanspruchung, also für Normalspannung und Biegungsspannung bestimmten Rohr die in der Beanspruchungsebene liegenden Wandpressungen nicht verschieden groß, sondern gleich stark ausfallen, so ist auf der Seite, an der sich die Zahlenwerte addieren, mehr Material erforderlich.

Bei gedrückten Stäben besteht neben der Gefahr der Ueberbeanspruchung die Gefahr des Einknickens. Zur Verhinderung dieses Einknickens ist das gleiche Material um so wirksamer, je weiter es vom Querschnittsschwerpunkte entfernt ist. Beispielsweise ist also der Kreisring bedeutend günstiger als der Kreis bei gleicher Fläche.

Eigene Untersuchungen.

In dem nunmehr zu besprechenden Hauptabschnitte sollen der Reihe nach zunächst die Beziehungen des Metakarpus als ganzen Gebildes, speziell der Bau der Kompaktae und ihre Beziehungen zur Statik und Mechanik bei regelmäßiger Stellung besprochen werden. Sodann sollen der Verlauf der Spongiosa des Metakarpus regelmäßiger Stellung und deren Beziehungen zu den mechanischen Leistungen des Knochens eingehend erörtert werden. Zum Schlusse ist die Architektur sowohl der Wände als auch der Spongiosa der Metakarpen unregelmäßiger Stellungen zu berücksichtigen. In den folgenden Kapiteln werde ich versprengt noch verschiedene Literaturangaben bringen. Wie schon früher erwähnt, tue ich dies deshalb, damit der einführende Abschnitt über Geschichte und Literatur nicht durch Einzelheiten verworren wird, und weil eine Betrachtung der vorkommenden Literaturangaben sich im Anschluß an die betreffende Beschreibung des Metakarpus leichter ermöglichen läßt.

I. Die Beziehungen des Metakarpus als ganzen Knochens, speziell das Verhalten der Kompakta und ihre Beziehungen zur Statik und Mechanik.

Was das Verhalten des Metakarpus als ganzes Gebilde anbelangt, so ist zu bemerken, daß der Knochen infolge des größeren Umfanges der Epiphysen und beiderseitigen Gelenkenden wie jeder Röhrenknochen im Bereiche der Diaphyse, also der eigentlichen Röhre, des Mittelstückes,

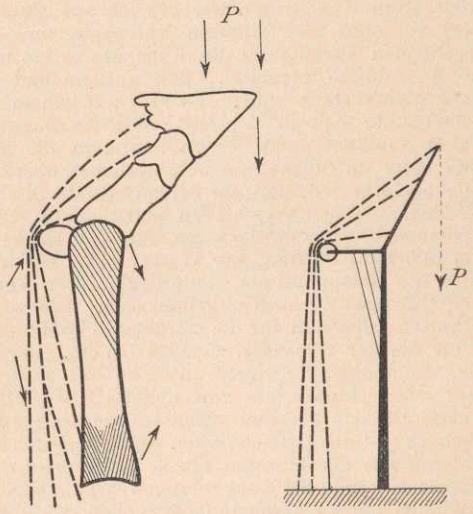
einen schlankeren Bau aufweist. Durch diesen größeren Umfang der Gelenkenden erscheinen die Metakarpuswände, namentlich die laterale und mediale, in ihrem Verlaufe entsprechend eingebogen. Es ist dies an den Röhrbeinen der leichten, warmblütigen Pferderassen mehr der Fall als an denen der schweren Kaltblüter. Wenn auch bei letzteren besonders die vordere, aber auch die beiden seitlichen Wände bedeutend steiler stehen als die gleichen Wände an den Laufpferdmetakarpen, so weisen sie doch einen gewissen Grad von Einbiegung in ihrem Verlaufe auf. Stets ist bei beiden großen Rassen die mediale Wand mehr eingebogen als die laterale. Als Grund dafür, daß die Metakarpuswände der edlen Laufpferde stärker eingezogen erscheinen, besser gesagt, daß die Röhrbeinepiphysen sich umfangreicher bei diesen Tieren entwickeln und die Diaphyse dadurch umso schlanker, eingeschnürter gestalten, gibt Kraemer die verschiedene Art der Aufzucht beider Rassen an. Da der Warmblüter von Jugend auf möglichst an schnelle und ausgiebige Bewegung gewöhnt werde, so werde dadurch eine besonders starke Beanspruchung der am proximalen und distalen Gelenkende des Röhrbeines ansetzenden Bänder bedingt; und durch diesen stärkeren, von seiten der Bänder an den Enden des jugendlichen, noch elastischen, dehnbaren Knochens ausgeübten Zug würde die Epiphyse umfangreicher, die Diaphyse hingegen schlanker gestaltet als die gleichen Knochenteile der mehr in Ruhe aufgezogenen Kaltblüter. Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, zu entscheiden, ob diese Erklärung Kraemers für den Unterschied in der äußeren Form der Schritt- und Laufpferdmetakarpen zu Recht besteht. Nach Kraemers Ansicht ist der Umstand, daß die Wände des Kaltblüterkarpus steiler stehen als die der Warmblüterröhrbeine, sogar günstig, weil durch dieses Steilerstehen die Wände eine größere, von oben eintreffende Last zu ertragen imstande seien. Wie allgemein bekannt sein dürfte, hat die an den Röhrenknochen sowohl der Lauf- als auch der Schrittpferde vorkommende, mehr oder weniger ausgeprägte, aber immer vorhandene Einbiegung der Wände den Zweck, dem Knochen eine größere Elastizität zu verleihen, den Gang des Pferdes speziell also federnder zu gestalten. Und so ist es wohl auch erklärlich, daß die Metakarpalknochen der Warmblüter, der Laufpferde in der Mitte schlanker erscheinen, ihre Wände — auf dem Sagittal- resp. Frontalschnitt — also mehr eingebogen verlaufen, weil diese eben beim Laufen, namentlich beim Sprunge einer größeren Elastizität des Knochens bedürfen. Die Einbiegung vollzieht sich nicht an allen vier Wänden gleich stark. Mediale und laterale Wand sind besonders betroffen und zeigen die schon vorher erwähnte Konstanz. Die Volarwand kann sich, weil sie bald dorsal, bald volar gewölbt, bald eben erscheint, in ihrem ganzen Verlauf entsprechend mehr oder weniger oder gar nicht eingebogen zeigen. Das unterste Viertel der volaren Wand verläuft fast stets mit einer nach vorn konvexen Biegung. Ueber die vordere Wandkrümmung gibt Eichbaum (6) an, daß auf Sagittalschnitten (durch die Knochenachse gelegt) die äußere Kontur der dorsalen Wand stets nach vorn konkav verlaufe, während die äußere Kontur der volaren Wand in den oberen Dreivierteln nach hinten konvex gebogen sei, und daß dadurch der ganze Knochen in seinem Verlaufe eine nach vorn konkave Krümmung annehme. An den Sagittalschnitten der meisten von mir untersuchten Warmblütermetakarpen ist dies auch namentlich hinsichtlich der Außenkontur der dorsalen Wand der Fall. Es ist dieses ja auch für die Beanspruchung des Metakarpus günstig, weil beim Laufpferd die Hauptbeanspruchung des Knochens sich vornehmlich in sagittaler

Richtung abspielt und der Metakarpus in dieser Richtung daher eine besondere Elastizität aufweisen muß. Da aber die volare Wand durchaus nicht den gleichen Verlauf zu nehmen braucht wie ihre gegenüberliegende, so habe ich oft eine konkave Krümmung des ganzen Knochens in seinem ganzen Verlaufe vermißt. Bei Sagittalschnitten von Vorderröhrbeinen mehrerer sogar sehr edler Ostpreußen fand ich diese von Eichbaum angegebene nach vorn konkave Biegung selbst der dorsalen Wand, geschweige denn des ganzen Knochens nicht vor. Die dorsale Wand zeigt oft eine in den oberen Dreivierteln ihres Verlaufes ganz gerade, höchstens durch das Tuberculum extensorium konkav vorgetäuschte Richtung (vgl. Taf. I, Fig. 1), welche im unteren Viertel in eine, der volaren Wand entsprechende, nach vorn konvexe Biegung übergeht. Vollends beim Kaltblüter pflegt die vordere Wand fast stets beinahe steil zu stehen und der Knochen selbst eine Krümmung nach vorn nicht aufzuweisen. Der Grund, weshalb ich auf diese Krümmungsverhältnisse der vorderen und hinteren Kompakta und der eventuell daraus hervorgehenden Verbiegung des Knochens selbst näher einging, ist folgender: Man dürfte vermuten, daß vordere und hintere Metakarpuskompakta gleich stark sind, daß also auf einem Knochenquerschnitte die Markhöhle sich in der Mitte des Knochenringes befinde. Es ist dieses aber durchaus nicht der Fall, sondern die vordere Wand ist der volaren stets an Stärke um beträchtliches überlegen. (Gleich an dieser Stelle bemerke ich, daß die beiden Wände in ihrem Verlaufe an den verschiedenen Stellen verschieden stark sind.) Die von Eichbaum angegebenen Durchschnittszahlen für die stärkste Stelle der dorsalen Wand (8,5 mm) dürften, wie Wolter (37) bereits betont, zu niedrig, die für die entsprechende Stelle der volaren Kompakta angegebenen Zahlen (7,5 mm) zu hoch gegriffen sein. Die von mir gefundenen Durchschnittszahlen sind für die stärkste Stelle der dorsalen Wand etwa 1,1 cm, für die der volaren Kompakta 0,6 cm. Der Grund dafür, daß die vordere Kompakta die volare an Dicke übertrifft, ist nun nach Eichbaum (6) der: „Eine Linie von der tiefsten Stelle der oberen Gelenkfläche nach abwärts gezogen schneidet die Rolle an den unteren Enden des Knochens an ihrer tiefsten Stelle, verläuft jedoch im Mittelstück näher der vorderen wie der hinteren Fläche, also vor der Achse, des Knochens. Hiernach würde die Last vorzugsweise die vordere Abteilung in Anspruch nehmen und zu komprimieren suchen, während die hintere gedehnt wird.“ Daß bei der Inanspruchnahme des Metakarpus in sagittaler Richtung die dorsale Wand wirklich auf Druck, die volare dagegen auf Zug beansprucht wird, will ich später zu bestätigen versuchen. Meines Erachtens gilt aber der von Eichbaum angeführte Beweis nur für den Metakarpus, der in seinem Verlauf die als stets vorkommend angenommene Krümmung zeigt, der Beweis gilt aber nicht für einen geraden Mittelfußknochen. Denn wenn sich, wie ich gefunden habe, diese Krümmung nicht zeigt, so fällt die gedachte Linie mit der Knochenachse zusammen, demnach würden dann vordere und hintere Knochenhälfte in gleicher Weise auf Druck beansprucht werden, und ein Stärkersein der dorsalen Wand wäre dann nicht recht erklärlich. Trotzdem aber zeigt sich auch an ganz geraden Metakarpen die vordere Wand auf dem Sagittalschnitte auffallend stärker als die volare Wand. Der Grund für dieses Verhalten muß daher ein anderer sein. Eine auf gerade wie gebogen verlaufende Vorderröhrbeine anwendbare, leichter verständliche Erklärung für die Beanspruchung des Metakarpus in sagittaler Richtung gibt die Annahme von Zschokke (39, S. 88),

daß die untere Gliedmaße als Kran zu betrachten sei. „Es genügt ein Blick auf den Bandapparat des Unterfußes, um sich zu überzeugen, daß die Gelenke daselbst vornehmlich durch die Beugesehnen getragen und fixiert werden.“ „Denkt man sich nun den Unterfuß so umgedreht, daß das Hufbein nach oben zu liegen kommt, so erhält man im allgemeinen das Bild eines Krans, bei welchem die Druckseite durch Knochen, die Zugseite durch Bänder (Sehnen) dargestellt ist. Am Hufbein hängt die Last des Körpers.“

Genau genommen erfährt freilich die Annahme eines Kranes insofern eine Einschränkung, als am Boden infolge von Reibung noch wagerechte Kräfte auftreten müssen, um Gleichgewicht zu erhalten. Diese sind aber so unwesentlich, daß sie den Vergleich des Unter-

Fig. 2.



fußes mit einem Kran nicht umzustoßen vermögen. Das obenstehende Schema, Textfigur 2 zeigt, wie man sich den Vergleich der Vordergliedmasse mit einer Krankonstruktion ungefähr vorzustellen hat. Danach stellt freilich der ganze Metakarpus die Druckseite dar. Da jedoch im Fesselgelenk sowohl die durch Metakarpus, Fesselbein, Kron- und Hufbein gehende Knochenachse, als auch der Beugesehnenverlauf eine Winkelung erfährt, so wird sich bei der Belastung der Gliedmaße offenbar am unteren Ende des Metakarpus, also im Fesselgelenk, da, wo die Sehnen über die Sesambeine gehen, ein starker Druck geltend machen, welcher bestrebt ist, den Balken (Metakarpus) nach vorn durchzubiegen. Bei dieser Einwirkung der Last wird die vordere Wand eine konkave, die hintere eine konvexe Biegung erfahren. Dann ist, wie bei der Erklärung der Vorgänge an einem auf Biegung beanspruchten Balken erläutert wurde, die vordere Metakarpushälfte lediglich auf Druck, die hintere auf Zug beansprucht. Die volare Kompakta wird aber nicht in genau der starken Weise auf Zug beansprucht, wie die dorsale auf

Druck. Bei Belastung der Gliedmaßen wird nach Schwyter (27) die Hälfte der Last im Fesselgelenk auf die Sehnen übertragen, an deneu sie sich als Zug geltend macht. Dadurch wird natürlich die Zugseite des Metakarpus fast ganz entlastet, theoretisch gedacht könnte sie sogar fehlen, jedenfalls kann sie deshalb auch bedeutend schwächer sein als die dorsale Wand, die einer solchen Unterstützung entbehrt. An dem Unterfuße wird also die Druckseite durch dorsale Wand, die Zugseite durch volare Wand + Sehnen dargestellt. Wenn schon hieraus hervorgeht, daß die vordere Wand des Metakarpus mehr auf Druck, als die hintere auf Zug beansprucht wird, so dürfte die geringere Beteiligung der volaren Wand an den mechanischen Leistungen des Vorderröhrbeins noch aus folgendem ersichtlich sein. Nach Raubers (23) Untersuchungen vermag Knochensubstanz mehr Druck als Zug auszuhalten. Wäre nun der bei der Beanspruchung des Metakarpus sich an der volaren Wand geltend machende Biegungszug ebenso groß, wie der an der dorsalen Kompakta stattfindende Biegungsdruck, so müßte die hintere Wand zum mindesten ebenso dick, wenn nicht dicker sein, wie die vordere Kompakta. Aus der Schwäche der hinteren Wand ersieht man daher, daß sie bei den mechanischen Leistungen des Metakarpus eine geringe Rolle spielt und ihre Funktion zum größten Teil von den Sehnen übernommen wird. Kurz zusammengefaßt: Der Metakarpus des Pferdes wird in sagittaler Richtung auf Biegung beansprucht, derart, daß die vordere Kompakta dem Biegungsdruck, die hintere dem Biegungszug ausgesetzt ist. Die volare Wand ist deshalb schwächer als die dorsale, weil bei der Biegungsbeanspruchung des Unterfußes in sagittaler Richtung der Biegungszug fast nur von den Sehnen aufgenommen wird.

