

lichen mit den von mir vertretenen Ableitungen überein. Die Neubildung von Kapillaren dagegen leitet er in einem vierten angeblichen Gesetz allein von dem in ihnen herrschendem Blutdruck ab. Danach müßten also bei Insuffizienz der Valvula tricuspidalis die Kapillaren in allen Organen sehr vermehrt werden, was den Tatsachen nicht entspricht. Auch bei Insuffizienz der Bicuspidalis kommt in der Lunge zwar Ektasie mit Schlängelung, also mit Verlängerung, aber nicht eine der Drucksteigerung entsprechende Vermehrung der Zahl der Blutkapillaren zur Beobachtung. Dieses vierte histomechanische Gesetz steht also mit den Tatsachen in direktem Widerspruch.

Ich leite dagegen die Vermehrung der Zahl der Blutkapillaren von der gesteigerten Größe ihrer spezifischen Funktion, von verstärkter Diffusion durch ihre Wandung hindurch, infolge verstärkten Stoffverbrauchs im zugehörigen, sich aktiv selbst ernährenden Parenchym ab. Auch diese Regulation fällt somit unter meine allgemeinen Wirkungsprinzipien der funktionellen Anpassung.

Bezüglich des Details und der Begründung meiner ganzen Theorie der Gestaltung der Blutgefäße, von der die Leser Thoma durch ihn keine Vorstellung erhalten, sei auf meine eigene zusammenfassende Darstellung in dem Buche *Oppeles* und auf meine früheren Einzeldarstellungen (siehe *Ges. Abhandl.* Bd. II, S. 1044) verwiesen.

Auch über meine allgemeinen entwicklungsmechanischen Bestrebungen erweckt Thoma bei seinen Lesern eine ganz falsche Vorstellung, indem er andeutet, daß das Bestreben, möglichst viel vom biologischen Geschehen mechanistisch, also direkt kausal, zu erklären, etwas mir Fremdes sei, während gerade dieses Bestreben in bezug auf die Entstehung und Erhaltung aller organischen Gestaltungen, ich darf wohl fast sagen: bekanntlich mein Forschungsprogramm darstellt, welches ich vor 30 Jahren aufgestellt, wiederholt ausführlich dargelegt und gegen Angriffe verteidigt sowie durch eine Reihe kausalanalytischer Untersuchungen im Speziellen ausgeführt habe.

XIV.

Untersuchungen über das Schädelwachstum und seine Störungen.

1. Die Spannung der Schädelwand.

Von

Professor Dr. R. Thoma in Heidelberg.

(Hierzu 23 Textfiguren.)

In einer früheren Mitteilung¹⁾, welche sich mit der Synostose der Pfeilnaht beschäftigte, bin ich zu einigen allgemeineren Ergebnissen gelangt, welche für das Wachstum des Skeletts und seine pathologischen Störungen von größerer Trag-

¹⁾ R. Thoma, *Synostosis suturae sagittalis cranii. Ein Beitrag zur Histomechanik des Skeletts und zur Lehre von dem interstitiellen Knochenwachstum.* Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

weite zu sein scheinen. Man kann diese allgemeineren Ergebnisse, wenn man auf die Einzelheiten verzichtet, in zwei Sätze zusammenfassen.

1. Das Wachstum des Knochengewebes ist zum Teil ein appositionelles und zum Teil ein interstitielles, indem jede frisch apponierte Knochenlamelle nachträglich noch eine zeitlich und räumlich beschränkte interstitielle Größenzunahme aufweist.

2. Das Wachstum des Knochengewebes ist abhängig von seiner Belastung. Die Bindesubstanz geht in Knochengewebe über, sowie ihre Belastung — im Durchschnitt für die 24 Stunden des Tages — einen bestimmten kritischen Wert s überschreitet, welcher auf annähernd 6,5 g für den Quadratmillimeter des Knochenquerschnittes geschätzt wurde. Bei höheren Belastungen nimmt sodann die Geschwindigkeit der Knochenneubildung zu, um bei weiterer Steigerung der Belastung zunächst wieder abzunehmen und schließlich einem Knochenschwunde, einer Knochenresorption Platz zu machen. Außerdem schwindet das Knochengewebe auf dem Wege der Resorption, sowie seine Belastung kleiner wird als der kritische Wert s , von 6,5 g für den Quadratmillimeter.

Man wird vielleicht geneigt sein, die in diesen Sätzen enthaltenen Gesetzmäßigkeiten als den Ausdruck bestimmter Eigenschaften der organischen Stützsubstanz zu betrachten. Als notwendige Folge dieser Gesetzmäßigkeiten aber konnte ich bereits in jener früheren Mitteilung die von G. H. Meyer, Culmann und G. Schwalbe entdeckte und von J. Wolff u. a. genauer verfolgte Architektur der spongiösen und kompakten Knochensubstanz nennen. Wenigstens gelang es mir, zu zeigen, daß nicht nur die Architektur der Gewebe im Gebiete der endochondralen und periostalen Ossifikationszonen, sondern auch die Architektur der wachsenden und ausgewachsenen Knochen sich darstellt als einfache mechanische Folge einerseits der Gestaltung des primordialen knorpeligen und häutigen Skeletts und andererseits der in obigen Sätzen enthaltenen gesetzmäßigen Beziehungen zwischen der Wachstumsgeschwindigkeit des Knochens und seiner mechanischen Beanspruchung. Damit war die Knochenarchitektur und ihre Genese, ohne Rücksicht auf ihre Zweckmäßigkeit oder ihre Anpassung, einen Schritt weiter rückwärts auf ihre unmittelbaren Ursachen hin verfolgt, während gleichzeitig einige neue Gesichtspunkte für die Lehre von den pathologischen Synostosen der Schädelnähte gewonnen waren. Die weitere Verfolgung der angeregten Fragen führte sodann zu einer erneuten Untersuchung der histologischen Vorgänge, welche sich bei der Bildung des knöchernen Schädeldaches vollziehen, und weiterhin zu einer genaueren Prüfung ihrer Abhängigkeit von den mechanischen Beanspruchungen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollen in den folgenden Blättern niedergelegt werden.

Die Schädelkapsel steht unter der Wirkung des Druckes des festen und flüssigen Schädelinhaltes. Da diese Wirkung ohne Unterbrechung bei Tag und bei Nacht stattfindet, geht aus ihr ein sehr beträchtlicher Teil der mechanischen Beanspruchungen hervor, denen die Schädelkapsel unterliegt. Doch ist der Druck

des Schädelinhaltes keineswegs die einzige Beanspruchung, welche die Schädelkapsel trifft. Diese leistet auch vielfachen äußeren Einwirkungen Widerstand, welche die Schädelkapsel zu deformieren bestrebt sind, und unter diesen äußeren Einwirkungen ist wohl die Gravitation und der Muskelzug von größter Bedeutung. Während des größten Teiles des Tages wird die Schädelkapsel getragen von den Gelenkflächen der Processus articulares des Os basilare. Dieser Knochen bildet, wie Félix et¹⁾ sich ausdrückte, das Centre de résistance, das Zentrum des Widerstandes gegenüber den Wirkungen der Gravitation und des Muskelzuges. Von diesem Zentrum ziehen, wie der genannte Autor ausführt, mächtige, durch den Rand der kleinen Keilbeinflügel, das Felsenbein und die wulstigen Ränder des Hinterhauptloches gegebene Knochenspangen in die Schädelkapsel, um sich schließlich in der Eminentia cruciata der Hinterhauptschuppe, den Juga cerebralia und — unter Vermittlung der Jochbeine und der oberen Augenhöhlenränder — in der Crista galli zu verlieren. Diese Knochenspangen dürften zum großen Teile die von der Gravitation und von dem Muskelzuge herführenden Beanspruchungen übernehmen und zugleich den Schädel bei gelegentlichen äußeren Druck- und Stoßwirkungen in nicht unerheblichem Grade gegen Deformation schützen.

Diese äußeren Einwirkungen auf die Schädelkapsel sind indessen in ihren Einzelheiten so schwer zu verfolgen, daß ich vorläufig wenigstens eine mechanische Analyse derselben nicht unternehmen möchte. Dagegen gestaltet sich die Untersuchung verhältnismäßig einfach, wenn sie sich auf das Schädeldach beschränkt, welches vorwiegend unter dem Einflusse des Druckes des Schädelinhaltes steht. Indessen ist auch nach dieser Beschränkung die Aufgabe schwierig genug, und zwar vorzugsweise aus dem Grunde, weil unsere Kenntnisse über den im Schädelraume herrschenden Druck noch äußerst mangelhafte sind.

Zunächst erhebt sich die Frage nach dem Drucke, unter welchem der in den Hirnventrikeln und in den subarachnoidal en Maschenräumen enthaltene Liquor cerebrospinalis steht. Wenn man unter der Voraussetzung einer aufrechten Körperhaltung den Druck der subarachnoidal en Flüssigkeit in der Scheitelregion, somit an der höchstgelegenen Stelle des Cavum cranii, in Millimetern Quecksilber ausgedrückt, gleich x setzt, so ist es klar, daß der Subarachnoidaldruck in allen tiefer gelegenen Horizontalebenen gleich

$$x + \frac{n}{k}$$

ist, wobei n den Niveauunterschied der höchstgelegenen Stelle des Schädelraumes und der untersuchten Horizontalebene in Millimetern anzeigt und k das Verhältnis des spezifischen Gewichtes des Quecksilbers zu dem spezifischen Gewichte des Liquor gibt. Der Wert k ist eine Konstante und annähernd gleich 13,56 geteilt durch 1,01 oder annähernd gleich 13,4. Der Druck i des Liquor cerebrospinalis wird somit in allen Horizontalebenen gegeben durch den Ausdruck

¹⁾ Félix et, Recherches anatomiques et expérimentales sur les fractures du crâne. Paris 1873.

$$i = x + \frac{n}{13,4}.$$

Diese Gleichung beruht ausschließlich auf der Voraussetzung, daß die subarachnoidealen Räume und die Hirnventrikel überall genügend weite Verbindungen aufweisen, so daß in dem Liquor cerebrospinalis nur die von der Gravitation erzeugten Druckdifferenzen bestehen. Daß diese Voraussetzung nach jeder Änderung der Körperhaltung in sehr kurzer Zeit erfüllt sein muß, geht aus den Erfahrungen aller Experimentatoren hervor.

Über die absolute Höhe des Druckes in den bei aufrechter Körperhaltung höchstgelegenen Stellen des Schädelbinnenraumes, somit über den Wert der Größe x wissen wir indessen sehr wenig. Doch ergibt sich aus den Untersuchungen von Salathé¹⁾, Mays²⁾, Leonard Hill³⁾ u. a. mit Bestimmtheit, daß bei aufrechter Körperhaltung der intrakranielle Flüssigkeitsdruck des Menschen in der Scheitelregion negativ ist.

Geht man nun über zu einer Betrachtung des subarachnoidealen Flüssigkeitsdruckes unter Voraussetzung einer horizontalen Körperhaltung, so bemerkt man, daß dieser gleichfalls durch obige Gleichung zum Ausdrucke gebracht werden kann, vorausgesetzt, daß an Stelle von x der Wert x^1 tritt, welcher bei horizontaler Körperlage den subarachnoidealen Druck in dem höchstgelegenen Teile der Schädelrückgrathöhle anzeigen. Man hätte somit

$$i = x^1 + \frac{n}{13,4}.$$

Genaue Bestimmungen von x^1 , bei welchen die Niveauverhältnisse innerhalb der Schädelrückgrathöhle und zugleich die Niveaulage des Herzens gebührend berücksichtigt wären, fehlen leider gleichfalls. Indessen ist doch eine größere Anzahl annähernder Bestimmungen zu finden namentlich in den Arbeiten von Leyden⁴⁾, Naunyn und Schreiber⁵⁾, v. Schulzen⁶⁾, E. von Bergmann⁷⁾, Falkenhain und Naunyn⁸⁾, Quincke⁹⁾ u. a. Nach diesen kann man für Erwachsene $x^1 = 15$ mm Hg annehmen, während für Kinder und Neugeborene dieser Wert auf 10 mm Hg und 7 mm Hg herabgeht.

¹⁾ A. Salathé, Recherches sur les mouvements du cerveau. Travaux du laborat. de Marey. Paris 1877.

²⁾ K. Mays, Virch. Arch. Bd. 88, 1882.

³⁾ L. Hill, Proceedings of the Royal Society vol. 55, 1894, Journ. of Physiol. vol. 18, 1895. — Baylin und L. Hill, ebenda Bd. 18, 1895. — L. Hill, The Physiology and Pathology of the cerebral circulation. London 1896.

⁴⁾ Leyden, Virch. Arch. Bd. 37, 1866.

⁵⁾ Naunyn und Schreiber, Arch. f. exp. Path. Bd. 14, 1881.

⁶⁾ v. Schulzen, Arch. f. klin. Chir. Bd. 32, 1885.

⁷⁾ E. v. Bergmann, Arch. f. klin. Chir. Bd. 32, 1885.

⁸⁾ Falkenhain und Naunyn, Arch. f. exp. Path. Bd. 22, 1887.

⁹⁾ Quincke, D. Arch. f. klin. Med. Bd. 21.

Frage man nunmehr nach den Ursachen, welche diese Werte von x^1 bestimmen, so begegnet man zunächst dem von L. Hill¹⁾ mit ziemlich großer Genauigkeit geführten Nachweise, daß der subarachnoideale Druck im wesentlichen gleich ist dem Drucke in den Venen der Pia mater und weiterhin auch annähernd gleich dem Drucke in den Sinus der Dura mater. Zwischen den Venen der Pia und den in der Dura gelegenen venösen Sinus muß selbstverständlich ein kleines Druckgefälle bestehen, allein dieses ist zu gering, um einen experimentellen Nachweis zu gestatten. Damit gelangt man jedoch zu der Frage, woher der Druck in dem Blute der Hirnsinus herrührt. Er ist offenbar der Rest des zwischen dem arteriellen und venösen Ostium des Herzens bestehenden Druckgefälles, welcher Rest sodann durch die Reibungswiderstände aufgebraucht wird, welche der Blutstrom zwischen den Hirnsinus und dem venösen Ostium des Herzens zu überwinden hat.

Diese Auffassung erklärt meines Erachtens alle Besonderheiten, welche bezüglich des Hirndruckes beobachtet sind. Es wird zunächst erklärlich, daß x^1 für erwachsene Menschen und für große Tiere einen höheren Wert hat als für Kinder und für kleine Tiere. Denn bei beträchtlicherer Körpergröße ist die venöse Bahn von den Hirnsinus bis zum Herzen erheblich länger als bei geringer Körpergröße, so daß die zu überwindenden Reibungswiderstände zwischen den Hirnsinus und dem Herzen und demgemäß der Wert x^1 mit der Körpergröße zu- und abnimmt.

Wenn jedoch der Subarachnoideldruck x^1 , welcher bei horizontaler Körperhaltung beobachtet wird, im wesentlichen bestimmt wird durch die Reibungen des Blutes in dem vom Gehirn zum Herzen führenden venösen Teile der Blutbahn, so darf man wohl annehmen, daß auch bei aufrechter Körperhaltung annähernd die gleichen Widerstände für den venösen Blutstrom bestehen. Die Höhe des subarachnoidealen Flüssigkeitsdruckes in den verschiedenen Horizontalebenden würde dann nur noch durch die Niveaudifferenzen beeinflußt. Bei aufrechter Körperhaltung der Erwachsenen müßte dann der Druck in den subarachnoidealen Räumen des Rückenmarkes in einer Horizontalebene, welche zugleich durch das Ostium venosum dextrum des Herzens gehen würde, gleich sein 15 mm Hg. Man würde somit nach der ersten der oben gegebenen Gleichungen finden:

$$i = x + \frac{n}{13,4} = 15 \text{ mm Hg.}$$

Bei aufrechter Körperhaltung findet sich bei Erwachsenen die Niveaudifferenz zwischen der höchstgelegenen Stelle des Subarachnoidealraumes und dem Ostium venosum dextrum des Herzens annähernd gleich 400 mm. Es wird daher $n = 400$, und aus obiger Gleichung folgt:

$$x + \frac{400}{13,4} = 15 \text{ mm Hg.}$$

$$x = -30 + 15 \text{ mm Hg} = -15 \text{ mm Hg.}$$

Auf Grund der Messungen der oben genannten Autoren, welche zeigen, daß

¹⁾ L. Hill a. a. O.

der Subarachnoidealdruck bei liegender Körperhaltung des Erwachsenen annähernd gleich + 15 mm Hg ist, gelange ich somit zu dem Schluß, daß bei aufrechter Körperhaltung der Druck in den höchstgelegenen Teilen des Subarachnoidealraumes der Scheitelregion gleich — 15 mm Hg zu setzen sei.

Dieses Ergebnis steht in bester Übereinstimmung mit den oben erwähnten Beobachtungen von Salathé, Mays, Leonard Hill u. a., welche bei aufrechter Körperhaltung den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck in der Scheitelregion des Menschen als negativ erfanden¹⁾. Die Richtigkeit der dabei gewonnenen Anschauung tritt aber namentlich dann sehr deutlich hervor, wenn man die Konsequenzen dieser Anschauung für den zerebralen Kreislauf zieht. Ich will dies versuchen, ehe ich die Bedeutung der gewonnenen Zahlen für die Lehre von der Schädelspannung verfolge.