Wie schon früher angedeutet, bleiben vordere und hintere Wand des Metakarpus in ihrem Verlaufe jede für sich nicht gleich stark. Beide Wände beginnen da, wo sie aus der Gelenkflächenkompakta des proximalen Gelenkes hervorgehen, mit einer Stärke von etwa 1 mm, nehmen dann ziemlich schnell zu, um fast stets in der Ebene des Ernährungsloches, also ca. 8 cm unterhalb der proximalen Gelenkfläche, ihre größte Dicke zu erreichen. Von hier aus werden sie dann wieder schwächer derart, daß sie am Uebergange in die Gelenkwalze wieder eine Stärke von 0,5—1 mm aufweisen. Dabei zeigt die volare Wand in ihrem ganzen Verlaufe eine ziemlich gleichbleibende Stärke, d. h. sie nimmt von ihrer nicht besonders scharf hervortretenden dicksten Stelle, namentlich im Bereiche der Markhöhle, nur ganz allmählich ab, während die dorsale Wand von ihrer deutlich hervortretenden dicksten Stelle sowohl proximalwärts als auch distalwärts ziemlich rasch schwächer wird. Erwähnen möchte ich noch, daß die volare Wand auf dem Sagittalschnitt bisweilen am Uebergange des mittleren zum unteren Knochendrittel eine nochmalige leichte Verstärkung erfahren kann, welche dann dadurch bedingt ist, daß die Schnittstelle der beiden an der volaren Wand befindlichen, wallartig sich erhebenden, früher beschriebenen Dreieckschenkel besonders stark hervortritt. —

Ich komme nunmehr zur Besprechung der medialen und lateralen Metakarpuswand und ihrer Beziehungen zur Statik und Mechanik (Taf. I, Fig. 2). An einem Frontalschnitte, der den Metakarpus der Länge nach in eine vordere und hintere Hälfte zerlegt, nimmt man wahr, daß die mediale Wand (wenigstens bei Tieren vom 2.—3. Lebensjahr ab) bedeutend stärker ist, als die laterale, daß mithin die Markhöhle des Knochens auf einem Querschnitt in der Mitte der Knochen-

länge auch in der Frontalebene nicht die Mitte des Querschnittes einnimmt, sondern mehr nach außen gelagert ist. Der Unterschied in der Stärke der medialen und lateralen Wand ist sehr verschieden. Als Durchschnittszahlen gibt Wolter an

für Schrittpferd	= medial:	11,89	mm
	lateral:	9,11	„
für Laufpferd	= medial:	10,98	„
	lateral:	8,63	„

Die von Wolter angegebenen Zahlen stimmen mit den Ergebnissen meiner eigenen Messungen fast überein. Die von mir gefundenen Durchschnittszahlen aufzuführen, halte ich daher für überflüssig. Wolter ist der Ansicht, daß die Wandunterschiede ganz individuell sind; ich selbst fand an einem Metakarpus der regelmäßigen Stellung eines Ostpreußen die mediale Kompakta gegenüber der lateralen so stark, daß die Markhöhle durch sie völlig nach der äußeren Hälfte des Knochens gedrängt war. Der Grund, weshalb die mediale Wand kräftiger gebaut ist als die laterale, ist, wie Eichbaum (6) sagt, folgender: „Die Tatsache, daß die Kompakta der medialen Wand überhaupt aller Knochen der Extremitäten stärker ist wie die der lateralen, läßt sich leicht durch den Umstand erklären, daß infolge der Lage der Schwerlinie des Körpers und der entweder medialwärts gelegenen Gelenkvorragungen resp. -vertiefungen oder der höher oder tiefer gestellten medialen Abteilungen der letzteren und der hiermit verbundenen stärkeren Belastung die Mittelkraft medial von der Knochenachse die Querschnitte des Knochens schneiden, die neutrale Achse also lateralwärts von derselben und damit weiter entfernt von der Innenwand gelegen sein muß. Die letztere muß daher in größerem Maße auf Druck wie die Außenwand auf Zug beansprucht werden.“ Hiernach wäre die Beanspruchung des Metakarpus in frontaler Richtung eine einfache Biegungsbeanspruchung, bei der die mediale Wand lediglich auf Biegungsdruck, die laterale auf Biegungszug beansprucht würde. Ohne den von Eichbaum angegebenen Grund für das allgemeine Stärkersein der medialen Knochenwand gegenüber der lateralen bezweifeln zu wollen, muß ich doch gestehen, daß die Beanspruchungsart des Metakarpus, wie sie Eichbaum für ihn und alle anderen Gliedmaßenknochen darlegt, nicht ganz so einfach sein dürfte. Es ist doch neben der reinen Biegungsbeanspruchung auch der von der Körperlast auf den Knochen einwirkende Normaldruck nicht zu vergessen. Dieser wird doch für sich den Metakarpus, speziell das Karpalgelenk überall gleichmäßig treffen müssen, wenn nicht Zerrungen der Karpal- und Fesselgelenksbänder an der Außenseite des Fußes entstehen sollen. Indem ich hier auf die in dem Kapitel über Statik und Mechanik angeführten Belastungsarten für Stäbe resp. Röhren hinweise, dürfte es wohl verständlich sein, daß der Metakarpus an sich in frontaler Richtung (also laterale und mediale Wand) durch die über ihm liegenden Gliedmaßenteile in erster Linie auf Normaldruck beansprucht wird, und daß hierzu noch infolge der Lage des Knochens außerhalb der Schwerlinie eine Biegungsspannung hinzukommt. Die Beanspruchung des Metakarpus in frontaler Richtung ist also eine „kombinierte Normal- + Biegungsspannung“. Wie nun an jenen Beispielen dargelegt wurde, daß da, wo sich die Spannungswerte addieren, eine Anlagerung von Material statthaben muß, falls nicht die Materialpressungen ungleich ausfallen sollen, so findet man auch an der medialen Wand des Metakarpus, wo zu dem Normaldruck

der Biegungsdruck hinzukommt, eine größere Knochenanlagerung vor. Und wie nun weiter an jener Stelle erklärt wurde, daß der Grad der Biegungsbeanspruchung abhängt von der jeweiligen Größe der Faktoren, in unserem Falle also Höhe des Körpergewichts oder Breite der Brust, so liegt die Vermutung nahe, daß bei verschiedenen Tieren die mediale Wand entsprechend der Größe des Produktes der Faktoren immer um einen bestimmten Grad die laterale Wand an Stärke übertrifft. Wenn freilich auch bei ein und demselben Pferd, wie Wolter sagt, die Anlagerung der Knochensubstanz um die Markhöhle an beiden Metakarpen sehr oft verschieden ist, so daß es oft schwer fällt, von demselben Tier die gleichen Bilder der Knochenquerschnittsringe beider Metakarpen zu erhalten, so spricht dieser Umstand meines Erachtens dennoch nicht gegen die Annahme, daß der Unterschied in der Stärke zwischen medialer und lateraler Wand von der Breite der Brust und dem (durchschnittlichen) Gewicht des Tieres abhängt. Denn die sehr oft vorhandene Verschiedenheit im Umfange beider Metakarpen eines Tieres wird doch sicher einen Unterschied in der Wandstärke beider Knochen mitbedingen. Wie gesagt, ist das Ganze nur eine Annahme, denn es ist wohl zweifelhaft, daß sich der Knochen so ganz genau mathematischen Berechnungen fügen wird. Denn schließlich ist doch einerseits das Gewicht des einzelnen Tieres Schwankungen unterworfen, anderseits wird der Knochen doch auch der Vorsehung halber so gebaut sein, daß er nicht nur der jeweiligen Körperschwere standzuhalten vermag, sondern auch bei unvorhergesehenen größeren Beanspruchungen vor einem Zerbrechen gesichert ist. Ein Hineinzwängen in mathematische genaue Formeln dürfte daher wohl ausgeschlossen sein. Ich bin jedoch zu der obigen Annahme gekommen auf Grund der Befunde an den zur Verfügung stehenden Metakarpen jüngerer und eben geborener Fohlen. Denn abgesehen davon, daß die Querschnittsfigur bei den jüngeren Fohlenmetakarpen kaum ellipsoid erscheint, sondern man eigentlich nur eine vordere gewölbte, hintere ebene Wand, mediale und laterale Kante unterscheiden kann, ist ein Unterschied in der Stärke der medialen und lateralen Wandbezirke kaum nachweisbar. Selbst an einem Metakarpus eines ½jährigen Fohlens waren mediale und laterale Kompakta noch gleich stark, und von dem Röhrbein eines 2jährigen Tieres war der Stärkeunterschied zwischen innerer und äußerer Wand noch bedeutend geringer als bei Metakarpen erwachsener Pferde. Geringes Körpergewicht und schmale unentwickelte Brust, d. h. geringerer Abstand zwischen den beiden Vordergliedmaßen, würden für diese Verhältnisse eine wohlannehmbare Erklärung bieten. — Der Verlauf der medialen und lateralen Kompakta ist, bis auf die stärkere Biegung der inneren Wand, auf dem Frontalschnitt derselbe. Beide Wände beginnen an dem oberen Gelenkende mit einer Stärke von etwa 0,5—1 mm, werden ziemlich schnell dicker, erreichen genau wie dorsale und volare Kompakta bei der regelmäßigen Stellung ihre größte Stärke in der Ebene des Ernährungsloches (oder wenigstens ganz in nächster Nähe derselben), um dann, freilich nicht so schnell wie die dorsale Wand, wieder distalwärts abzunehmen, bis sie an den Epikondyli eine Dicke von etwa 1 mm wieder erreicht haben. Dabei pflegt die mediale Kompakta, die, wie die laterale Wand, am Parepikondylus noch eine ziemliche Dicke besitzt, sich plötzlicher als die laterale in ihre ganze Spongiosa aufzulösen.

Alle vier Knochenwände haben also bei den Metakarpen der regelmäßigen Stellung fast durchweg ihre dickste Stelle in der Ebene des

Ernährungsloches, also etwa am Uebergange des oberen in das mittlere Knochendrittel. Kommen Ausnahmen vor, so handelt es sich höchstens um ein Herabdrücken auf einen Zentimeter. Man ist nun gewohnt anzunehmen, daß die Kompaktae der Röhrenknochen in der Mitte der Knochenlänge ihre größte Stärke besitzen. Anderseits wird zwar angegeben, daß bei ungleichem Wachstum der Epiphysen die dickste Stelle mehr nach dem oberen Ende, also oberhalb der Mitte zu liegen kommt und zwar dann sich in der Ebene des For. nutrit. befindet. Bei den Metakarpen unregelmäßiger Stellung trifft dieses Verhalten, wie später dargelegt werden soll, nicht zu. Da nun an den Metakarpen regelmäßiger Stellung sich ziemlich weit oberhalb der Knochenmitte die dickste Stelle der Knochenwände befindet, und die stärkste Stelle der Wand doch sicher der Ausdruck dafür ist, daß hier auch die stärkste Kraftäußerung bei der Beanspruchung des Knochens statthaben muß, so habe ich, aufmerksam gemacht durch ähnliche Berechnungen von H. Hirsch (12) über die Biegungsbeanspruchung der menschlichen Tibia, versucht, wenigstens bei der Biegungsbeanspruchung des Metakarpus in sagittaler Richtung nachzuweisen, daß an der erwähnten Stelle der dorsalen und volaren Wand wirklich die Biegungsbeanspruchung am größten ist. — Bei der Berechnung des Beanspruchungsgrades in den einzelnen Regionen des Metakarpus, namentlich bei der Ausrechnung der Biegungsmomente, bin ich von Herrn cand. math. Eberts aufs beste unterstützt worden, wofür ich ihm an dieser Stelle meinen besonderen Dank ausspreche.

Die Stellung, für welche die folgende Berechnung ausgeführt worden ist, ist eine von den vielen während der Gehbewegung sich abspielenden Phasen. Bei aufgehobenem und nach vorn geführtem anderen Vorderbein befindet sich die durch das Ellenbogengelenk auf die Gliedmasse wirkende Körperlast S lotrecht gerade noch über der Hufsohle des stützenden Beines. Es ist dies eine Stellung, bei der die Beanspruchung des Metakarpus sicher eine größere ist als bei ruhigem Stehen auf beiden Beinen (vgl. Textfigur 3).

Bei dieser Stellung nun wird der Radius in der Lage erhalten:

1. Durch die Schwerkraft S selbst.

2. Durch den Gegendruck C des Metakarpus (inkl. der Karpalknochen, die aber der Einfachheit halber nicht berücksichtigt wurden, weil sie als Knochen eines einachsigen Gelenkes gewissermaßen als Verlängerung des Radius oder Metakarpus angesehen werden können). Der Gegendruck C fällt, da Radius und Metakarpus in einer Richtung stehen, mit der Achse dieser Knochen zusammen.

3. Durch den Zug derjenigen Muskeln und Bänder, welche ein Ueberstrecken des Karpalgelenkes verhindern (Flexor carp. rad., Flexor carp. ulnar., Ext. carp. ulnar., Lig. carp. volare etc.). Diese Kräfte werden sich in einer Resultierenden zusammenfassen lassen, M.

S, C und M müssen, um sich Gleichgewicht zu halten, sich in einem Punkt schneiden; dieser Schnittpunkt ist gegeben durch die bekannten Richtungen von S und der Achse C.

An dem Zehenteil der Gliedmaße halten sich das Gleichgewicht:

1. Der Gegendruck, der vom Metakarpus auf Fesselbein und Sesambeine ausgeübt wird.

2. Der vom Erdboden ausgehende Gegendruck gegen die Sahwerkraft, welcher in Richtung und Größe natürlich gleich S ist.

3. Der das Fesselgelenk feststellende Beugesehnenzug, welcher bei der angeführten Stellung hauptsächlich von seiten des Interosseus und des Unterstützungsbandes der Hufbeinbeugesehne ausgeübt wird. Die Richtung dieses Zuges fällt bei seitlicher Betrachtung ungefähr mit der Richtung des Interosseus zusammen.