Dabei gehe ich aus von der in meinem Lehrbuche²⁾ etwas ausführlicher besprochenen Tatsache, daß auch in einer strömenden Flüssigkeit dieselben Druckunterschiede bestehen, welche entsprechend den Lehren von Archimedes in ruhenden Flüssigkeiten anzunehmen sind. Man kann diese Druckdifferenzen als hydrostatische bezeichnen. Sie summieren sich in einfacher Weise zu den hydrodynamischen Druckdifferenzen, welche die Tätigkeit des Herzens in verschiedenen Teilen des Gefäßsystems erzeugt. Sodann bemerkst man, daß die hydrostatischen Druckdifferenzen des Blutes ziemlich genau³⁾ gleich sind den oben besprochenen, gleichfalls hydrostatischen Druckdifferenzen, welche sich im Liquor cerebrospinalis finden. Daraus aber ergibt sich, daß bei allen Körperhaltungen das zwischen den kleinen Arterien und Venen des zentralen Nervensystems bestehende Druckgefälle in allen Nivea ebenengleich groß ist.

Dieser Schlußfolgerung liegen allerdings einige Voraussetzungen zugrunde, welche nicht übergangen werden dürfen. Sie sehen zunächst ab von einer Kontraktilität der Kapillarwand und von der Möglichkeit, daß die Stoffwechselvorgänge, welche sich bei der Funktion des zentralen Nervensystems vollziehen, zu erheblichen Änderungen der Transsudations- und Sekretionsvorgänge in der Kapillarwand führen könnten. Denn sowohl die Kontraktilität der Kapillarwand als die in derselben sich vollziehenden Transsudations- und Sekretionsvorgänge könnten mehr oder weniger starke Änderungen des Druckgefälles hervorrufen. Sodann habe ich vorausgesetzt, daß bei Änderungen der Körperhaltung und namentlich bei dem Wechsel zwischen aufrechter und liegender Körperstellung das Kaliber der Arterien auch im Bereiche des zentralen Nervensystems konstant bleibt — ungeachtet der unvermeidlichen Änderungen des auf den Gefäßwänden lastenden hydrostatischen Druckes des Blutes.

¹⁾ Annähernd stimmt das hier gewonnene Resultat auch überein mit der anscheinend ganz willkürlichen Annahme von Grashéy (Exp. Beitrag zur Lehre von der Blutzirkulation in der Schädelrückgrathöhle. Akad. Festschr., München 1892), derzu folge der intrakranielle Flüssigkeitsdruck in der Höhe des Foramen occipitale magnum gleich Null sein soll. Denn in obiger Gleichung wird für das große Hinterhauptloch n ungefähr gleich 200 mm. Dann folgt $x = \pm 0$. Die Übereinstimmung dürfte eine rein zufällige sein, da Grashéy vermutlich auf ganz andern, offenbar irrtümlichen Wegen zu seiner Annahme gelangte.

²⁾ R. Thoma, Lehrbuch der pathol. Anatomie Bd. 1, Stuttgart 1894, S. 275.

³⁾ Ungenauigkeiten werden nur veranlaßt durch die Verschiedenheit des spezifischen Gewichtes des Blutes und des Liquor cerebrospinalis. Diese Verschiedenheit beträgt indessen nur 3 bis 5 %, so daß ihre Folgen durch geringe Änderungen der vasomotorischen Innervation leicht behoben werden können.

Unter den gegebenen Umständen würde diese letztgenannte Voraussetzung erfüllt sein, wenn die Strömung des Blutes in allen Arterien, auch in denjenigen des zentralen Nervensystems, in der Weise geregelt wird, daß die Stromgeschwindigkeit der in nächster Nähe der Gefäßwand strömenden Blutschichten überall, sowohl in den großen als in den kleinen Arterien gleich groß ist. Ich habe dieses Prinzip der Regulation wiederholt¹⁾ ausführlicher erörtert und zu beweisen versucht. Daß es auch für die Arterien des zentralen Nervensystems maßgebend ist, geht meines Erachtens aus der allgemeinen Gestaltung dieser Arterien hervor. Die große Häufigkeit des Vorkommens sklerotischer Erkrankungen der Hirnarterien, welche von meinen Mitarbeitern Sack²⁾, M e h n e r t³⁾ und B r e g m a n n⁴⁾ nachgewiesen wurde, zeigt jedoch, daß wenigstens in den späteren Lebensperioden diese Regulation keineswegs immer eine vollständige ist. Es würde daher wohl objektiv richtiger sein, obige These etwas abzuändern und zu behaupten, daß die im Liquor cerebrospinalis und in dem kreisenden Blute gegebenen Druckverhältnisse bei allen Körperhaltungen die Möglichkeit bieten zu einer vollkommenen Regulation des Druckgefäßes in allen Niveauebenen des zentralen Nervensystems.

Es würde dann die Frage nach der Vollkommenheit dieser — im wesentlichen den lokalen Gefäßnervenzentra oder vielleicht nur den muskulösen Elementen der Gefäßwand zufallenden — Regulation offen bleiben und ebenso die Frage, ob auch vom Vagus, Sympathikus und andern Nerven her eine Beeinflussung dieser Regulationsmechanismen möglich sei. Die Arbeiten von O. Müller und R. Siebeck⁵⁾ scheinen die letztgenannte Frage zu bejahen. Die zwischen diesen Autoren und L. Hill bestehenden Widersprüche aber würden sich wohl durch genauere, messende Versuche auf Grundlage der hier entwickelten mechanischen Anschauungen lösen lassen.

Wenn sodann — in Übereinstimmung mit den Versuchen von L. Hill — der Druck des Liquor cerebrospinalis überall gleich dem Drucke in den Venen gleicher Niveahöhe ist, so wird auch der Druck, welcher die Dura mater des Rückenmarkes spannt, gleich dem Drucke, welcher in den angrenzenden venösen Plexus des Wirbelkanals herrscht. Der Duralsack wird daher nicht einmal im Gebiete der Cauda equina erhebliche Spannungen erleiden. Geringe Druckdifferenzen zwischen den subarachnoidealen Räumen und den Gewebsspalten des übrigen Körpers werden aber in tiefen Niveauebenen, namentlich bei aufrechter Körperhaltung, immer vorhanden sein. Die Spalträume der meisten Gewebe sind so enge und gestatten so wenig ausgiebige Flüssigkeitsströme, daß die Ausbildung starker hydrostatischer Druckwerte, wie sie im Subarachnoidealraum bestehen, nicht angenommen werden kann. Es scheint daher unter den gegebenen Voraussetzungen wahrscheinlich, daß immer geringe Mengen von subarachnoidealer Flüssigkeit durch die Nervenscheiden der abhängig gelegenen Körperteile abgeführt werden. Wenn dabei der Subduralraum des zentralen Nervensystems dauernd leer befunden wird, mag dies damit zusammenhängen, daß bei der gegebenen Anordnung der Subduralraum verhältnismäßig ausgiebig drainiert ist.

Zugleich bemerkt man, daß es bei der gegebenen Anordnung vollkommen begreiflich erscheint, wenn L. Hill nicht imstande war, auf experimentellem Wege eine besondere Einrichtung zu

¹⁾ R. Thoma, Untersuchungen über die Histogenese und Histomechanik des Gefäßsystems. Stuttgart 1893. — Die Viskosität des Blutes und seine Strömung im Arteriensystem. D. Arch. f. klin. Med. Bd. 99, 1910. — Über die Histomechanik des Gefäßsystems und die Pathogenese der Angiosklerose. Virch. Arch. Bd. 204, 1911 u. a. a. O.

²⁾ E. Sack, Über Phlebosklerose und ihre Beziehungen zur Arteriosklerose. Diss., Dorpat 1887. — Virch. Arch. Bd. 112, 1888.

³⁾ E. M e h n e r t, Über die topographische Verbreitung der Angiosklerose usw. Diss., Dorpat 1888.

⁴⁾ E. B r e g m a n n, Ein Beitrag zur Kenntnis der Angiosklerose. Diss. Dorpat 1890.

⁵⁾ O. Müller und R. Siebeck, Über die Vasomotoren des Gehirns. Ztschr. f. exp. Path. Bd. 4, 1907.

einer Regulierung des subarachnoidealen Druckes nachzuweisen. Letzterer erscheint zunächst einfach abhängig von dem Drucke in den kleinen Venen des zentralen Nervensystems. Vorübergehend wird er jedoch auch von Änderungen des arteriellen Druckes beeinflußt. Er ist somit nicht ausschließlich vom Venensystem abhängig, und die pulsatorischen und respiratorischen Schwankungen des subarachnoidealen Druckes und verwandte Erscheinungen stehen, wie die experimentelle Forschung ergeben hat, unter dem Einflusse der Venen und der Arterien.