Auch hier müssen sich die drei Kräfte in einem Punkt schneiden, der gefunden wird durch den Schnitt von S und der in Richtung bekannten Resultante der Zugkräfte Z. Die Richtung des von Fessel- und Sesambein auf den Metakarpus ausgeübten Druckes ist dann das vom Schnittpunkt auf das Fesselgelenk gefällte Lot T.

Fig. 3.

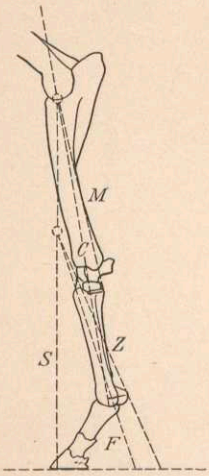
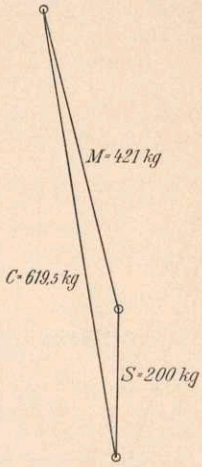


Fig. 4.



Auf den Metakarpus selbst wirken nun die vorhin angegebenen auf Radius und Zehenskelett wirkenden Kräfte; sie behalten dieselbe Lage und Größe, nur ihre Richtung ist umgekehrt.

Also: 1. Der Gegendruck C des Radius.
2. Die Resultierende M.
3. Der Sehnenzug Z.
4. Der Gegendruck des Fesselgelenkes F.

In der Textfigur 3 sind die Kräfte als Linien dargestellt worden. Die Kraft S ist vorläufig die einzig bekannte. Die Winkel, welche von den anderen Kräften mit S gebildet werden, können durch Messung festgestellt werden. Durch Antragen der bekannten Winkel, die C und M mit S bilden, und Messen der entstandenen Dreieckseiten sind C und M gefunden (Textfigur 4). In derselben Weise ist in Fig. 5 die Größe von Z und F berechnet worden. S ist gleich 200 kg angenommen. Der verschiedene Größenwert von S ändert zwar die Größe der anderen Kräfte, aber nicht ihr Verhältnis zueinander, weil die Winkel dieselben bleiben. Bei den Fig. 4 und 5 ist S = 200 kg = 4 cm, also 1 cm = 50 kg angenommen. Nach der oben angeführten Art ist aus Fig. 4 gemessen:

$$M = 8{,}42 \text{ cm} = 421{,}0 \text{ kg}$$
$$C = 12{,}39 \text{ „} = 619{,}5 \text{ „}$$

Aus Fig 5:

$$F = 19{,}17 \text{ cm} = 958{,}8 \text{ kg}$$
$$Z = 15{,}40 \text{ „} = 770{,}0 \text{ „}$$

In Fig. 6 sind die Kräfte der Richtung nach an die Achse angetragen und in ihre Komponenten senkrecht und parallel der Achse nach

Fig. 5.

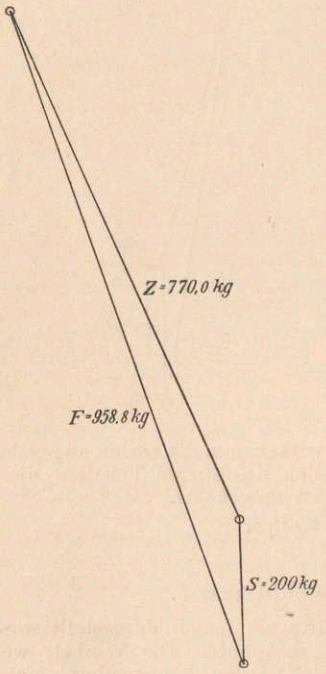
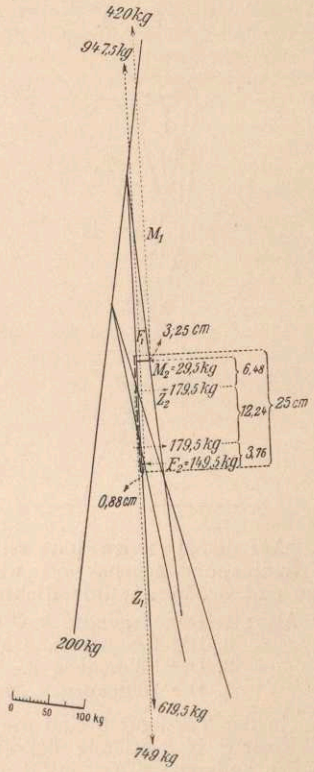


Fig. 6.



dem Kräfteparallelogramm zerlegt. Es ist gemessen, wenn die Indices $_1$ die parallel und $_2$ die senkrecht zur Achse stehenden Komponenten bedeuten:

$$M_1 = 8{,}40 \text{ cm} = 420 \text{ kg}$$
$$M_2 = 0{,}59 \text{ „} = 29{,}5 \text{ „}$$
$$F_1 = 18{,}95 \text{ „} = 947{,}5 \text{ „}$$
$$F_2 = 2{,}99 \text{ „} = 149{,}5 \text{ „}$$
$$Z_1 = 14{,}98 \text{ „} = 749{,}0 \text{ „}$$
$$Z_2 = 3{,}59 \text{ „} = 179{,}5 \text{ „}$$

Es müssen nun die Kräfte, die längs der Achse nach oben wirken, gleich denen sein, die nach unten wirken.

$$M_1 + F_1 = C + Z_1$$

$$\frac{420.0 + 947,5}{1367,5} = \frac{619,5 + 749,0}{1368,5}$$

(Die im Verhältnis zu den großen Zahlen kleine Differenz von 1 kg läßt sich aus der ungenauen Messung erklären, da nur Millimeter gemessen und $^1/_{10}$ mm geschätzt wurden. Die Differenz von 1 kg würde bei obigem Maßstab einen Fehler von 0,02 cm bedeuten, also von ganz geringem Werte sein. Er würde auf die acht nötiggewesenen Messungen nur 0,0025 cm pro Messung betragen.)

Ferner müssen die rechts auf die Achse wirkenden Kräfte gleich den von links wirkenden sein.

$$F_2 + M_2 = Z_2 \quad \frac{149,5 + 29,5}{179,0} = 179,5$$

(Der Fehler von 0,5 kg ist ebenso wie der früher zu erklären, er würde in den Messungen einen Fehler von 0,01 cm ergeben, pro Messung also 0,00166 cm.)

Schließlich müssen auch die Drehungsmomente gleich sein (die rechtsdrehenden gleich den linksdrehenden).

Drehungemomente = Kraft mal Hebelarm.

$$M_1 \times 3,25 \text{ cm} + F_1 \times 0,88 \text{ cm} = Z_2 \times 12,24$$

$$\frac{947.5 . 0,88 + 420 \times 3.25}{2,1988 \text{ mkg}} = 179,5 . 12,24$$

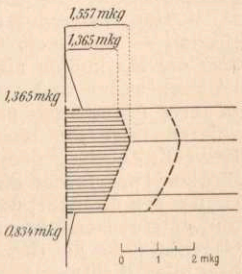
$$= 2,1971 \text{ mkg}$$

Differenz 0,0017 mkg.

Das Drehungsmoment $Z_2 . 12,24$ entsteht dadurch, daß die Kraft Z_2, entgegen der resultierenden Gegenkraft von $F_2 + M_2$, an einem Hebelarm 12,24 zieht.

(Der Ursprung des Interosseus liegt zwar nach den Angaben der Anatomie höher am proximalen Ende des Metakarpus. Wie man sich aber an der Gliedmaße des lebenden Tieres, besser aber noch an einer präparierten Gliedmaße, mit der Stellung von Fig. 3 überzeugen kann, verläuft die Richtung von Z_2 so, wie sie in Fig. 3 angegeben ist. Das wird bedingt durch die die Sehnen zwischen den Griffelbeinen in der Lage haltenden Bänder (Abschnitt: Anatomie: 1,2). Da außerdem der Interosseus am oberen Drittel des Metakarpus dicht anliegend mit ihm durch Bandmassen verbunden ist, so wird sich die Wirkung von Z schon am Uebergang vom ersten zum zweiten Drittel des Metakarpus am meisten geltend machen. Der Ansatzpunkt der Resultierenden von $M_2 + F_2$ ist dadurch gefunden, daß die Achse im entgegengesetzten Verhältnis der Kräfte F_2 und M_2 geteilt ist. In Fig. 7 sind die Biegungsmomente (Biegungsmoment = Last mal Abstand der Last vom betreffenden Querschnitt) für die einzelnen Metakarpusabschnitte als Abszissen eingetragen worden. Fig. 8 zeigt, in welcher Weise sich der Metakarpus, wenn er ein leicht biegsamer Körper wäre, biegen würde.

Fig. 7. Fig. 8.



Die Kurve deutet an, daß die Biegungsbeanspruchung des Knochens proximalwärts wächst. Soll der Metakarpus ihr also genügen, so muß er bei dieser Beanspruchung in sagittaler Richtung etwa am Uebergang des oberen zum mittleren Drittel die größte Stärke der Wände (der vorderen und hinteren) aufweisen. Daß dem so ist, haben die Untersuchungen der beiden Wände ergeben. Die dorsale und volare Wand sind in ihrem ganzen Verlaufe vom proximalen zum distalen Knochenende also so gebaut, wie die mechanische Beanspruchungsart in sagittaler Richtung es verlangt. Die entsprechenden Berechnungen für die laterale und mediale Wand habe ich deshalb nicht ausgeführt, weil ich annehme, daß bei der regelmäßigen Gliedmaßenstellung die stärkste Stelle der Inanspruchnahme für mediale und laterale Wand ebenfalls in der Ebene des For. nutrit. zu suchen ist, da die vom Radius auf den Metakarpus übergeleitete Kraftwirkung die mediale und laterale Kompakta ebenso in Richtung der Knochenachsen trifft wie die dorsale und volare Wand.

Kurz zusammengefaßt sind also sämtliche Wände des Metakarpus regelmäßiger Stellung in ihrem Verlaufe da am stärksten gebaut, wo

Fig. 9.

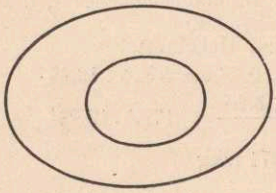
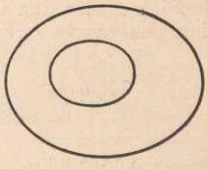


Fig. 10.



sich die Beanspruchung des Knochens sowohl in sagittaler als auch in frontaler Richtung am meisten geltend macht (in der Ebene des Ernährungsloches).

Die Beanspruchung des Metakarpus in sagittaler Richtung ist reine Biegungsbeanspruchung, und zwar erfährt die dorsale Wand Biegungsdruck, die volare Biegungszug. In frontaler Richtung wird der Knochen auf kombinierter Normal- und Biegungsspannung beansprucht. Die größere Stärke der medialen und dorsalen Wand gegenüber der lateralen resp. volaren läßt sich auf rein mechanische Ursachen zurückführen. — An einem Querschnitte in Mitte der Knochenlänge nimmt also die Markhöhle nicht die Mitte des Querschnittsringes ein, sondern ist nach außen und hinten verlagert. Die Knochenmasse selbst nimmt in ihrer Anlagerung um die Markhöhle also beim Warmblüter von der volaren über die laterale und dorsale nach der medialen Wand zu. Beim Kaltblüter, dem Schrittpferd, tritt die dorsale Wand in ihrer Stärke etwas hinter die laterale Kompakta, weil bei ihm die Beanspruchung des Metakarpus in frontaler Richtung bei dem schweren Zuge und entsprechend kreuzenden Gange die physiologisch stärkere ist, im Gegensatz zu der beim Laufpferd vorherrschenden Beanspruchung in sagittaler Richtung.

Außer der Anlagerung der Knochensubstanz um die Markhöhle verhält sich auch die äußere Form des Querschnittsringes bei beiden großen Rassen vollkommen so, wie sie für die mechanischen Leistungen des Metakarpus am vorteilhaftesten ist. Wie früher erwähnt, ist eine

Röhre um so eher gegen Knickgefahr gesichert, je weiter das Material von der Achse gelagert ist. Weil nun beim Kaltblüter die Hauptbeanspruchung des Metakarpus die in der Frontalebene ist, deshalb lagert sich in ihr die Knochenachse so, daß laterale und mediale Kompakta weiter von der Achse liegen, als dorsale und volare Wand. Die Form des Querschnittsringes ist daher ähnlich der Ellipse, der Knochen selbst erscheint abgeflacht (Textfigur 9 und 10). Dem gegenüber bildet der Querschnittsring des Laufpferdmetakarpus mehr die Kreisform, weil infolge der Hauptbeanspruchung in der Sagittalebene in dieser zur Verhütung der Knickgefahr die Wände, dorsale und volare, möglichst weit von der Achse wegrücken müssen. Die Compactae des Metakarpus sind also vollständig nach mechanischen Gesetzen aufgebaut.

II. Das Verhalten der Spongiosa des Metakarpus regelmäßiger Stellung und ihre Beziehungen zu den mechanischen Leistungen des Knochens.

Nachdem ich in dem vorhergehenden Abschnitte den statisch-mechanischen Bau der Metakarpuswände, wie ich glaube, eingehend erörtert habe, komme ich nunmehr zur Beschreibung der Spongiosa am Vorderröhrbein und zur Erklärung ihrer Beziehungen zu den mechanischen Leistungen dieses Knochens.

Der Spongiosaverlauf bietet im allgemeinen nichts besonders Bewundernswertes, sondern er ist verhältnismäßig einfacher Art und anderseits leicht erklärlich. Es mag dies daran liegen, daß der Knochen selbst in das Gefüge der Vordergliedmasse senkrecht zum Erdboden eingelagert ist und die ihn treffende Last im allgemeinen in Richtung seiner Achse einwirkt. Deshalb bietet sich die Spongiosa keineswegs so kompliziert und, ich möchte sagen, so interessant dar, wie etwa die an jenen so oft von den verschiedensten Autoren als Muster für den mathematischen Bau der Blättchensysteme angeführte Spongiosaarchitektur des menschlichen oberen Femurendes.

Die Spongiosa des Metakarpus tritt in zwei ganz verschiedenen Hauptsystemen auf. Das eine System zeigt sich in seinem Verlaufe deutlich an Frontalschnitten und ist das Aufblätterungsprodukt der medialen und lateralen Kompakta. Ueber das zweite, der dorsalen und volaren Metakarpuswand entstammende Hauptsystem erhält man naturgemäß einen klaren Ueberblick an Sagittalschnitten.

Frontalschnitt. An einem durch die Mitte des Knochens gelegten Frontalfurnierblatt hat man zunächst zu unterscheiden die Spongiosa des proximalen und die des distalen Endes des Metakarpus. Das proximale System verhält sich auf dem Frontalfournierblatt wie folgt (Taf. I, Fig. 2): Von der medialen und lateralen Kompakta steigen, ungefähr 6 cm unterhalb der proximalen Gelenkfläche beginnend, gerade, fast parallele Bälkchen schräg aufwärts, um nach der dünnen Kompakta der proximalen Gelenkfläche zu gelangen, an der sie ungefähr rechtwinklig enden. Die Abteilung des proximalen Systems, welche durch die allmähliche Aufblätterung der medialen Wand entsteht, ist nach meinen Beobachtungen gegenüber der aus der lateralen Kompakta hervorgehenden Bälkchengruppe nicht dichter gefügt noch weiter ausgebreitet, sondern beide schräg aufsteigenden Abteilungen haben gleich große Ausdehnung und treffen sich somit etwa in der Mittellinie des

ganzen Knochenschnittes. Die an den äußersten Enden beider Durae entspringenden Trajektorien ähneln mehr Knochenbälkchen, scheinen auch sowohl medial wie lateral enger aneinander zu stehen, während die mehr abwärts beginnenden und nach der Gelenkflächenmitte ziehenden Linien Schnitte von langen Knochenröhrchen darzustellen scheinen. Selbstverständlich sind diese Hauptzüge durch feine, senkrecht zu ihnen stehende Verbindungsbälkchen miteinander in Zusammenhang gebracht. Letztere lassen sich aber nur in der Nähe der Gelenkfläche als ein besonderes Maschenwerk nachweisen (Taf. II, Fig. 3), indem sie dort ein unter der Mitte der Gelenkfläche gelegenes kurzes, enggeschartes, parallel zur Gelenkkontur verlaufendes, nach außen sich schnell verlierendes Liniensystem bilden. Die mediale Abteilung des proximalen Systems pflegt $^1/_2$—1 cm tiefer als die laterale aus der eigenen Kompakta hervorzugehen. Die Erklärung dieses proximalen Spongiosaverlaufes ist sehr einfach. Die von den Wänden nach der proximalen Gelenkfläche ziehenden Trajektorien haben einfach die Bestimmung, gleichsam als Strebepfeiler den von seiten der Karpalknochen auf die proximale Gelenkfläche ausgeübten Belastungsdruck allmählich auf die Röhrwände zu übertragen, mit anderen Worten, den von seiten der Röhrwände ausgeübten Gegendruck auf alle Punkte der proximalen Gelenkfläche gleichmäßig zu verteilen. Die dicht an der proximalen Gelenkfläche senkrecht zu diesem Hauptsystem stehenden wenigen Linien zeigen sich deshalb nur in der Nähe der Gelenkflächen, weil sie mehr nach der Mitte des Knochens zu völlig überflüssig wären. Denn einerseits bekommt der Hauptdruck im Innern des Knochens eine größere Konstanz seiner Richtung als in der Peripherie. Es werden also im Knocheninneren die Seitenrichtungen weniger beansprucht. Deshalb ist die Stützsubstanz für die sekundäre Beanspruchung im Innern des Knochens, wenn sie vorkommt, meist auch nur trabekulös gebaut, da sie nicht so viel Kraft zu entfalten braucht. Ausgebildete Spongiosa tubulosa, Röhrenspongiosa, wie sie meines Erachtens am proximalen Teil des Metakarpus vorliegt, bedarf vollends anderseits im Innern des Knochens gar keiner Stützsubstanz für die sekundäre Beanspruchung, weil die Röhrchen einander stets berühren, nie allein stehen. Dicht unter der Gelenkfläche aber besteht namentlich an der tiefsten Stelle des Gelenkes die Gefahr, daß durch den Druck von oben her die Endigungen der Trajektorien auseinander gezerrt werden, infolge der hier noch starken sekundären Beanspruchung. Deshalb ist die Stützsubstanz hier zu einem kleinen besonderen System zusammengelagert. Und daß dieses winzige System eigentlich nur an der tiefsten Stelle der Gelenkfläche deutlich entwickelt ist, hat wohl seinen Grund darin, daß hier die Seitenzerrungen am meisten zum Ausdrucke kommen.

Der distale Spongiosabezirk des Frontalfurnierblattes nimmt die ganze untere Hälfte des Metakarpus ein, erstreckt sich also auf einen bedeutend größeren Raum als die Spongiosa des proximalen Knochenendes. Die Abblätterung der Kompakta zur Bildung dieses Systems beginnt meist beiderseits gleichzeitig, und zwar nach meinen Untersuchungen genau in der Mitte der Knochenlänge. Das Spongiosagefüge der unteren Metakarpushäfte ist nicht so einfach gebaut wie das proximale System. Während das proximale System nach H. v. Meyers Spongiosaabteilung einen einfachen „Längslamellentypus“ darstellt, dessen Basis die proximale Gelenkfläche bildet, haben wir es hier mit einem „gemengten“ Typus zu tun. Denn es schließen sich hier zwei ganz verschiedene Systeme zu einem Ganzen zusammen (besonders deut-

lich Taf. IV, Fig. 8). „Der gemengte Typus in dem Gelenkende langer Knochen entsteht dadurch, daß die Diaphyse den Längslamellentypus zeigt, die Epiphyse dagegen den Typus rundlicher Knochen. Gegen die Synchondrosenscheibe schließen sich beide Typen mit einer kompakten Platte und stützen sich in derselben aufeinander. Die strahlenförmig sich im Innern der Diaphysenröhre ablösenden, das Gelenkende stützenden Lamellen gehen nur bis zu der Endplatte der Diaphyse und hören mit dieser auf, so daß sie keine direkte Fortsetzung in die auf den Gelenkflächen stehenden Lamellen zeigen, sondern die Epiphyse als Ganzes stützen. In der Epiphyse selbst aber ist der innere Bau der rundlichen Knochen mit einer inneren intermediären Spongiosa zu erkennen, so daß sie imstande sind, in gleicher Weise von der Diaphyse wie von der Gelenkfläche her den Druck in sich aufzunehmen. Mit vollendeter Ausbildung des Knochens verschwindet die Synchondrosenscheibe, und es verwischt sich nun diese Trennung des Spongiosagefüges mehr oder weniger, ist aber immer noch deutlich zu erkennen.“ Diese von Eichbaum angegebene Meyersche Schilderung der Spongiosa der Gelenkenden langer Knochen, welche mit einer Epiphyse entstehen, stimmt fast vollkommen mit dem Verlauf der Spongiosa des unteren Metakarpusendes auf dem Frontalschnitt überein. Als Grundlage der beiden aufeinanderstoßenden Systeme dient also die Synchondrosenschreibe. An dem Metakarpus eines ½jährigen Vollblüters fand ich diese noch in Gestalt einer die ganze Epiphyse von der Diaphyse trennenden, gebogen verlaufenden, 1—2 mm dicken, knöchernen Platte vor. Bei 1—2 Jahre alten Pferden ist sie zumeist zurückentwickelt, daß sie nun nicht mehr eine feste Platte darstellt, sondern auf dem Furnierblatt als eine Brücke von dicht nebeneinanderstehenden Röhrchen in die Erscheinung tritt. Wie Roux angibt, wird die Platte von den darüberstehenden Trajektorien gewissermaßen durchstoßen. Ich habe diese Brücke auf dem Furnierblatt immer deutlich beobachten können. Sie zeigt nicht einen ebenen Verlauf, sondern hat ungefähr die Gestalt einer Schreibklammer, indem sie, von dem medialen Epikondylus beginnend, erst einen nach unten konvexen Bogen bildet, der mit einem gleichen, vom lateralen Epikondylus kommenden Bogen sich genau in der Mittellinie des Knochens normaler Stellung in einer Spitze schneidet. In einer Abhandlung über die mechanologische Erklärung der Schlankheit des Warmblüterröhrbeines verbreitet sich Kraemer ausführlicher über diese „Brücke“. Nach seiner Meinung ist sie nicht lediglich der Ueberrest des früheren Fugenknorpels, sondern sie ist vornehmlich zu erklären als eine durch Zug der an den Epicondyli ansetzenden Bänder entstandene Zusammendrängung des Spongiosagewebes. Unter den von ihm für diese Annahme aufgestellten Beweisgründen möchte ich nur den folgenden anführen. Kraemer meint, daß, wenn die Brücke wirklich nur die verknöcherte Fuge wäre, sich diese Verdichtung der Spongiosa auch im Horizontalschnitte auf der ganzen Fläche der Spongios abzeichnen müßte. Ferner müßte diese Scheibe auch auf dem Sagittalschnitt als Brücke sichtbar sein, und auf dem Frontalbilde müßte sie sich zeigen, auch wenn jenes noch so weit vor oder hinter der Mittellängsachse herausgesägt wird. Alles das trifft aber auch nach meinem Befunde nicht zu. Die Brücke erweist sich als ein freilich recht breiter Balken, aber nicht als Ebene verdichteter Spongiosa. Es liegt nicht im Rahmen dieser Arbeit zu entscheiden, ob die in Frage stehende Zone lediglich den Ueberrest der Epiphysenscheibe darstellt oder als durch Zug entstanden zu betrachten ist. Ich muß jedoch schon

hier auf die Ansichten über ihren Ursprung aufmerksam machen, weil sie in dem letzten zu besprechenden Kapitel meiner Arbeit eine nicht unwesentliche Rolle spielen wird. Die die Brücke darstellenden, enger aneinanderstehenden Röhrchen, welche man freilich nicht an allen Knochenpräparaten vollkommen deutlich zu erkennen vermag, haben bei genauer Betrachtung nicht genau parallele Richtung, sondern sie neigen sich von dem auf der Brückenspitze senkrecht stehenden Röhrchen nach beiden Compactae zu ein wenig seitwärts schräg, und zwar um so viel, daß sie immer die genaue Fortsetzung in der Richtung der über ihnen stehenden Lamellen des Diaphysensystems zu bilden scheinen (Taf. IV, Fig. 7). Das über der Brücke stehende Diaphysenlamellensystem entspringt genau in derselben Weise den Compactae wie die Züge des proximalen Spongiosasystems, und zwar so, daß die mehr außen liegenden Züge mehr senkrecht nach unten verlaufen, die mehr nach der Mittellinie des Knochens gelegenen Trajektorien, welche also sich höher von ihrer Kompakta abblättern, laufen dagegen etwas schräger, und beide Abteilungen, mediale und laterale, treffen sich so schließlich genau in der Mittellinie des Knochens, also auf der höchsten Höhe der Brücke bei dem Metakarpus der regelmäßigen Stellung. Durch die Brücke wird, wie schon erwähnt, die Architektur der Diaphysenspongiosa plötzlich abgebrochen, begrenzt. Genau wie an der proximalen Spongiosa findet man auch an der distalen feine, die einzelnen Trabekeln resp. Röhrchen verbindende Stützbälkchen, die allerdings auch hier sehr wenig ins Auge fallen. Das Maschenwerk unterhalb der Brücke, also die Spongiosa der eigentlichen Epiphyse, ist nun etwa folgendermaßen eingerichtet (Taf. IV, Fig. 8). Von der gedachten Mittellinie des Knochens aus auf dem Frontalschnitt legen sich starke, die Brücke und die distale Gelenkfläche stützende, nach der Mittellinie konvex gebogene Säulchen aneinander. Diese gebogenen Säulchen sind verschieden lang; die der Mittellinie am nächsten stehenden haben die größte Länge, die lateral- resp. medialwärts sich anreihenden werden gleichmäßig immer kürzer, so daß im ganzen ein schönes, gleichmäßiges Bild entsteht, aus dem man sofort leicht ersieht, auf welche Weise diese gebildete Ellipse dazu bestimmt ist, den von der Brücke und der Gelenkfläche ausgeübten Druck auszugleichen. Die Ellipse reicht nun freilich nicht direkt bis an die Brücke resp. Gelenkfläche heran, sondern zwischen allen drei Teilen lagert sich feines Bälkchengewebe. Die Säulchen der Ellipsenfigur sind natürlich durch querverlaufende Stützbalken zum Zwecke der Begrenzung sekundärer Beanspruchungen mannigfaltig untereinander verbunden, so daß das eben gegebene schematische Bild natürlich darunter etwas leidet. Es dürfte dennoch nicht schwer fallen, an dem Fig. 7 und 8 der Taf. IV die erläuterten Verhältnisse zu erkennen. Der Längslamellenteil der distalen Spongiosa hat natürlich dieselbe mechanische Bestimmung wie die proximale Spongiosa der medialen und lateralen Wand. Ueber die proximale Gelenkskompakta ist nichts besonderes zu erwähnen. Sie hat im Durchschnitt etwa die Stärke von 0,5—1 mm. Die distale Gelenkskompakta besitzt am Uebergange des Gelenkkammes in die -flächen 0,5 mm, an den Gelenkflächen 1 mm Stärke.

Sagittalschnitt. Nach der Beschreibung und dem Versuch einer Erklärung der mechanischen Aufgaben der Spongiosa, welche der medialen und lateralen Kompakta entstammt, komme ich jetzt zur Erläuterung des zweiten großen Systems, nämlich der Spongiosa, welche sich von dorsaler und volarer Wand abblättert, und die naturgemäß

am Sagittalschnitt sich dem Beobachter am deutlichsten zeigt (Taf. I, Fig. 1). Am proximalen Knochenende erheben sich sowohl von der dorsalen als auch von der volaren Wand Bälkchenzüge, welche genau wie die Trajektorien des Frontalschnittes schräg aufwärts ziehen, um sich an die proximale Gelenkfläche anzulegen. Im Gegensatz zu dem Verhalten der Plättchensysteme des Frontalschnittes löst sich aber am Sagittalschnitt die Spongiosa der dorsalen Wand viel früher, oft bis 2 cm früher beginnend, ab, als die betreffende Abteilung der volaren Kompakta. Leider ist an dem Furnierblatt Taf. I, Fig. 1 ein Teil der proximalen Spongiosa ausgebröckelt, so daß dadurch das Bild an Deutlichkeit etwas eingebüßt hat. Auch reicht am proximalen Knochenende das dorsale Blättchensystem weit über die Mittellinie, etwa $^3/_4$ der Gelenkfläche stützend, so daß die schwammige Region der volaren Wand zurücktritt. Die Trajektorien der dorsalen Kompakta erscheinen außerdem stärker, dicker und zahlreicher. Im übrigen liegen bezüglich der Trajektorienverbindungsbälkchen am Sagittalschnitt genau dieselben Verhältnisse vor wie am Frontalschnitt. Selbst in der Tiefe der proximalen Gelenkfläche findet sich ein ähnliches, kleines, nur bei genauester Beobachtung sichtbares, der Gelenkfläche parallel verlaufendes Strebewerk, In der Mittellinie bemerkt man nicht selten ein Sichkreuzen der vorderen und hinteren Trajektorienregion. Die Spongiosa des unteren Knochenendes auf dem Sagittalschnitt beginnt aus der dorsalen Wand in der Mitte der Knochenlänge, aus der volaren ca. 2 cm tiefer sich abzulösen. Auch am distalen Knochenteil, ich möchte sagen, hier noch mehr als am proximalen Metakarpusende, ist die Spongiosa der dorsalen Wand die vorherrschende. Die Trajektorien der volaren Kompakta ziehen schräg nach vorn und unten und nehmen nur etwa $^1/_3 - ^1/_4$ der Breite des Sagittalschnittes ein. Die Spongiosazüge der dorsalen Wand hingegen verlaufen schräg nach unten und hinten in leichtem, nach hinten konvexen Bogen, erreichen, sich fast über die ganze Sagittalschnittsbreite erstreckend, fast die Volarwand an deren Uebergang in die Gelenkwalze, um sich dann in der Walze zu verlieren. In der Walze läßt sich im Gegensatz zum Frontalschnitt die Richtung der Trabekelzüge sehr schlecht erkennen. Bei durchfallendem Licht erkennt man hier nur ein gesondertes kleines System noch, welches in Form von parallelen Bogen sich von der vorderen zur hinteren Gelenkfläche erstreckt. Das die Hauptzüge des dritten Knochenendes verbindende feine Blättchenwerk ist viel stärker entwickelt als am proximalen Knochenende.