Die pulsatorischen und respiratorischen Druckschwankungen in der subarachnoidealen Flüssigkeit sind unzweifelhaft die Folge der raumbeschränkenden Wirkungen periodischer Änderungen des Volums der Gefäßbahn. Im Bereiche des Cavum crani sind indessen solche periodische Volumsänderungen der Blutgefäß nur denkbar, wenn zugleich periodisch geringe Mengen von Liquor cerebrospinalis in den leichter dehbaren Wirbelkanal ausweichen. Daß dies wirklich stattfindet, wird allgemein anerkannt. Länger dauernde Drucksteigerungen, welche in gleichmäßiger Weise alle Teile des Liquor cerebrospinalis treffen, scheinen nur unter pathologischen Bedingungen vorzukommen, wenn entweder größere Mengen von Liquor gebildet werden oder wenn der Abfluß des letzteren erschwert ist. Ob eine vermehrte Produktion von Liquor ohne pathologische Behinderung seines Abflusses erhebliche Steigerungen des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes zu erzeugen vermag, scheint mir allerdings zweifelhaft zu sein. In der Regel dürfte die vermehrte Produktion von Zerebrospinalflüssigkeit nur dann zu beträchtlichen Steigerungen des Subarachnoidealdruckes führen, wenn zugleich der Abfluß erschwert ist, entweder durch allgemeine venöse Stauung oder durch abnormen Fibrin- und Zellgehalt des Liquor oder vielleicht durch Schwellungen der bindegewebigen Membranen und Faserbündel der Nervenscheiden. Der Subarachnoidealdruck kann in solchen Fällen sehr hoch werden und (vermutlich bei Bettlage gemessen) 60 mm Hg und mehr erreichen. Die Lumbalpunktion aber pflegt unter diesen Voraussetzungen rasch, wenn auch vielleicht nur vorübergehend die Erscheinungen des allgemeinen Hirndruckes zu beseitigen.

Oben hatte sich ergeben, daß bei Erwachsenen der Druck der subarachnoidealen Flüssigkeit an der höchstgelegenen Stelle des Cavum crani bei aufrechter Körperhaltung — 15 mm Hg und bei horizontaler Lage + 15 mm Hg annähernd betragen dürfte. Ein positiver, auf der Innenfläche des Schädeldaches lastender Druck von 15 mm Hg erzeugt aber in diesem Skelettstück Zugspannungen, deren Höhe rechnungsmäßig festgestellt werden kann, wie sich weiterhin ergeben wird. Dagegen veranlaßt ein negativer Subarachnoidealdruck, welcher soeben auf — 15 mm Hg bestimmt wurde, Druckspannungen im Schädeldach, die ihrem absoluten Werte nach den soeben erwähnten Zugspannungen gleichkommen. Druckspannungen und Zugspannungen beeinflussen jedoch, wie ich in dem genannten Aufsatze über die sagittale Synostose entwickelt habe, das Knochenwachstum in gleicher Weise. Der 24 stündige Mittelwert für die beiden Druckwerte + 15 mm Hg und — 15 mm Hg ist somit nicht etwa gleich Null, oder, indem man 8 Stunden Bettruhe mit 16 Stunden aufrechter Körperhaltung rechnet, gleich — 5 mm Hg, sondern vielmehr gleich dem absoluten Werte von 15 mm Hg. Ähnliche Betrachtungen führen auf Grund der vorliegenden Messungen zu der Annahme, daß dieser Druck im dritten Lebensjahr gleich \pm 9 mm Hg und in den ersten Tagen nach der Geburt auf \pm 7 mm Hg zu veranschlagen sei. Während der intrauterinen Periode fällt dann, infolge der hydrostatischen Wirkung des Liquor amnii, der Einfluß der Körperhaltung weg. Der Druck der Zerebrospinalflüssigkeit wird daher während der Fötalzeit dauernd ein positiver sein, jedoch um so geringere

Werte aufweisen, je kleiner die Frucht ist. So muß man wenigstens annehmen, wenn die Höhe des Subarachnoidealdruckes bestimmt wird von den Widerständen, welche der venöse Blutstrom auf seinem Wege von dem zentralen Nervensystem zum Herzen findet.

Indessen zeigt jede pathologische Zystenbildung, daß die Wandungen eines Hohlraumes, dessen Inhalt nur dem — abgesehen von den Niveaudifferenzen — nach allen Richtungen hin gleichen Drucke einer Flüssigkeit ausgesetzt sind, bei ihrem Wachstume Formen annehmen, welche sich der Hohlkugel nähern. Die Entwicklung der komplizierten Formen des Schädels ist daher nur zu erklären, wenn sich zu den Druckwirkungen des Liquor cerebrospinalis noch Druckwirkungen des Gehirns gesellen, welche wenigstens an einzelnen Stellen größer sind als der Druck des Liquor cerebrospinalis. Das mechanische Problem gestaltet sich dabei etwas weniger einfach, ist jedoch immerhin noch ohne besondere Schwierigkeiten zu lösen. Ich will daher beginnen mit einer Erörterung der Beziehungen, welche zwischen der Spannung der Schädelwand und dem Binnendrucke des Schädels bestehen.

Es kann kein Zweifel darüber bestehen, daß die Spannungen der Wand eines allseits geschlossenen Hohlraumes, soweit sie von dem in der Lichtung des Hohlraumes herrschenden Drucke abhängig sind, bedingt werden von der Höhe dieses Binnendruckes und von den Krümmungsradien der Wand, wobei vorläufig die Dicke der Wand außer Betracht bleiben soll. Wenn man sodann an irgendeinem Punkte des Schädeldaches eine Senkrechte oder Normale auf die Schädelinnenfläche errichtet, so kann man durch diese Normale zwei Ebenen legen, welche sich unter rechten Winkeln durchkreuzen. Die beiden Ebenen schneiden die Schädelinnenfläche in zwei Kurven, deren Krümmungsradien an dem gegebenen Punkte mit den Buchstaben r und r' bezeichnet werden können. Dreht man sodann die beiden Schnittebenen um die Normale, wobei die beiden Ebenen immer senkrecht aufeinander bleiben, so ändert sich die Länge der Krümmungsradien und man findet, wie Euler gezeigt hat, eine Stellung, bei welcher der eine Krümmungsradius einen größten Wert, ein Maximum R und gleichzeitig der andere Krümmungsradius ein Minimum R' erreicht. Die entsprechenden Schnittebenen bezeichnet man als Hauptnormalschnitte, und R und R' stellen die Hauptkrümmungsradien dar, welche am bequemsten als Maß für die an dem gegebenen Punkte der Schädelinnenfläche vorhandenen Krümmungen verwendet werden. Wie man aber auch die aufeinander senkrechten Schnittebenen dreht, immer bleibt bekanntlich für den gegebenen Punkt der Schädelinnenfläche

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'}.$$

Man kann somit die Größe $\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$ ohne Schwierigkeiten finden, auch wenn die

gewählten, aufeinander senkrecht stehenden Schnittebenen nicht mit den Hauptkrümmungsebenen zusammenfallen, was für diese Untersuchungen nicht ganz ohne praktische Bedeutung ist.

Es ergibt sich nunmehr die Aufgabe, die Beziehungen des Binnendruckes und der Wandspannung zu den beiden Hauptkrümmungsradien eines gegebenen Punktes des Schäeldaches zu bestimmen.

Wenn man ein Flächenelement $dx dy$ der Schädelinnenfläche betrachtet, so ruht auf seiner konkaven Seite der Druck $i dx dy$, vorausgesetzt, daß i den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck auf die Flächeneinheit darstellt (vgl. Textfig. 1). Außerdem wirken auf das Flächenelement die an den Rändern desselben übertragenen Spannungen, und man erkennt sofort, daß diese Spannungen und der soeben genannte Druck im Gleichgewicht sein müssen.

Eine weitere Überlegung zeigt nunmehr, daß alle parallel zur x -Achse und senkrecht zu diesem Flächenelemente geführten Durchschnitte des Flächenelementes bis auf Größen höherer Ordnung genau unter sich kongruent sind, und die gleiche Kongruenz findet sich unter den senkrechten Durchschnitten des Flächenelementes, welche parallel zu der y -Achse gelegt werden können. Man ist dann weiterhin imstande, das Flächenelement so zu orientieren, daß seine Ränder dx und dy und somit auch die x -Achse und die y -Achse mit den Hauptnormalschnittebenen zusammenfallen.

Unter dieser Voraussetzung entsprechen die Richtungen der x -Achse und der y -Achse zugleich den Hauptspannungsrichtungen, und es werden an den Rändern des Flächenelementes keine Schubkräfte übertragen. Vielmehr stehen die Hauptspannungsrichtungen senkrecht auf den Rändern des Flächenelementes (Textfig. 1).

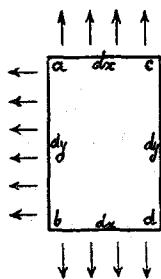


Fig. 1. Diagramm.