Aus dem Verlauf und der Stärke der Spongiosa auf dem Sagittalschnitt ergibt sich leicht ihre Bedeutung für die mechanische Leistung des Metakarpus bei seiner Beanspruchung in sagittaler Richtung. Das bedeutende Ueberwiegen der Trajektorien der dorsalen Wand gegenüber denen der volaren Kompakta zeigt, daß die volare Wand einer solchen starken Beanspruchung lange nicht unterworfen ist, wie die dorsale Wand, und beweist ferner, in welchem Maße der bei der Beanspruchung in sagitaler Richtung sich an der Volarwand geltend machende Biegungszug zum großen Teile von den Beugesehnen übernommen wird. Anderseits deuten die Richtung und Ausdehnung der von der dorsalen Dura ausgehenden Trajektorien darauf hin, daß sie (siehe das Schema für den Vergleich des Unterfußes mit einem Kran) dazu bestimmt sind, den bei der Belastung am Metakarpus entstehenden, nach vorn gerichteten Biegungsdruck auf die dorsale Wand zu übertragen. Das kleine, für sich alleinstehende Bogensystem in der Gelenkwalze dient wohl

dazu, zu verhindern, daß die Gelenkwalze von seiten des Fesselbeins und der Sesambeine in sich zusammengedrückt werde. Die schwache Spongiosa der Hinterwand hat meines Erachtens nur den Zweck, eine bei der Biegung des Metakarpus zu befürchtende Annäherung der volaren und dorsalen Wand gegeneinander zu verhindern.

Die Gesamtarchitektur der Metakarpusspongiosa erscheint also in dem Bilde, welches für die Unterstützung dieses Knochens bezüglich seiner mechanischen Leistungen am vorteilhaftesten sein dürfte.

III. Die Architektur der Kompakta und Spongiosa der Metakarpen unregelmäßiger Stellung.

Es sollen im letzten Kapitel dieser Arbeit die Veränderungen im Bau der Kompakta und Spongiosa von Metakarpen unregelmäßiger Stellung besprochen werden. Die bodenweite und bodenenge Schenkelstellung ist natürlich besonders berücksichtigt worden. Es ist zunächst klar, das etwaige Aenderungen in der Struktur der Röhrbeine der beiden angeführten unregelmäßigen Stellungen sich nur an den Wänden abspielen und an der zu diesen Wänden gehörigen Spongiosa zeigen werden, welche infolge der geänderten Richtung des Metakarpus eine andere Beanspruchungsart resp. einen anderen Beanspruchungsgrad erfahren müssen. Die Beanspruchung des Vorderröhrbeins in sagittaler Richtung bleibt doch bei der regelmässigen, bodenweiten, bodengen und weiter auch bei der O-beinigen und X-beinigen Stellung immer genau dieselbe, nämlich die besprochene Biegung. Hingegen ist anzunehmen, daß bei den erwähnten unregelmäßigen Stellungen der Metakarpus in frontaler Richtung, also mediale und laterale Wand mit ihrer Spongiosa nicht gleichmäßig beansprucht werden wie bei der normalen Stellung. Es ist ferner anzunehmen, daß eine an einer Knochenhälfte über die Norm hinausgehende Inanspruchnahme die Wand und die von ihr stammende Spongiosa in ihrer Struktur ändern wird, daß an dem Bau dieser Teile sich Umwandlungen vollziehen werden, die den Knochen in den Stand setzen werden, der geänderten Inanspruchnahme wieder zu genügen. Freilich, nach solchen Erwägungen stände zu erwarten, daß Metakarpen unregelmäßiger Stellung, also Knochen, welche anders in Anspruch genommen werden, als das Vorderröhrbein der normal gestellten Gliedmaße, in ihrem Innern sehr leicht erkennbare entsprechende Architekturumwälzungen dem Beobachter darbieten müßten. Dem ist jedoch nicht so. Die Strukturveränderungen der Metakarpen der gewöhnlich vorkommenden unregelmäßigen Stellungen spielen sich nur innerhalb recht enger Grenzen ab. Immerhin aber sind sie derartige, daß sie bei genügender Beobachtung leicht erkennbar sind.

A. Die innere Architektur des Metakarpus bodenweiter Schenkelstellung. Während bei der erläuterten „kombinierten Beanspruchung“ des Metakarpus der regelmäßigen Stellung — in frontaler Richtung der eine der beiden Beanspruchungsmodi, aus denen sich die kombinierte Spannung zusammensetzt — die Normalpressung mediale und laterale Seite des Knochens gleich stark trifft, mediale und laterale Wand gleich starken Druck erfahren, werden bei der bodenweiten Stellung beide genannten Wände nicht mehr gleichem Druck ausgesetzt, sondern — wie dies ja schon aus der entsprechenden Hufform hervorgeht — die mediale Kompakta mit ihrer

Spongiosa werden stärkerem Druck ausgesetzt sein als die gegenüberliegenden Teile.

Als Ausdruck für diese Aenderung in der mechanischen Beanspruchung des Metakarpus bodenweiter Stellung fand ich nun folgendes (vgl. Taf. II, Fig. 4). Der Knochen bietet in seiner äußeren Form nichts Abweichendes. Hingegen zeigen alle Knochen auf dem Frontalschnitt zunächst eine Aenderung im Bau der medialen Kompakta. Letztere ist zwar gegenüber der lateralen Wand trotz der stärkeren Inanspruchnahme nicht verhältnismäßig dicker angelegt als bei normaler Stellung. (Einen diesbezüglichen Unterschied festzustellen ist ja vorderhand nicht möglich, da für die regelmäßige Stellung eine bestimmte Norm, eine bestimmte Durchschnittszahl für das Dickersein der medialen Wand gegenüber der lateralen nicht existiert.) Dagegen aber befindet sich an der medialen Wand die stärkste in ihrem Verlauf auf dem Frontalschnitt gemessene Stelle nicht mehr wie bei der regelmäßigen Stellung in der Ebene der dicksten Stelle der anderen drei Compactae, also etwa am For. metr., sondern stets tiefer, etwa um 2 cm, bis weiter sogar in der Mitte der Knochenlänge. Durch dieses Tieferrücken der stärksten Stelle bekommt die Wand auf dem Frontalschnitt eine andere Form. Denn während die Kompakta des Metakarpus normaler Stellung von der dicksten Stelle nach unten und obenhin ziemlich schnell abnimmt, und die stärkste Stelle daher ziemlich deutlich hervortritt, bekommt die mediale Kompakta bei bodenweiter Stellung infolge des Herabrückens der stärksten Stelle mehr einen gleichmäßigen Verlauf, indem die zu beiden Seiten der dicksten Region liegenden Wandschenkel, der obere und untere, nach den Knochenenden hin fast ganz gleichmäßig allmählich dünner werden. Die stärkste Ausdehnung der Wand prägt sich daher nicht so gut aus, sondern die Wand bekommt eine mehr gefällige Form, die innere Kompaktakontur ähnelt mehr einem Kreisabschnitt. — Die proximale Spongiosa des Frontalfurnierblattes zeigt nur bei überaus stark bodenweit gestellten Metakarpen ein Ueberwiegen ihrer medialen Abteilung (Taf. II, Fig. 4). Bei den in der Regel vorkommenden Stellungen lassen sich hingegen an der proximalen Spongiosa keine Abweichungen bemerken. Weiterhin, was das distale Maschenwerk des Frontalschnittes anbelangt, so zeichnet dieses sich vor allem durch eine Verschiebung der früher erwähnten Brücke aus, welche ihrerseits eine Veränderung in dem Verhalten der über ihr liegenden Längslamellen mit sich zieht. Die Spitze dieser Brücke, die bei normaler Stellung so gebaut ist, daß ihre höchste Erhebung genau in die den distalen Gelenkkamm mit der Mitte der proximalen Gelenkfläche verbindende gedachte Mittellinie des Knochens fällt, verschiebt sich um weniges, etwa 1 mm lateralwärts von dieser Mittellinie. Dadurch werden natürlich die zur Seite liegenden Brückenbogen ungleich lang. Der mediale, also der zur stärker belasteten Knochenhälfte gehörige, wird länger als der laterale. Auf der höchsten Höhe der Brücke treffen sich wieder die mediale und laterale Abteilung der distalen Längslamellenspongiosa. Da nun die Brückenhöhe seitlich fortgerückt ist, erreicht dadurch das mediale Spongiosasystem der unteren Diaphyse eine größere Ausdehnung als das laterale, im Gegensatz zu dem völlig gleichmäßigen Verhalten bezüglich der Ausdehnung beider Spongiosaabteilungen bei normaler Stellung. Trotz dieser Verschiedenheiten in der Ausdehnung beider Abteilungen sind bei den gewöhnlich vorkommenden bodenweiten Stellungen die Bälkchen des einen Systems nicht stärker gebaut noch enger gefügt als die des anderen, sondern ein Ueberwiegen hinsichtlich

Balkenstärke und -gefüge von seiten der medialen Abteilung nimmt man erst an Metakarpen ausnahmsweise stark bodenweiter Stellung wahr (Taf. II, Fig. 4). — Auf der Gelenkkompakta, der „Druckaufnahmeplatte", habe ich eine der stärkeren Belastung einer Seite entsprechende Verdickung nicht nachweisen können.

B. Strukturveränderungen an Metakarpen bodeneng gestellter Vordergliedmaßen. Die Veränderungen im Bau der Wände und in der Architektur der Spongiosa von bodeneng gestellten Metakarpen bieten vollkommen das Pendant zu dem eben beschriebenen Bilde des Frontalschnittes bodenweit gerichteter Vorderröhrbeine. Der Knochen zeigt also bezüglich seiner äußeren Form und auch auf dem Sagittalschnitt sowie an der normal beanspruchten medialen Kompakta ebenfalls keine Abweichungen von dem inneren Bau der Röhrbeine regelmäßiger Stellung. Strukturumwandlungen lassen sich also auch hier nur am Frontalbilde beobachten. Und auch hier sieht man ganz wie am Metakarpus bodenweiter Stellung nur die infolge der Richtung des Metakarpus stärker belastete laterale Wand und die distale Spongiosa verändert. Die mediale Wand bleibt trotz des auf die laterale Kompakta einwirkenden vermehrten Normaldruckes stärker als die laterale, weil sie dem zu ihrem Normaldruck hinzukommenden Biegungsdruck standzuhalten hat. Die laterale Wand zeigt bezüglich des Herabrückens ihrer stärksten Stelle und des Verhaltens der über und unter dieser befindlichen Wandschenkel genau dasselbe Bild wie die eben beschriebene mediale Wand bodenweiter Metakarpen. Die Diaphyse und distale Epiphyse trennende Brücke ist analog dem Frontalbild bodenweiter Metakarpen medialwärts verschoben, die höchste Brückenhöhe liegt medial von der gedachten Mittellinie, der laterale Brückenbogen ist also der längere, und dementsprechend überwiegt auch die laterale Längslamellenabteilung der distalen Epiphysenspongiosa in Ausdehnung die mediale.

Zur mechanischen Erklärung der Befunde an bodenweit und bodeneng gerichteten Metakarpen sei folgendes bemerkt. Die erwähnten Unterschiede, welche sich an der Architektur zeigen, sind, wie schon hervorgehoben, nur ziemlich geringer Art und nicht so hervortretend, wie man erwarten könnte; der Grund dafür ist wohl der, daß bei den beiden bisher besprochenen Stellungen der Metakarpus mit dem über ihm stehenden Radius in einer gemeinsamen Achse liegt, und eben auf Grund dieses letzteren Umstandes nehme ich zur Erklärung der Veränderungen der medialen resp. lateralen Wand an, daß die durch die veränderte Stellung bedingte stärkere Beanspruchung einer der beiden Wände auf Normaldruck vornehmlich am distalen Knochenende angreifen wird, welches von der Schwerlinie näher oder weiter entfernt liegt, als das proximale Knochenende. Man denke sich an einem in der Form des Frontalschnittes der Knochenseitenwände gebauten Balken, an dessen beiden Enden zwei Kräfte angreifen, derart, daß die Summe ihrer Beanspruchungswirkung an der dicksten Balkenstelle gerade zur Geltung kommt. Bei einem Größerwerden der von der unteren Kraft ausgehenden Wirkung wird sich die Summe der oberen und unteren Kraft mehr nach dem unteren Ende zu bemerkbar machen. Der Balken mußte, um nicht zu zerbrechen, nunmehr in einer tieferen Region seine stärkste Stelle aufweisen. In ähnlicher Weise hat man sich auch das Herabrücken der dicksten Stelle an der mehr beanspruchten Wand dieser Knochen vorzustellen. Einen anderen Grund für dieses Verhalten vermag ich sonst nicht zu geben. Das Uebergreifen der medialen resp.

lateralen Abteilung der distalen Diaphysenspongiosa bei bodenweiter resp. bodenenger Stellung über die Mittellinie hinaus erklärt sich einfach aus der stärkeren Belastung der entsprechenden Knochenhälfte und des unteren Gelenkendes. Wie hat man sich nun die Verschiebung der höchsten Höhe der Brücke zu erklären? Nimmt man an, daß die Brücke lediglich der Ueberrest der knorpeligen, später verknöcherten Epiphysenscheibe ist, so muß man zur Erklärung der Verschiebung der Brückenhöhe und der dadurch bedingten Verlängerung des einen Brückenbogens sich vorstellen, daß durch die infolge der jeweiligen Stellung vermehrte Belastung der einen Knochen- resp. Epiphysenhälfte der betreffende Teil der geschwungen verlaufenden Epiphysenebene sich mehr streckte und die Rückenspitze dadurch über die gedachte Knochenmittellinie hinausgeschoben wurde. Nimmt man wie Kraemer an, daß die Brücke eine durch Zug der seitlichen Fesselbeinbänder entstandene Spongiosaverdichtung darstellt, so wäre die Aenderung im Verlaufe der Brücke erklärlich durch die Vorstellung, daß bei bodenweiter Stellung das äußere, bei bodenenger das innere seitliche Fesselbeinband einen stärkeren Zug beim Auftreten ausübte und dadurch die Spongiosa des gegenüberliegenden Brückenbogens mehr auseinanderzerrte. Meines Erachtens dürfte jedoch die letztere Erklärung nicht ganz einwandfrei sein. Jedenfalls sind also bodenweit und bodeneng gerichtete Metakarpen, in ihrem Innern der Belastung entsprechend, völlig zweckmäßig eingerichtet.

C. Architekturbefunde an Metakarpen O- und X-beiniger oder anders anomal gestellter Pferde. Die Vorderröhrbeine der O- und X-beinigen Stellung müßten nach dem oben Gesagten deshalb, weil bei diesen Stellungen die durch Radius und Metakarpus gehende Knochenachse im Karpus eine Winklung erfährt und deshalb einen viel größeren Unterschied in dem Belastungsdruck der medialen und lateralen Wand bedingt, die erwarteten Veränderungen im Wandbau und in der Spongiosaarchitektur noch deutlicher in die Erscheinung treten lassen. Bei der O-beinigen Stellung ist vom Karpus aus die mediale, bei der X-beinigen die laterale Wand die mehr gepreßte. Doch auch die Untersuchungsbefunde an den Metakarpen O-beinig gestellter Pferde können, was wenigstens die mediale Wand anlangt, ein nicht allzu befriedigendes Bild von der Art der Belastung geben. Ich habe daher dieser Arbeit auch keine Furnierblattphotographie eines Metakarpus O-beiniger Stellung beigefügt. Freilich, die distale Spongiosa verhält sich genau so wie bei stark bodenweiter Stellung, weil ja die mediale Knochenhälfte mehr beansprucht wird als die laterale. Die mediale Wand zeigt die stärkste Dicke auch wieder als Zeichen größeren Belastungsgrades mehr unterhalb der Ebene, in der die stärksten Stellen der übrigen Knochenwände liegen. Daß aber die mediale Wand im Verhältnis zur lateralen stärker ist als bei normaler Stellung läßt sich schwer nachweisen, weil, wie früher erwähnt, es ja keine bestimmte Norm für das Stärkersein der medialen Kompakta gegenüber der lateralen bei regelmäßiger Stellung gibt. Von zwei Pferden, deren eine Vordergliedmaße normal, deren andere O-beinig gestellt war, untersuchte ich zur Probe die beiden Vorderröhrbeine und fand, daß die mediale Wand des O-beinig gestellten Metakarpus, wenn auch nicht allzu viel, aber doch dicker war als die entsprechende Kompakta des normal gestellten Fußes. Es könnte das vielleicht als Beweis dafür dienen, daß bei der O-beinigen Stellung infolge der stärkeren Belastung der medialen Wand jene dicker wird. Bei den Meta-

karpen der X-beinigen Stellung aber fand ich, abgesehen von dem der stark bodenengen Stellung ähnlichen Verhalten der distalen Spongiosa stets infolge der bedeutend stärkeren Belastung der lateralen, äußeren Knochenhälfte die laterale Wand stärker gebaut als die mediale (Taf. III, Fig. 5). Hier natürlich ist, weil die mediale Wand schon bei normaler Stellung stärker ist als die laterale, das Dickersein der Außenwand gegenüber der Innenwand ein sicheres Zeichen dafür, daß der Knochen das Bestreben zeigt, dem stärkeren Druck auf der Außenseite durch Materialanlagerung einen genügenden Widerstand entgegenzusetzen. Fig. 5, Taf. III zeigt, wie sehr bei einer stark X-beinigen Stellung die laterale Metakarpuswand die mediale an Stärke übertrifft. Der Querschnitt dieses Knochens würde eine Verlagerung der Markhöhle nach innen ergeben.

Von den sonst noch untersuchten anormal gestellten Metakarpen möchte ich als Beweis für den mechanischen Bau des Knochens, für sein Bestreben, seine Architektur im Innern so einzurichten, daß er einer geänderten Inanspruchnahme zu widerstehen vermag, ein besonders interessantes Beispiel anführen (Fig. 6, Taf. III). Der Metakarpus stammt von einem ostpreußischen Wallach, dessen linke Vordergliedmaße im Gegensatze zur normal gestellten rechten so gerichtet war, daß Radius und Metakarpus in einer Achse liegend senkrecht über dem Erdboden standen, die Zehe aber außerordentlich stark nach innen abgelenkt war, so daß eine entsprechende Deformation des Hufes eingetreten war. Es ist klar, daß bei dieser Stellung fast nur die mediale Knochenhälfte beansprucht wurde. Die äußere Form des Knochens zeigte nichts Abnormes. Hingegen ist auf dem Frontalfurnierblatt überall ein außerordentliches Ueberwiegen der medialen Knochenhälfte, also sowohl der Wand als auch der Spongiosa in jeder Beziehung gegenüber der schwachen lateralen Hälfte nachweisbar.

Zusammenfassung.

Aus den angestellten Untersuchungen und Erwägungen ergibt sich kurz zusammengefaßt folgendes:

I. 1. Das Os metacarpale 3 des Pferdes regelmäßiger Stellung zeigt folgende innere Einrichtungen:

a) die dorsale Wand übertrifft an Stärke die volare;

b) die mediale Kompakta übertrifft an Stärke die laterale;

c) jede der vier Knochenwände weist etwa am Uebergange des ersten zum zweiten Drittel der Knochenlänge ihre größte Stärke in ihrem Verlaufe auf;

d) die von der dorsalen Wand sich abblätternde Spongiosa des proximalen und distalen Knochenendes verläuft schräg aufwärts resp. abwärts nach der proximalen resp. distalen Gelenkfläche. Die von der volaren Kompakta entspringenden Plättchen haben genau entgegengesetzte Richtung. Die Spongiosa der dorsalen Wand übertrifft jedoch auf dem Sagittalschnitt an Ausdehnung bedeutend das volare Bälkchensystem.

e) Die Spongiosaabteilungen der medialen und lateralen Kompakta zeigen auf dem Frontalschnitt eine jederseits schräg nach aufwärts am proximalen resp. am distalen Knochenende schräg nach abwärts, also nach der Knochenmittellinie zu verlaufende Richtung. Die medialen und lateralen Spongiosaabteilungen haben gleiche Ausdehnung, treffen sich also in der Mittellinie.

f) Das Vorderröhrenbein des Warmblüters zeigt auf dem Querschnitt mehr die Kreisform, der Kaltblütermetakarpus dagegen eine Ellipsenform.

2. Am Metakarpus bodenweit gestellter Pferde findet man folgende Abweichungen von den Verhältnissen an normalgestellten Vorderröhrenbeinen:

a) Die stärkste Stelle im Verlaufe der medialen Wand rückt etwas abwärts und gibt so der medialen Wand auf dem Bilde des Furnierblattes eine andere Form.

b) Die distale Spongiosaabteilung der medialen Kompakta übertrifft an Ausdehnung die Spongiosa der lateralen Wand, geht also etwas über die Knochenmittellinie hinweg. Gleichzeitig mit der Veränderung an der Spongiosa tritt eine Verschiebung der Brücke ein.

3. Am Metakarpus bodeneng gestellter Pferde zeigen sich dieselben Veränderungen an der lateralen Wand und der von ihr stammenden Spongiosa.

4. Metakarpen O-beiniger Stellung bieten im allgemeinen die Veränderungen im Bau des Innern, wie sie sich an bodenweit gestellten Röhrbeinen äußern.

5. An Vorderröhrbeinen der X-beinigen Stellung überwiegt a) die laterale Wand an Stärke die mediale Kompakta und b) die Spongiosa der lateralen Wand übertrifft an Ausdehnung die der medialen Seite.

6. Vorderröhren ganz abnorm gestellter Gliedmaßen zeigen stets eine leicht erkennbare Verstärkung der Kompakta derjenigen Knochenhälfte, die einer stärkeren Belastung ausgesetzt ist.

II. Die Metakarpen regelmäßiger Stellung sowie die Vorderröhrbeine unregelmäßig gestellter Pferde sind in ihrem inneren Bau vollkommen nach statisch-mechanischen Gesetzen eingerichtet. Denn

(zu I, 1, a) am Metakarpus der regelmäßigen wie überhaupt aller Stellungen ist die dorsale Wand deshalb stärker gebaut als die volare, weil erstere bei der in sagittaler Richtung

in Frage kommenden Biegungsbeanspruchung den Biegungsdruck allein zu tragen hat, während der Biegungszug fast ganz von Sehnen übernommen wird.

(Zu 1, b.) Die mediale Wand ist deshalb stärker als die laterale Kompakta, weil erstere bei der in der Frontalebene in Frage kommenden kombinierten Beanspruchung außer der Normalpressung noch Biegungsdruck auszuhalten hat.

(Zu c.) Alle vier Knochenwände sind in ihrem Verlaufe da am stärksten, wo sich bei der Beanspruchung des Knochens nach meinen Berechnungen die einwirkenden Außenkräfte am meisten geltend machen.

(Zu d.) Die Spongiosa der dorsalen Kompakta übertrifft die der dorsalen Wand an Ausdehnung aus dem für die dorsale Wand angegebenen Grunde. Die Richtung der Bälkchen entspricht der Richtung der einfallenden Last.

(Zu e.) Die Spongiosa der medialen und lateralen Kompakta am proximalen und distalen Knochenende ist ebenfalls so gerichtet, daß sie die einfallende Last gleichmäßig günstig zu übernehmen vermag. Mediale und laterale Spongiosa haben gleiche Ausdehnung, weil die Gelenkenden des Metakarpus regelmäßiger Stellung an allen Gelenkpartien gleichen Druck empfangen.

(Zu f.) Die bei Warm- und Kaltblütern verschiedene äußere Knochenform sowie die durch verschiedene Substanzumlagerung um die Markhöhle entstehende, bei beiden Rassen verschiedene Knochenquerschnittsform ist auf rein mechanische Ursachen zurückzuführen, bedingt durch die verschiedene Gebrauchsart beider Rassen.

(Zu 2, 3, 4, 5, 6.) Die Metakarpen der bodenweit, bodeneng, O-, X-beinig und sonst anormal gestellten Pferde weisen im inneren Bau Strukturveränderungen auf, derart, daß die Knochen durch Wandverdickung resp. Verlagerung der stärksten Stelle der Wand sowie durch Ueberwiegen in der Ausdehnung eines gewissen Teiles der Spongiosa in den Stand gesetzt werden, der geänderten Inanspruchnahme zur Genüge entsprechen zu können.

Die angestellten Untersuchungen und Berechnungen ergeben also, daß sowohl das Vorderröhrbein des regelmäßig gestellten Pferdes als auch die Metakarpen unregelmäßiger Stellungen in ihrem inneren Bau so eingerichtet sind, daß sie den für diesen Knochen in Betracht kommenden Beanspruchungsarten möglichst vollkommen zu genügen vermögen. Der Metakarpus jedes Pferdes ist also bezüglich äußerer Form

und innerer Einrichtung rein nach statisch-mechanischen Gesetzen aufgebaut. Ich kann nunmehr nicht umhin, am Schlusse dieser Arbeit, nachdem ich versucht habe, darzulegen, daß die Metakarpalknochen der Pferde rein nach statisch-mechanischen Gesetzen angelegt sind, zu bemerken, daß ich mich bezüglich des Wertes der Röhrbeinumfangsmessungen der Ansicht Hildebrandts anschließe. Hildebrandt, welcher Messungen an Metakarpen verschiedener Rassen in bezug auf Umfang und Wandstärke vornahm und diese mit den Messungen am lebenden Tier verglich, spricht sich bezüglich der Röhrbeinumfangsmessungen dahin aus, daß diese ohne Wert seien, da die Form und Wandstärke durch das Maß nicht festzustellen sei und die Umfangsmessungen durch die Dicke der Haut, die Dichtigkeit des Haarkleides, die Entwicklung der Subkutis, das Volumen der Griffelbeine und die Durchsetzung des Knochens mit Fett beeinträchtigt würden. Metakarpen mit auffallend dünner Kompakta oder mangelhafter Spongiosa habe ich bei meinen Untersuchungen niemals gefunden. Ich will selbstverständlich diese Röhrbeinmessungen nicht völlig verwerfen, ich bin jedoch der Ansicht, daß man bei der Beurteilung eines Pferdes nicht, wie es heute noch zu oft geschieht, einen übermäßigen Wert auf das Ergebnis der Röhrbeinumfangsmessung legen soll, und daß man über den züchterischen Wert eines Hengstes nicht so ohne weiteres den Stab brechen soll, wenn das Tier trotz Erfüllung aller anderen gestellten Bedingungen lediglich beim Messen des Röhrbeines etwa das verlangte Röhrenmaß nicht ganz erreicht. Denn wenn einerseits dieses Maß die Stärke des Knochens selbst gar nicht anzugeben vermag und anderseits bei einem um weniges geringeren Umfang des Vordermittelfußes doch niemand gleich an eine geringere Widerstandsfähigkeit des Unterfußes denken kann, so genügt es meines Erachtens doch vollkommen, wenn man den Fuß lieber nach seinem Stärkeverhältnis zur ganzen Gliedmaße resp. zum ganzen Körper des Tieres beurteilt.

Literatur.

1. Albry, Chr., Zur Architektur der Spongiosa. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1873, Nr. 50.
2. v. Bardeleben, C., Architektur der Spongiosa im Wirbel, Kreuzbein und Wirbelende der Rippen. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1874, Nr. 29.
3. Derselbe, Die Wirbelsäule als Fachwerkkonstruktion. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1874, Nr. 34.