Bezeichnet man sodann die der x -Achse parallele Hauptspannung für die Längeneinheit des zur x -Achse senkrechten Durchschnittes der gekrümmten Fläche mit S_x und die der y -Achse parallele Hauptspannung für die Längeneinheit des zur y -Achse senkrechten Schnittes der gekrümmten Fläche mit S_y , so wird an dem Rande ab des Flächenelementes die Spannung $S_x dy$ übertragen und ebenso an dem Rande cd dieselbe Spannung $S_x dy$. An den beiden Rändern ac und bd dagegen beträgt die Spannung jeweils $S_y dx$.

Wenn nun alle auf das Flächenelement wirkenden Kräfte im Gleichgewicht sind, so muß der Druck $i dx dy$ gleich sein der Summe der Resultierenden, welche aus diesen, an den Rändern des Flächenelementes übertragenen Spannungen hervorgehen.

Die Resultierende AB , welche aus den an den Rändern ab und cd des gekrümmten Flächenelementes übertragenen Spannungen hervorgeht, findet sich nach dem Parallelogramm der Kräfte, unter Benutzung des Diagramms der Textfig. 2 gleich

$$AB = 2 S_x dy \sin \frac{\alpha}{2}$$

Nun ist jedoch bis auf Größen höherer Ordnung genau der Bogen DEF gleich der Sehne DF gleich dx , so daß der Winkel α gefunden wird,

$$\alpha = \frac{d_x}{R_x}$$

wobei R_x den Hauptkrümmungsradius in der Richtung der x -Achse darstellt. Weiterhin kann man, da α sehr klein ist, setzen $2 S_x dy \sin \frac{\alpha}{2} = S_x \alpha dy$, woraus weiterhin folgt:

$$\text{Resultierende } AB = S_x \frac{d_x dy}{R_x}$$

Ebenso findet sich die Resultierende $A' B'$ aus den an den Rändern ac und bd des Flächenelementes angreifenden Kräften gleich:

$$\text{Resultierende } A'B' = S_y \frac{d_x d_y}{R_y},$$

wenn R_y den Hauptkrümmungsradius in der Richtung der y -Achse bezeichnet.

Die Resultierenden AB und $A'B'$ stehen senkrecht auf dem Flächenelement und sind unter sich gleichgerichtet. Außerdem sind sie der Richtung des Flüssigkeitsdruckes entgegengesetzt, so daß sich als Bedingung des Gleichgewichtes ergibt

$$i dx dy = AB + A'B' = S_x \frac{d_x d_y}{R_x} + S_y \frac{d_x d_y}{R_y},$$

woraus folgt:

$$i = \frac{S_x}{R_x} + \frac{S_y}{R_y} \quad . \quad (1)$$

Die gestellte Aufgabe hat eine verhältnismäßig einfache und allgemein gültige Lösung gefunden. Wenn an einer bestimmten Stelle des Schäeldaches die Hauptkrümmungsradien gleich R_x und R_y sind, und wenn zugleich die zugehörigen Hauptspannungen des Schäeldaches mit S_x und S_y bezeichnet werden, so besteht zwischen diesen Größen und dem intrakraniellen Drucke i die Gleichung

$$i = \frac{S_x}{R_x} + \frac{S_y}{R_y}. \quad (1)$$

Die hier vorausgesetzten Spannungen S_x und S_y stellen die Gesamtwirkung des intrakraniellen Druckes dar. Sie sollen daher in folgendem als die Gesamthauptspannungen bezeichnet werden. Diese Gesamtpressionen verteilen sich auf die verschiedenen Schichten der Schädelwand, und zwar in der Weise, daß jeder Quadratmillimeter des Querschnittes der Schädelwand einen bestimmten Teil dieser Gesamtpression zu tragen hat, welchen man als Materialspannung bezeichnen kann. Wenn dann s_x die Materialspannung in der Richtung der x -Achse und s_y die Materialspannung in der Richtung der y -Achse ausdrücken und wenn zugleich d die Dicke der Schädelwand darstellt, so hat man:

$$s_x = s_x d \quad (2)$$

$$s_y = s_y d' \quad (3)$$

und die Gleichung (1) geht über in

$$i = \frac{s_x d}{R_x} + \frac{s_y d'}{R_y} \quad (4)$$

Die in meiner eingangs genannten Mitteilung über die sagittale Synostose niedergelegten histomechanischen Anschauungen geben Grund zu der Annahme, daß nach Abschluß der Wachstumsvorgänge das Knochengewebe des Femur in

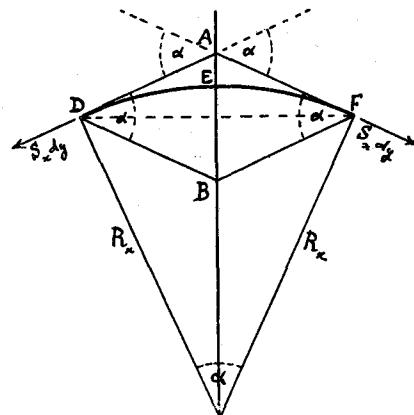


Fig. 2 Diagramm. Der senkrechte Durchschnitt des Flächenelementes, welcher parallel der x -Achse gerichtet ist, wird durch den Bogen DEF gegeben, dessen Krümmungsradius gleich R_x bemessen ist.

der Richtung seiner stärksten Beanspruchung einer durchschnittlichen Materialspannung von annähernd 6,5 g für den Quadratmillimeter unterliege. Das Knochengewebe als dreidimensionaler Körper weist jedoch noch zwei weitere Hauptspannungen auf, welche senkrecht zu der soeben genannten, die stärkste Beanspruchung tragenden Hauptspannungsrichtung stehen. In diesen beiden weiteren Hauptspannungsrichtungen waren allerdings die einzelnen Knochenlamellen des Femur überhaupt nicht direkt belastet. Unter diesen Umständen ist man nicht in der Lage, von vornherein etwas Bestimmtes über die Größe der beiden Hauptspannungen s_x und s_y der Schädelwand auszusagen. Indessen liegt es bei der unregelmäßigen Form der Schädelkapsel nahe anzunehmen, daß im allgemeinen die beiden senkrecht aufeinander stehenden Materialspannungen s_x und s_y ungleich groß seien.

Ich habe sodann eine große Anzahl der später mitzuteilenden Messungen der Schädelwand dazu benutzt, um zu prüfen, ob irgendeine bestimmte Beziehung zwischen der numerischen Größe von s_x und s_y nachweisbar sei. Doch blieb dies ohne Erfolg. An manchen schwierigeren Stellen, namentlich an der Sella turcica, stieß ich sogar auf ganz unwahrscheinliche Zahlen. Dagegen fand sich die bemerkenswerte Tatsache, daß man an anscheinend sehr verschiedenartig gebauten Stellen des Schädels nahezu gleiche Materialspannungen findet, wenn man annimmt, die beiden Materialspannungen s_x und s_y seien gleich groß. Setzt man $s_x = s_y = s$, so geht die Gleichung (4) über in

$$i = sd \left[\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right]. \quad (5)$$

Diese Gleichung (5), welche ihrer Form nach gewisse Übereinstimmungen darbietet mit der Gleichung, welche Laplace¹⁾ für die Spannung gekrümmter Flüssigkeitsoberflächen aufgestellt hat, ist erfüllt, wenn die Materialspannungen in allen zu der Oberfläche des Schädeldaches tangentialen Richtungen gleich groß sind. Es fragt sich daher zunächst, ob die Struktur und die Architektur der Schädelwand eine solche Annahme gestattet.

Das Schädeldach besteht aus der äußeren und der inneren Glastafel, welche durch eine mehr oder weniger breite Spongiosaschicht, die Diploe miteinander verbunden sind. In den beiden Glastafeln kann man sodann Grundlamellen und Haversche Lamellensysteme unterscheiden. Untersucht man in Dünnschliffen²⁾, welche in Wasser oder in Xylolkanaabalsam liegen oder nach geeigneter Entkalkung in Dünnschnitten, so kennzeichnen sich die Grundlamellen der äußeren und der inneren Glastafel durch ihren Verlauf, welcher der äußeren und der inneren Oberfläche des Schädeldaches parallel ist. Demgemäß verlaufen auch die Knochenfibrillen dieser Grundlamellen sämtlich der äußeren und der inneren Oberfläche des Schädeldaches parallel, zeigen jedoch im übrigen erhebliche Un-

¹⁾ Laplace, Traité de mécanique céleste, Bd. 4, Paris 1805. Die Gleichung von Laplace kann als ein spezieller Fall der hier entwickelten Gleichungen betrachtet werden.