4. Derselbe, Beiträge zur Anatomie der Wirbelsäule. Jena 1874.
5. Culmann, H., Die graphische Statik. Zürich 1866.
6. Eichbaum, F., Beiträge zur Statik und Mechanik des Pferdeskeletts. Berlin 1890.
7. Giese, C., Beiträge zur Architektur der Knochenspongiosa und zur Statik und Mechanik des Fessel- und Kronenbeines bei der regelmäßigen, der bodenweiten und bodenengen Stellung des Pferdes. Inaug.-Dissert. Bern 1909.
8. Goldbeck, Fr., Anatomische und physiologische Unterschiede der großen Pferdegruppen. D. T. W. 1907, Nr. 24.
9. Hildebrandt, Joh., Untersuchungen über Form und Stärke der Metakarpalknochen der Pferde und Feststellung des Wertes der Röhrenumfangsmessungen. Inaug.-Dissert. Bern 1909.
10. Derselbe, Form und Stärke der Metakarpalknochen mit besonderer Berücksichtigung des hannoverschen Pferdes. Zeitschr. f. Gestütskunde 1908, Heft 5, 6, 8.
11. Hoffmann, Die Widerstandsfähigkeit der Knochen. B. T. W. 1901, Nr. 2.
12. Hirsch, Dr. H., Die mechanische Bedeutung der Schienbeinform mit besonderer Berücksichtigung der Platyknemie. Berlin 1895.
13. Kraemer, H., Die Knochenstärke der Pferde. Deutsche landw. Tierzucht 1904, Heft 28, 31; 1905, Heft 49, 51; 1906, Heft 1, 2, 3.
14. Derselbe, Zur Frage der Knochenstärke der Pferde. D. T. W. 1907, Nr. 32.
15. Derselbe, Zur Frage der Knochenstärke der Pferde. Zeitschr. f. Gestütskunde 1906.
16. Langerhans, P., Beiträge zur Architektur der Spongiosa. Virchows Archiv Bd. 61.
17. Martin, P., Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. 1902.
18. Martini, Dr. E., Ueber die Architektur pathologisch veränderter Knochen und Gelenke. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1872, Nr. 37.
19. v. Meyer, S. H., Die Architektur der Spongiosa. Reichert und Du Bois-Reymonds Archiv 1867.
20. Derselbe, Die Ortsbewegung der Tiere. Hamburg 1890.
21. Derselbe, Zur genaueren Kenntnis der Substantia spongiosa der Knochen. Festschrift zum 50jährigen Doktorjubiläum von Bischoff. Stuttgart 1882.
22. Munk-Schultz, Physiologie. 1905.
23. Rauber, H. A., Elastizität und Festigkeit der Knochen. Leipzig 1876.
24. Roux, W., Beiträge zur Morphologie der funktionellen Anpassung. Struktur eines hochdifferenzierten bindegewebigen Organes (der Schwanzflosse des Delphins). Archiv f. Anatomie u. Entwicklungsgeschichte von Hiß und Braune 1883.
25. Derselbe, Beiträge zur Morphologie der funktionellen Anpassung. Beschreibung und Erläuterung einer knöchernen Kniegelenksankylose. Archiv f. Anatomie u. Entwicklungsgeschichte von Hiß und Braune 1885.
26. Derselbe, Ueber die Dicke der statischen Elementarteile und die Maschenweite der Substantia spongiosa der Knochen. Zeitschr. f. orthopäd. Chirurgie 1896, Bd. IV.
27. Schnoyter, Die Gestaltveränderungen des Pferdefußes infolge Stellung und Gangart. Bern 1906.
28. Derselbe, Ueber das Gleichgewicht des Pferdes. Bern 1907.
29. v. Sußdorf, Vergleichende Anatomie.

30. Silbersiepe, Die Fesselbeinfrakturen des Pferdes mit besonderer Berücksichtigung der Architektur des Fesselbeins und der Transformation der äußeren Form und inneren Architektur dieses Knochens infolge von Frakturen. Inaug.-Dissert. Leipzig 1908.
31. Wolff, Jul., Ueber die innere Architektur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum. Virchows Archiv 1870, Bd. 60.
32. Derselbe, Zur Knochenwachstumsfrage. Virchows Arch. 1870, Bd. 61.
33. Derselbe, Ueber die Bedeutung der Architektur der spongiösen Substanz für die Frage vom Knochenwachstum. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1869, Nr. 54.
34. Derselbe, Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin 1892.
35. Wolfermann, H., Beiträge zur Kenntnis der Architektur der Knochen. Reichert und Du Bois-Reymonds Archiv 1872.
36. Werner, G., Ueber das normale und pathologische Wachstum der Röhrenknochen. Virchows Archiv 1870, Bd. 61.
37. Wolter, Messungen an Metakarpen von Lauf- und Schrittpferden besonders auf Biegefestigkeit. Landwirtsch. Jahrbücher 1907, Bd. 36.
38. Weber, Wilh. und Eduard, Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Göttingen 1836.
39. Zschokke, E., Weitere Untersuchungen über das Verhältnis der Knochenbildung zur Statik und Mechanik des Vertebratenskeletts. Zürich 1892.

Lebenslauf.

Ich, Carl Rudolf Grommelt, Sohn des Oberamtmanns Rudolf Grommelt-Schlobitten, Ostpr., evangelischer Konfession, wurde am 27. Oktober 1888 zu Schlodien, Ostpr., geboren. Meine Schulbildung erhielt ich am Königl. Friedrichs-Kollegium zu Königsberg Pr. Von Michaelis 1906 an widmete ich mich an der Königl. Tierärztlichen Hochschule zu Dresden dem Studium der Veterinärmedizin, bestand dort im Mai 1908 die naturwissenschaftliche Prüfung und studierte dann von Michaelis 1908 ab an der Tierärztlichen Hochschule zu Berlin, wo ich im November 1910 die tierärztliche Approbation erhielt. Vom November 1910 bis April 1911 beschäftigte ich mich an der Poliklinik für grosse Haustiere der Berliner Tierärztlichen Hochschule mit der vorliegenden Arbeit. Seit April 1911 bin ich Assistent des Kreistierarztes Veterinärrat Kleinpaul zu Johannisburg, Ostpr.

Tafel I.

Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 1.

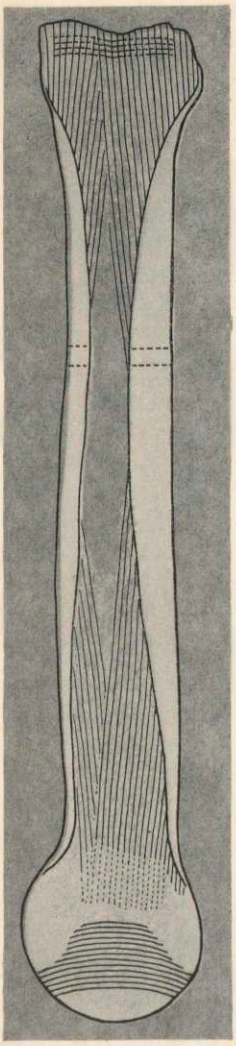
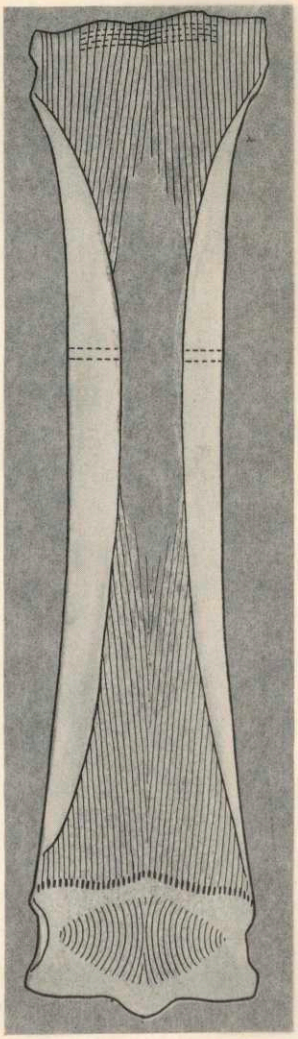
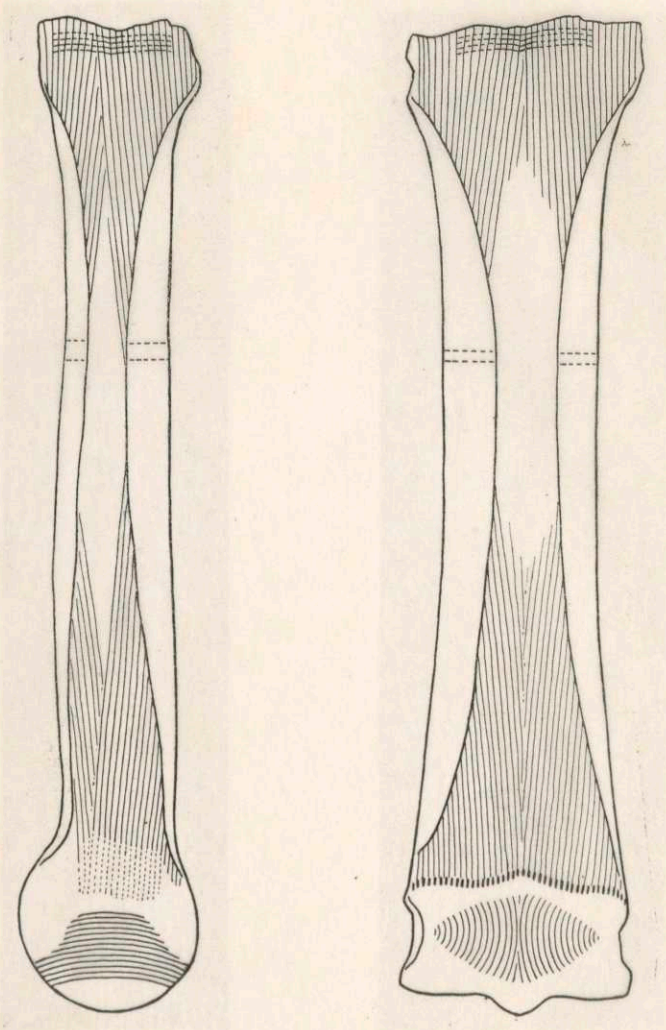


Fig. 2.





Tafel I.

Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 1.

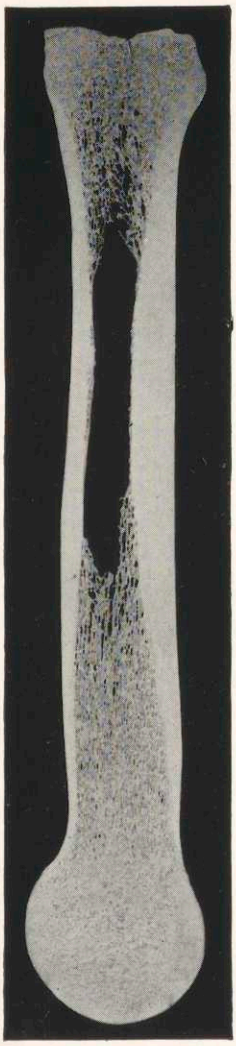
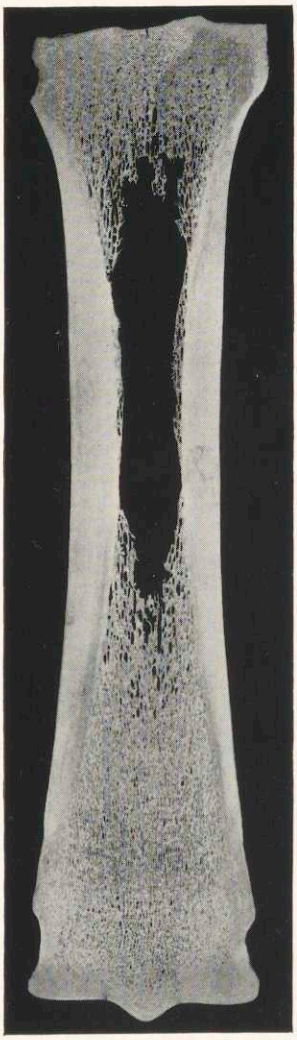


Fig. 2.



Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 3.

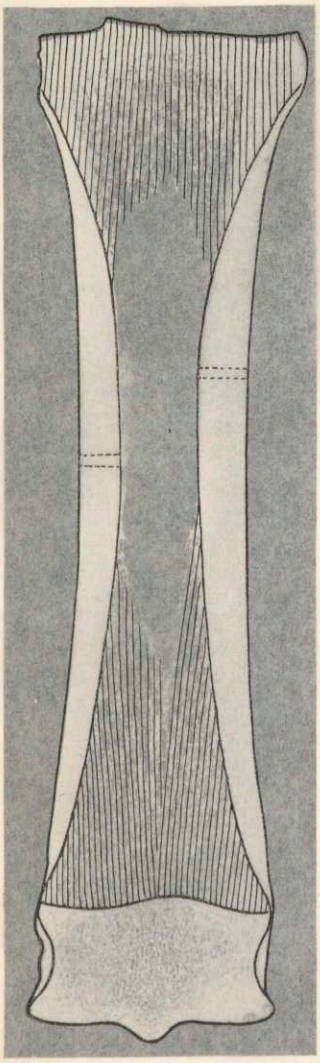
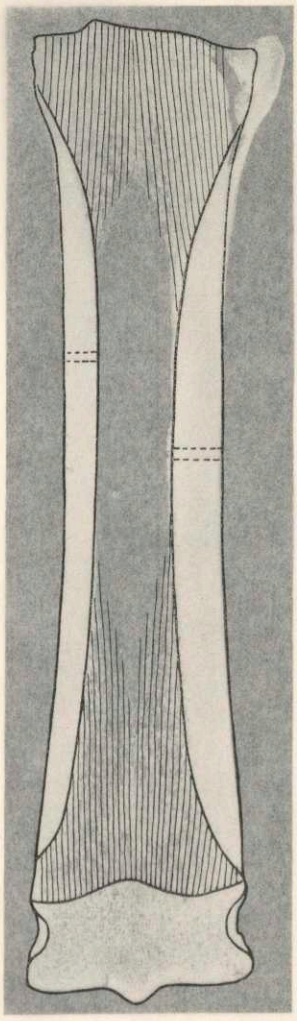
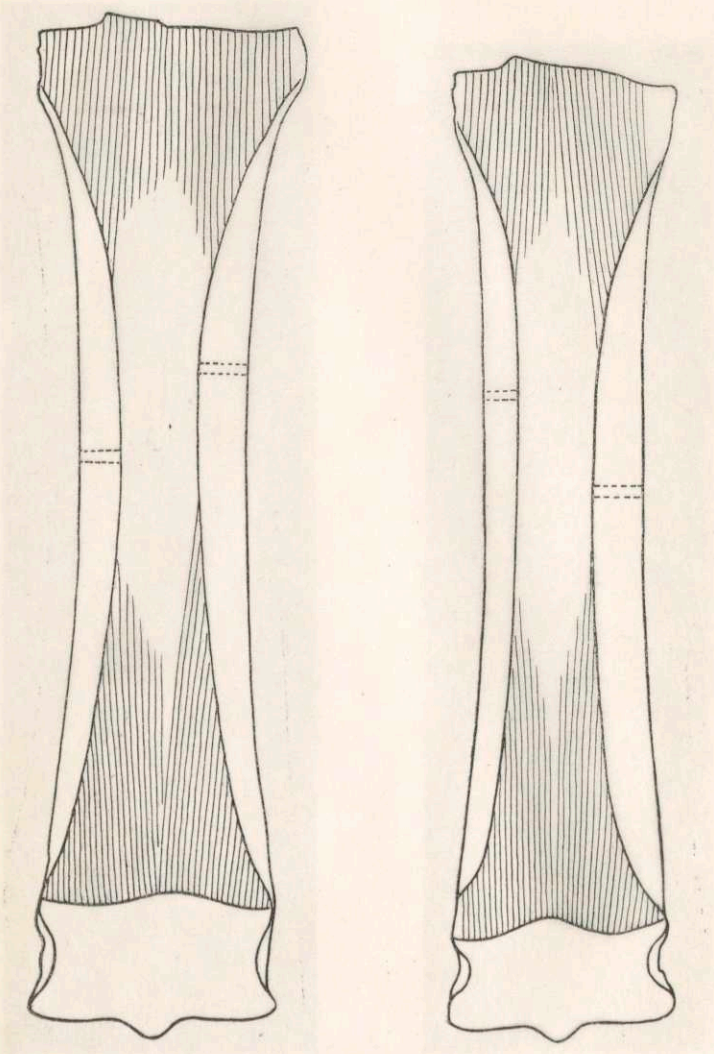


Fig. 4.