²⁾ Über die Technik des Schleifens und der Färbung der Knochen folgen später einige Angaben.

regelmäßigkeiten. Die Fibrillenzüge benachbarter Grundlamellen durchkreuzen sich keineswegs immer in annähernd rechten Winkeln, und vor allem ist es nicht möglich, das Vorwiegen bestimmter Verlaufsrichtungen der Fibrillenzüge nachzuweisen. Tangentiale Schritte und Schnitte der Glastafeln zeigen sowohl im polarisierten wie im unpolarisierten Lichte sehr wechselnde Verlaufsrichtungen der Fibrillenzüge, die allerdings nicht überall leicht zu verfolgen sind. Leichter gelingt dies auf Schritten und Schnitten, die senkrecht zu der Schädeloberfläche stehen, namentlich bei Benutzung des Polarisationsapparates. Doch empfiehlt es sich, in diesem Falle immer zwei, die ganze Dicke der Schädelwand durchgreifende Schritte oder Schnitte, die wiederum senkrecht aufeinander stehen und von unmittelbar benachbarten Teilen des Schädels herühren, miteinander zu vergleichen. Man wird dann ein erhebliches Vorwiegen einzelner Faserrichtungen in den Grundlamellen mit Bestimmtheit ausschließen können.

Die Struktur der Grundlamellen des Schädeldaches bietet somit ebenso wenig wie ihre allgemeine Anordnung Besonderheiten, welche auf Ungleichheiten in den tangential zur Schädeloberfläche gerichteten Materialspannungen schließen lassen würden. Vielmehr spricht die wechselnde, anscheinend unregelmäßige Anordnung der Fibrillenzüge in den Grundlamellen dafür, daß die tangentialen Materialspannungen in der Wand des Schädeldaches keine bestimmte Richtung bevorzugen und somit an jeder einzelnen Stelle des Schädeldaches nach allen Richtungen hin gleiche Größe besitzen. In diesem Falle liegt es zugleich nahe anzunehmen, daß die tangentialen Materialspannungen auch an den verschiedenen Stellen des Schädeldaches gleiche Größe besitzen, wie man zu erwarten hat, wenn nach meinen früher entwickelten histomechanischen Anschauungen das Wachstum des Knochengewebes stille steht bei einer bestimmten Durchschnittsbelastung desselben. Diese bestimmte Durchschnittsbelastung würde die überall gleiche tangentiale Materialspannung ergeben. Wenn aber die tangentialen Materialspannungen überall gleich sind, so müssen auch an jeder einzelnen Stelle des Schädeldaches die Gesamtspannungen nach allen tangentialen Richtungen gleich sein. Denn die Gesamtspannung ist für jede Stelle des Schädeldaches gleich der Materialspannung multipliziert mit der Dicke des Schädeldaches. Zugleich ergibt sich aus der wechselnden Dicke des Schädeldaches, daß die an jeder Stelle des letzteren nach allen tangentialen Richtungen hin gleich große Gesamtspannung doch an verschiedenen Stellen des Schädeldaches erhebliche Unterschiede aufweisen muß.

Wie man bemerkte, ist die nach allen tangentialen Richtungen hin gleich große Materialspannung für die vorliegenden Fragen von großer Bedeutung. Wenn aber diese aus den unregelmäßigen Verlaufsrichtungen der Knochenfibrillenzüge und dem Fehlen von bevorzugten Faserrichtungen in den Grundlamellen des Schädeldaches erschlossen wurde, so kann dieser Schluß doch erst befriedigen,

wenn sich zugleich eine Erklärung dieser Besonderheiten gewinnen läßt. Zu diesem Zwecke muß ich bereits an dieser Stelle in vorläufiger Weise auf die Entwicklung des Schädeldaches eingehen. Die Untersuchungen v. Ebners¹⁾, Gebhardt²⁾ und Triepels³⁾ haben zu dem Ergebnisse geführt, daß die Verlaufsrichtungen der Knochenfibrillen nur in ganz frisch apponierten Knochenlamellen in Beziehung zu der funktionellen Beanspruchung stehen. Später sollen diese Beziehungen verloren gehen infolge des ausgiebigen Umbaues des jungen Knochens, bei welchem Knochenneubildung und Knochenresorption in mannigfaltigem Wechsel zusammenwirken. Die Knochenfibrillen benachbarter Lamellensysteme zeigen dann sehr verschiedenartige Verlaufsrichtungen, welche anscheinend unabhängig sind von den Richtungen der funktionellen Beanspruchung des fertigen Skelettstückes.

Im Schädeldache kann man zu den gleichen Anschauungen gelangen, wenn man annimmt, daß in den frisch apponierten Knochenlamellen die Fibrillenrichtungen bestimmt werden von den das Wachstum auslösenden Spannungszunahmen, welche sich zu den im übrigen in allen tangentialen Richtungen gleichgroßen Materialspannungen addieren.

Bereits oben mußte darauf hingewiesen werden, daß sich die Ausbildung der verwickelten Formen des Schädeldaches nur erklären läßt, wenn man annimmt, daß der Druck des wachsenden Gehirns bald an der einen, bald an der anderen Stelle stärker wird als der Druck des Liquor cerebrospinalis. Daraus aber ergibt sich, daß die das Wachstum der Schädelwand auslösenden Spannungszunahmen ihrer Richtung nach mannigfaltigem Wechsel unterworfen sind. Dieser wechselnden Richtung der Spannungszunahmen würde dann die wechselnde Verlaufsrichtung der neugebildeten Fibrillen der Grundlamellen des Schädeldaches entsprechen und diese wechselnde Verlaufsrichtung der Fibrillen würde dauernd erhalten bleiben, weil sie durch nachträgliche Änderungen der Richtung der Spannungszunahmen nicht wesentlich geändert wird⁴⁾ und auch bestehen bleibt, wenn am

¹⁾ v. Ebner. Sitzungsber. d. k. k. Akad. in Wien, Math.-naturw. Kl., III. Abt., Bd. 70, 1874; Bd. 72, 1875; Bd. 75, 1877; Bd. 99, 1890.

²⁾ Gebhardt, Arch. f. Entwicklungsmechanik Bd. 11, 12, 1901; Bd. 20, 1905.

³⁾ Triepel, Einführung in die physikalische Anatomie. Wiesbaden 1902. — Anat. Anz. Bd. 23, 1903; Bd. 24, 1904. — Anat. Hefte (99) Bd. 33, 1907.

⁴⁾ Wenn die Richtungen der Fibrillenzüge der Knochenlamellen und ihre Durchkreuzungswinkel durch nachträgliche Änderungen der Spannungsrichtungen nicht direkt beeinflußt werden, so müssen sie demungeachtet auf indirektem Wege eine geringe Störung erfahren durch das interstitielle Wachstum des Knorpelgewebes. Dieses ist, wie ich früher bei Besprechung der sagittalen Synostose anzunehmen genötigt war, von der Belastung oder Spannung abhängig und muß in der Richtung der stärkeren Belastung oder Spannung ein ausgiebigeres sein. Ändert sich also die Richtung der stärkeren Spannung in einer jungen, aus zahlreichen sich durchkreuzenden Faserzügen bestehenden Knochenplatte, so müssen sich notwendigerweise die Durchkreuzungswinkel der Fibrillenzüge ändern, indem letztere zugleich geringe Ablenkungen aus ihrer ursprünglichen Richtung erleiden. Dieses Verhältnis scheint mir die Erklärung dafür zu bieten, daß Gebhardt in den Fibrillenzügen der Haverschen

Schlusse des Wachstums die Spannungszunahmen verschwinden, indem zugleich die Materialspannungen nach allen tangentialen Richtungen hin gleich groß werden.

In gleicher Weise erklären sich auch die Befunde, welche man an den Haverschen Lamellensystemen der Glastafeln und an der Spongiosa erheben kann, durch die Annahme von Materialspannungen, welche in allen zur Schädeloberfläche tangentialen Richtungen gleiche Größe haben. Betrachtet man die Haverschen Lamellensysteme der Glastafeln als Röhren, welche parallel und senkrecht zu ihrer Achse belastet oder gespannt sind — und die meisten mechanischen Beanspruchungen derselben lassen sich auf diese Belastungs- oder Spannungsrichtungen zurückführen — so ist zu verstehen, daß die Knochenfibrillen dieser Lamellensysteme den Lamellenoberflächen parallel verlaufen und sich in den verschiedenen Lamellen unter Winkeln durchkreuzen, welche zunächst rechten Winkeln entsprechen, jedoch später durch das interstitielle Wachstum etwas größer oder kleiner als rechte Winkel werden¹⁾. In der Schädelwand sind jedoch, ähnlich wie in anderen Skelettstücken die Haverschen Lamellensysteme infolge des Zusammenwirkens von Resorptions- und Appositionsvorgängen vielfach unterbrochen und in ihrer Anordnung erheblich gestört, ohne daß man entsprechende, nachträgliche Änderungen in der Richtung der Fibrillenzüge erkennen könnte. Man wird daher wiederum zu der Annahme genötigt, daß Änderungen in der Richtung der kleinen Spannungserhöhungen, welche das Wachstum des Schädeldaches auslösen, die Richtung der bereits früher gebildeten Knochenfibrillen nur indirekt durch entsprechende Änderungen der Richtung des stärkeren interstitiellen Wachstums zu beeinflussen vermögen. Zugleich aber erkennt man, daß die soeben genannten Unregelmäßigkeiten in dem Verhalten der Haverschen Lamellensysteme sich am einfachsten vereinbaren lassen mit der Annahme von Materialspannungen, welche — nach Schwund der das Wachstum bedingenden Spannungserhöhungen — in allen zur Oberfläche des Schädeldaches tangentialen Richtungen gleich groß sind.