Tafel II.

Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 3.

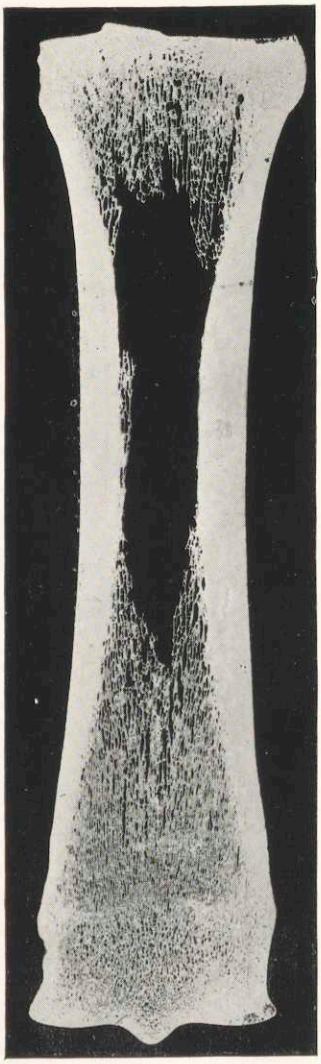
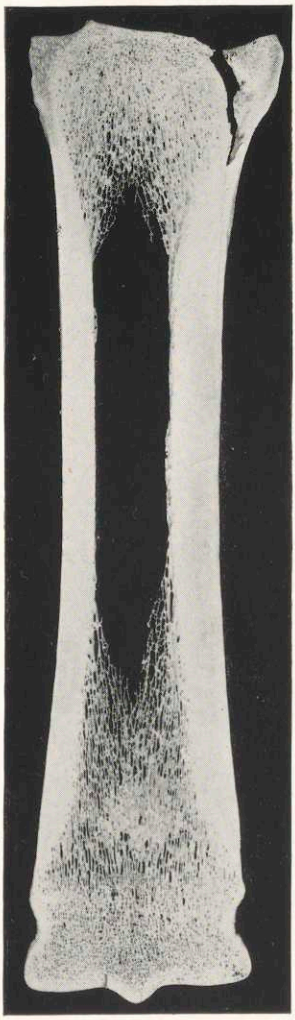


Fig. 4.



Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 5.

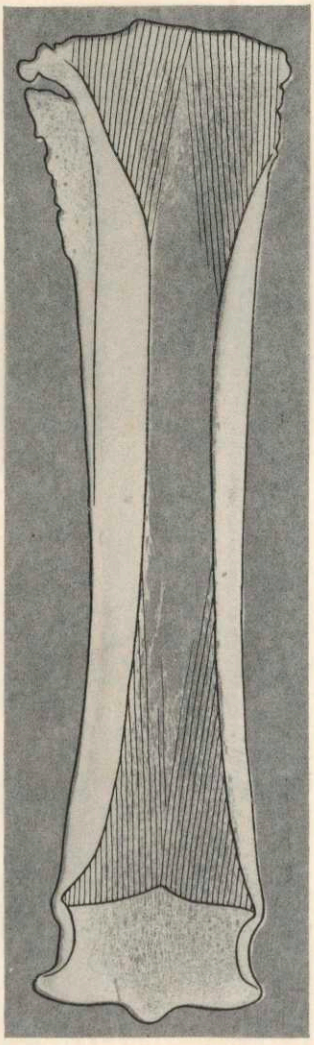
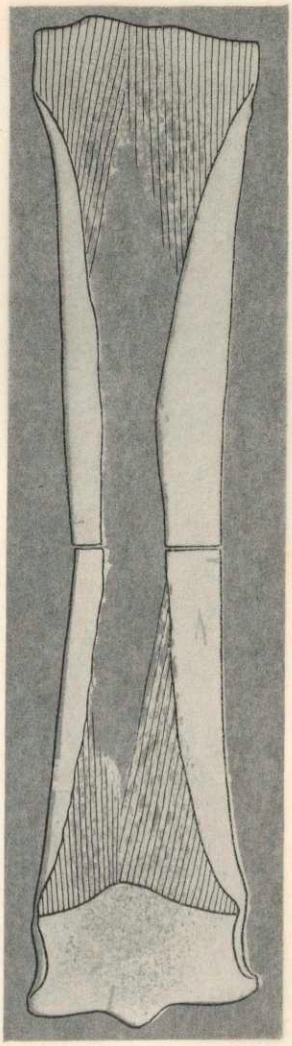
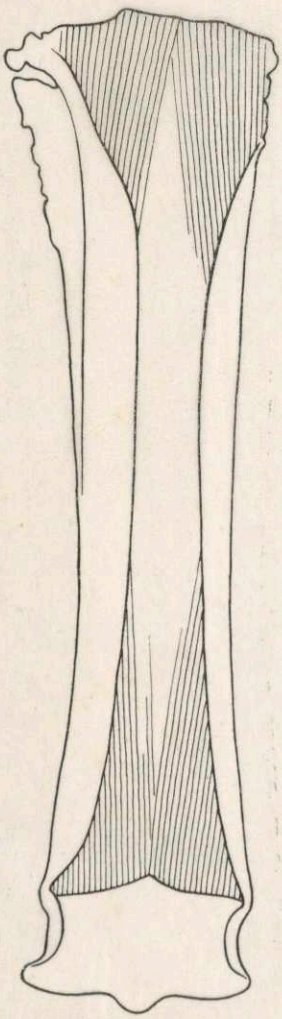
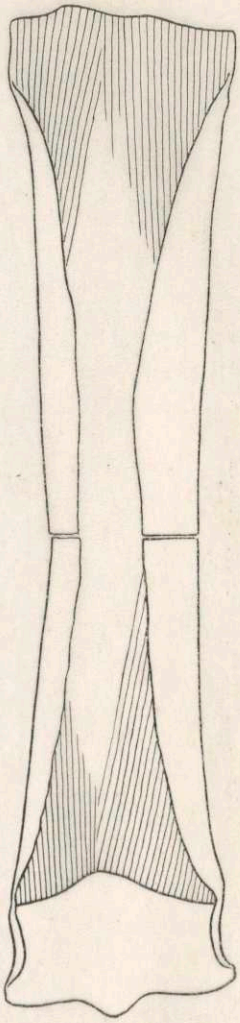


Fig. 6.







Tafel III.

Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 5.

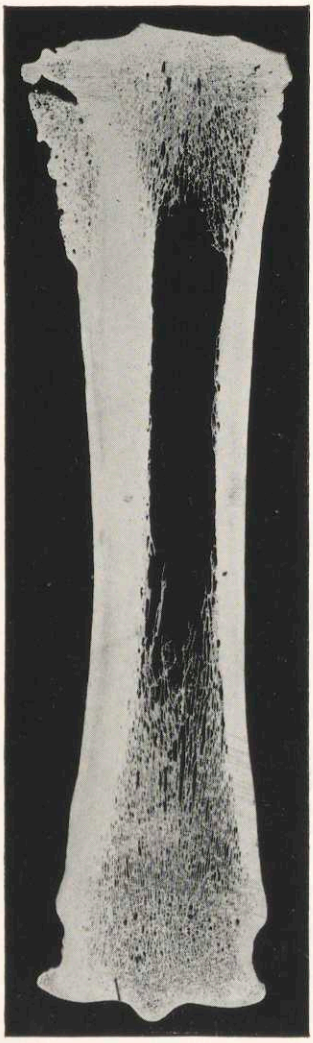
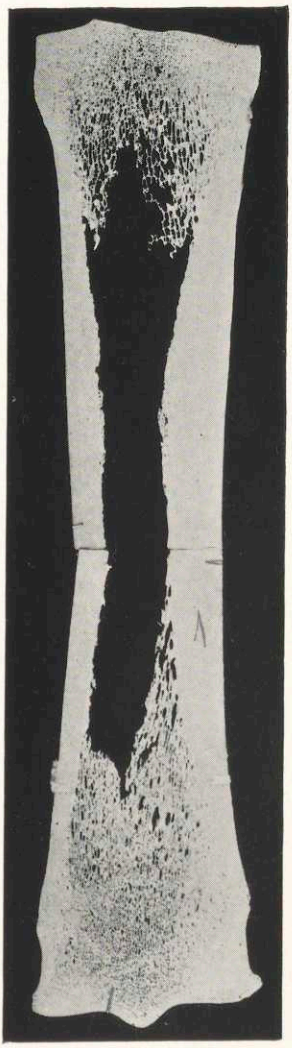


Fig. 6.



Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 8.

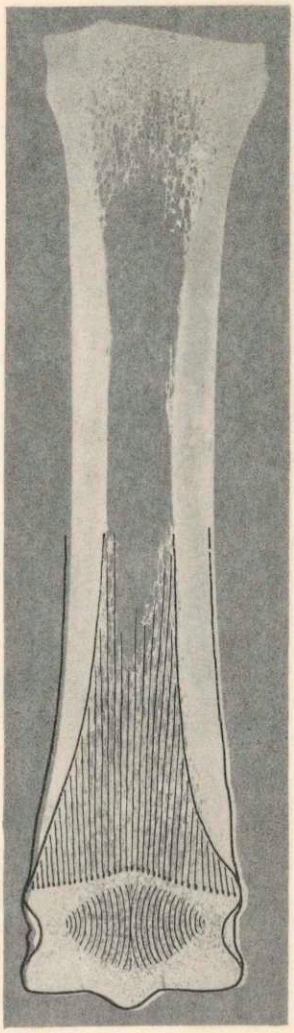
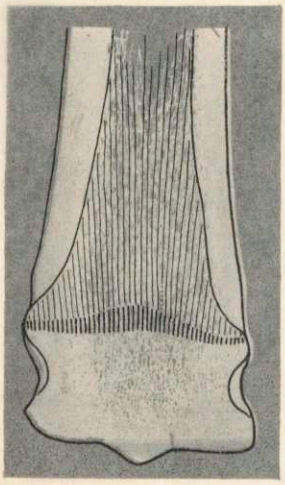
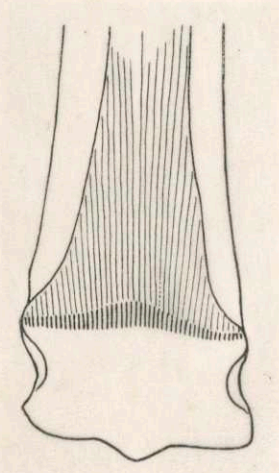
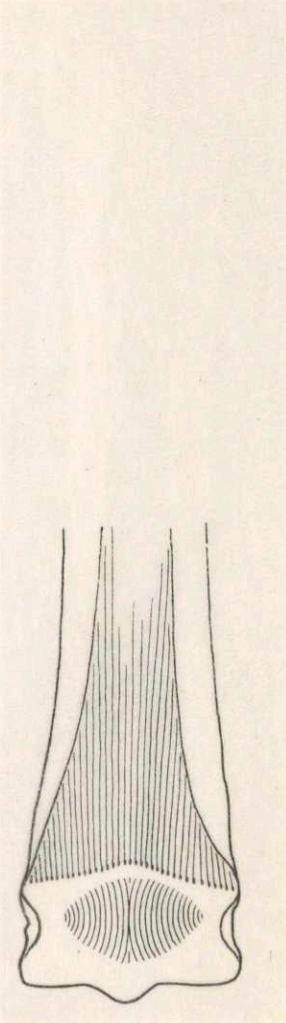


Fig. 7.







Tafel IV.

Grommelt, Beiträge zur Architektur der Kompakta und Spongiosa des Vorderröhrenbeines des Pferdes und zur Statik und Mechanik dieses Knochens mit Berücksichtigung der regelmäßigen und unregelmäßigen Gliedmaßenstellungen.

Fig. 8.

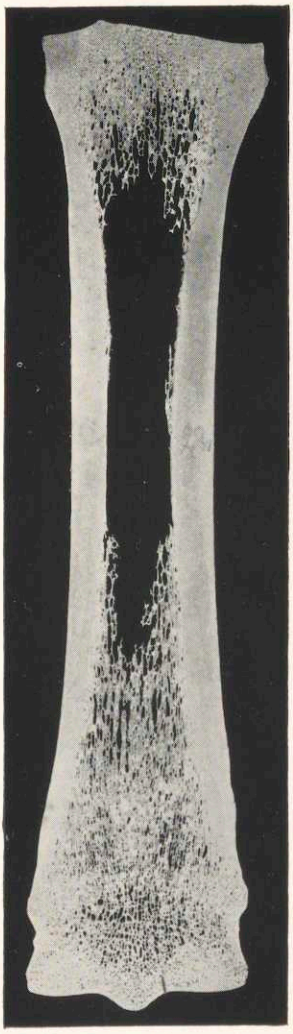
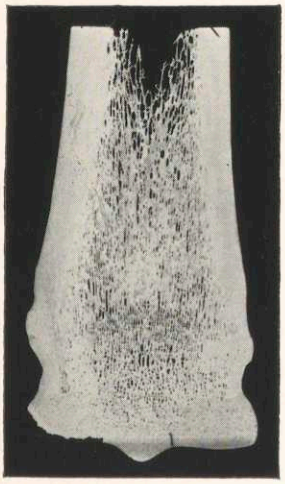


Fig. 7.



4