Ahnlich liegen die Verhältnisse bezüglich der Spongiosa des erwachsenen Schädeldaches. Man kann zunächst Dünnschliffe derselben herstellen, welche der Schädeloberfläche parallel verlaufen und mehrere Quadratzentimeter Flächenausdehnung besitzen. Auf diesen überzeugt man sich davon, daß die Spongiosabalken, ungeachtet ihrer regelmäßigen Gestalt und Anordnung, eine im ganzen sehr unregelmäßige Kombination von Grundlamellen und Speziallamellen darstellen,

Lamellensysteme so häufig Durchkreuzungswinkel fand, die größer oder kleiner als rechte Winkel waren. Unter den hier in Betracht kommenden Umständen können jedoch diese Ablenkungen der Fibrillenzüge und Änderungen ihrer Durchkreuzungswinkel niemals so ausgiebige werden, daß die Richtung der abgelenkten Fibrillenzüge der Grundlamellen des Schädeldaches wieder mit den geänderten Richtungen der Spannungszunahmen zusammenfällt. Das interstitielle Wachstum wird daher nur die Mannigfaltigkeit der Verlaufsrichtung der Faserzüge in den Grundlamellen des Schädeldaches steigern.

¹⁾ Vgl. die Fußnote auf S. 214.

während die Spongiosamaschenräume in allen der Oberfläche des erwachsenen Schädels parallelen Richtungen eine annähernd gleiche Ausbildung zeigen. Die Unregelmäßigkeiten der Struktur der Spongiosabalken führen dann wieder zu der Annahme von Materialspannungen, welche in allen tangentialem Richtungen gleichgroße sind, während die Gleichmäßigkeit der Architektur tangentialem Dünnschliffe der Spongiosa dafür spricht, daß an der gegebenen Stelle die Gesamtspannungen in allen Richtungen der Schädeloberfläche gleich groß waren. Denn, wenn diese Gesamtspannungen in zwei aufeinander senkrechten, der Schädeloberfläche parallelen Richtungen wesentliche Unterschiede aufweisen würden, müßte man zufolge der am Oberschenkelhals und an anderen Skeletteilen gewonnenen Erfahrungen wohl erwarten, daß die Architektur der Spongiosa entsprechende Besonderheiten zeigen würde. Es wäre anzunehmen, daß die Spongiosamaschen in der Richtung der größeren Hauptspannung verlängert wären. Da dies nicht der Fall ist, kann man aus der Gestalt der Spongiosamaschen auf eine Gleichheit der tangentialem Gesamtspannungen für jede einzelne Stelle des Schäeldaches schließen, woraus sich weiterhin, weil die Gesamtspannung gleich der Materialspannung multipliziert mit der Dicke des Schäeldaches ist, auch ergibt, daß die Materialspannungen an jeder einzelnen Stelle in allen tangentialem Richtungen gleiche Größe besitzen.

Indessen kommen in der Spongiosa des erwachsenen Schäeldaches gelegentlich Stellen vor, an welchen die Spongiosamaschen nach einer Richtung hin verlängert sind und somit Anordnungen darbieten, welche mit den soeben gezogenen Schlüssen im Widerspruch zu stehen scheinen. Solche Stellen werden vorzugsweise an den Rändern der platten Schädelknochen bemerkt. Sie sind jedoch nach Zahl und Ausdehnung so beschränkt, daß sie kaum der Erwähnung verdienen. Man findet sie am leichtesten, wenn man mit der Feile die äußere Glastafel des erwachsenen Schäeldaches in ihrer ganzen Ausdehnung wegnimmt. Dabei überzeugt man sich zugleich, daß diese Ungleichheiten des Maschenbaues der Spongiosa zu selten und unerheblich sind, um für diese Untersuchung in Betracht zu kommen. Sie erscheinen an Stellen, an welchen die fötale Struktur des Schäeldaches noch nicht völlig geschwunden ist. Wie dies zu verstehen sei, kann ich wohl am einfachsten erläutern an einer Stufenreihe von tangentialem Dünnschnitten des mit Salpetersäure entkalkten Stirnbeines eines 19jährigen Mannes.

Diese Stufenschnitte sind, soweit sie die Spongiosa betreffen, in Textfig. 3 bei dreifacher Vergrößerung wiedergegeben. Der oberste Schnitt *a* und der tiefste Schnitt *f* enthalten noch Teile der äußeren und inneren Glastafel, weil an der gegebenen Stelle, in der Nähe des Stirnhöckers das Stirnbein gegen letzteren hin an Dicke abnimmt. Dabei ergeben die Pfeile die Richtung, in welcher — etwa 12—18 mm von der unteren rechten Ecke der Schnitte entfernt — der Stirnhöcker zu suchen ist. Betrachtet man sodann den Schnitt *f*, so wird man vermutlich zu der Ansicht gelangen, daß hier die Spongiosamaschen in der Richtung

des Pfeiles verlängert sind. Es ist dies eine Anordnung, welche zu erwarten wäre, wenn die Gesamtspannung in der Richtung zu dem Tuber hin ein Maximum aufweisen würde, somit größer wäre, als in allen anderen Richtungen. Die Verlängerung der Spongiosamaschen in der Richtung zum Tuber frontale hin hat zur Folge, daß die durch den Pfeil angedeuteten, zum Tuber gerichteten Tangentialspannungen sich auf eine größere Zahl von Knochenspangen verteilen, während die senkrecht zu der Pfeilrichtung wirkenden Tangentialspannungen nur eine geringere Zahl von Knochenspangen zur Verfügung haben. Bei annähernd gleicher durchschnittlicher Breite der Knochenspangen würde man daher zu gewärtigen haben, daß die radiär zum Tuber gerichteten Gesamtspannungen größer wären als die in allen anderen Richtungen bestehenden Gesamtspannungen. Damit ist ein Verhältnis gegeben, welches, wie später genauer ausgeführt werden soll, infolge des das Wachstum bedingenden Spannungszuwachses in den ersten Lebensjahren und während der Fötalperiode deutlicher ausgeprägt ist.

In dem vorliegenden Falle, kurz vor Schluß des Wachstums ist jedoch offenbar der das Wachstum bewirkende Spannungszuwachs verschwindend gering. Denn in den Stufenschnitten *b* bis *e* findet man keine Spur einer Verlängerung der Spongiosamaschen, wohl aber in dem Stufenschnitte *a* eine Anordnung, welche die im Schnitt *f* enthaltene Besonderheit ausgleicht. Hier in Stufenschnitt *a* erscheinen die Spongiosamaschen in einer ungefähr senkrecht auf der Pfeilrichtung stehenden Richtung verlängert. Nach den gleichen Gesichtspunkten hätte man hier ein geringes Vorwiegen der senkrecht zu der Pfeilrichtung stehenden Gesamtspannungen anzunehmen. Damit wird offenbar ein Ausgleich erzielt, der für die ganze Dicke des Knochens eine nach allen Richtungen hin gleich große Gesamtspannung bei überall gleicher Materialspannung anzunehmen gestattet. Ein solches Verhältnis scheint mir zuweilen auch da und dort noch in späteren Lebensaltern bestehen zu bleiben und

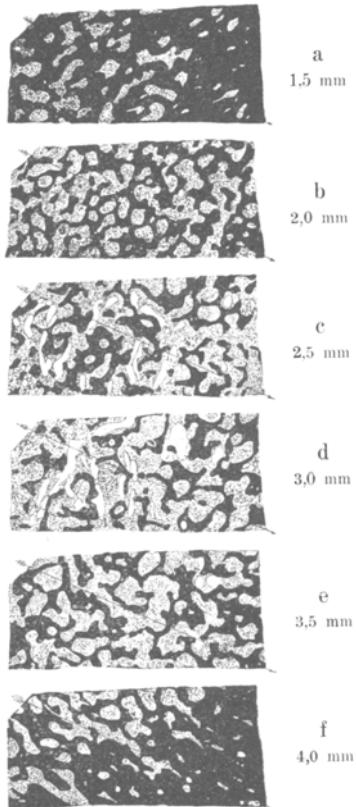


Fig. 3. Tangentiale Stufenschnitte des Stirnbeins in geringer Entfernung von dem in diesem Falle wenig ausgeprägten Stirnhöcker. Die Pfeile zeigen die Richtung auf diesen Höcker. Aus den beigesetzten Millimeterzahlen ergeben sich annähernd die Entfernungen der Mitte der Schnitte von der Außenfläche des Schädeldaches. Dunkle Färbung der Knochenspangen durch Hämatoxylin. In den Massenhöhlen sind die klaffenden, größeren Venen der Spongiosa erkennbar. Entkalkung mit Salpetersäure. Zelloidineinbettung. Schnittdicke 0,02 mm. Schädel III. Mann, 19 Jahre alt. Vergr. 3 fach.

die gelegentlich vorkommenden Ungleichmäßigkeiten der Gestaltung der Spongiosamaschen zu erklären.

Auffällig ist in den Schnitten *c* und *d* der Textfig. 3 die geringe Mächtigkeit der Spongiosa-balken. Aus dieser geht hervor, daß nur relativ geringe mechanische Beanspruchungen in einer zu der Schnittebene senkrechten Richtung erfolgen. Es hängt dies damit zusammen, daß nach obigen Gleichungen ein sehr geringer Druck auf die Innenfläche des Schädeldaches genügt, um in demselben verhältnismäßig starke tangentiale Spannungen zu erzeugen. Dieser geringe Druck setzt sich auch in die Schädelwand hinein fort, wird jedoch um so kleiner, je weiter er in der Dicke der Schädelwand vorschreitet, um an der Außenfläche derselben gleich Null zu werden.

Wenn man auf Grund aller unserer Erfahrungen berechtigt ist anzunehmen, daß die Struktur und Architektur der Knochensubstanz abhängig ist von der mechanischen Beanspruchung derselben, so führen die soeben besprochenen Beobachtungen mit großer Wahrscheinlichkeit zu dem Schlusse, daß für jede einzelne Stelle des normalen, erwachsenen Schädeldaches sowohl die Gesamtspannungen als die Materialspannungen in allen zu der Schädeloberfläche tangentialem Richtungen gleiche Größe besitzen.

Dieses Ergebnis wurde gewonnen unter der Voraussetzung, daß die Ausbildung der verwickelten Formen des Schädelns nur zu erklären ist, wenn nicht nur der Liquor cerebrospinalis sondern auch das Gehirn Druckwirkungen auf die Innenfläche des Schädelns ausübt. Man kann sich dieses Verhältnis in der Weise vorstellen, daß der auf die Innenfläche des Schädelns lastende Druck an keiner Stelle geringer ist als der Druck des Liquor cerebrospinalis, während an einzelnen Stellen der auf der Schädelinnenfläche lastende Druck des Gehirns größer ist als der Druck der zerebrospinalen Flüssigkeit, welchen man auch den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck nennen kann. Diese Vorstellung erscheint berechtigt, weil der Liquor sich überall da zwischen Gehirn und Schädelwand eindringen muß, wo der Druck des Gehirns auf letztere kleiner als der intrakranielle Flüssigkeitsdruck ist. Während aber der Druck in einer Flüssigkeit, wenn man von den Wirkungen der Schwerkraft absieht, nach allen Richtungen hin gleich groß ist, kann man dies von dem Drucke des Gehirns in keiner Weise annehmen. Es bedarf daher einer besonderen Erklärung, wenn ungeachtet dieser Ungleichheit der Druckwirkungen die tangentialem Spannungen des Schädeldaches für jede einzelne Stelle nach allen Richtungen hin gleich groß sind.

Zu dieser Erklärung gelangt man ohne wesentliche Schwierigkeiten, indem man von einem relativ einfachen Problem ausgeht. Die Wand einer Seifenblase besteht aus einer dünnen Flüssigkeitsschicht, welche von dem Drucke des gasförmigen Inhaltes der Blase gespannt ist. So lange keine äußeren Kräfte auf eine solche Seifenblase wirken, besitzt sie die Gestalt einer Kugel, da an allen Punkten ihrer Wand die tangentialem Spannungen nach allen Richtungen hin gleich groß sind. Man vermag der Blase jedoch sehr wohl andere Formen zu verleihen. Wenn dieselbe an dem unteren Ende eines senkrecht gestellten Glasröhrchens *t* (Textfig. 4) hängt, kann man von diesem Glasröhrchen her einen Tropfen Seifenlösung

auf die Seifenblase gleiten lassen. Die Flüssigkeit sammelt sich in diesem Falle alsbald an dem unteren Pole G der Seifenblase an und wirkt hier als ein Gewicht, welches die Seifenblase in der Richtung der Senkrechten verlängert. Die Kugelform der Seifenblase verschwindet, indem diese ungefähr die Gestalt eines Umdrehungsellipsoides annimmt, dessen senkrecht stehende Rotationsachse verlängert ist, während zugleich die horizontalen Achsen des Ellipsoides kürzer geworden sind als der Durchmesser der Kugel, aus welcher das Ellipsoid hervorging.

Wenn man diese Erscheinung näher prüft, bemerkt man, daß hier zu den nach allen Richtungen hin gleich großen, von dem Drucke des gasförmigen Inhaltes erzeugten Spannungen, welche in der Wand der kugelförmigen Seifenblase vorhanden waren, eine von Pol zu Pol reichende Zugspannung hinzutreten ist, welche von dem Gewichte G des Flüssigkeitstropfens hervorgerufen wurde. Dieser Spannungszuwachs bewirkte zunächst, daß in der Blasenwand die meridionalen Spannungen größer wurden als die zu diesen senkrecht stehenden Spannungen, welche man der Kürze halber als Breitenparallelspannungen bezeichnen kann. Sodann ergab sich als Folge dieser Spannungsungleichheiten eine Verlängerung der Seifenblase in der Richtung des Zuges des angehängten Flüssigkeitstropfens, und diese Verlängerung nahm so lange zu, bis die Breitenparallelspannungen wieder gleich den Meridionalspannungen wurden. Damit hatte dann die Wand der Seifenblase einen Gleichgewichtszustand erreicht, bei welchem die Wandspannungen der von L a p l a c e aufgestellten Gleichung

$$i = S \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (6)$$

Folge leisten. Diese Gleichung, welche sich auch in einfacher Weise aus der oben von mir aufgestellten allgemeiner gültigen Gleichung (1) ableiten läßt, indem man $S = S_x = S_y$ setzt, beruht auf dem Umstände, daß an allen Stellen der Seifenblasenwand die tangentialen Spannungen nach allen Richtungen hin gleich groß sind. Indessen wird diese Gleichheit nach Belastung der Seifenblase mit dem Gewichte G nur dadurch erreicht, daß die Gestalt und die Krümmungsradien der Blase sich so lange ändern, bis die von dem gasförmigen Blaseninhalt erzeugten Wandspannungen zusammen mit den von dem Gewichte des Flüssigkeitstropfens hervorgerufenen Spannungen den nach allen Richtungen gleichgroßen Wert S erreichen. Dieser Wert S stellt jedoch eine Größe dar, welche ausschließlich bestimmt wird von den Eigenschaften der Materie, welche die Wand der Seifenblase bildet.

Ahnlich gestalten sich die Beziehungen bei dem Wachstum des menschlichen Schäeldaches. Geht man aus von einer allseits geschlossenen Schädelkapsel beliebiger Form, deren Wand infolge des Druckes ihres teils flüssigen, teils festen

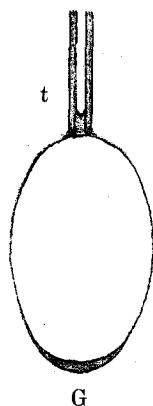


Fig. 4. Senkrecht gestelltes Glasröhren t mit Seifenblase, welche am unteren Pole einen Tropfen Seifenlösung trägt.

Inhaltes überall die nach allen Richtungen der Tangente hin gleich große Materialspannung s aufweist, so würde, wenn diese Materialspannung s zugleich die kritische Spannung s_1 ist, das Wachstum des Schädels stillestehen. Außerdem würde an allen Stellen die Dicke der Schädelkapsel der oben abgeleiteten Gleichung

$$i = s d \left[\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right] \quad (7)$$

entsprechen, welche man auch schreiben kann:

$$s = \frac{i}{d \left[\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right]} \quad (8)$$

Unter den gegebenen Voraussetzungen ist es jedoch gänzlich undenkbar, daß die Gesamtspannung sd und der auf der Schädelinnenfläche lastende Druck i gleichzeitig für alle Teile der Schädelwand konstant sind. Dies wäre nur möglich, wenn die Schädelkapsel die Gestalt einer Hohlkugel besitzen würde, wenn somit die Krümmungsradien R_x und R_y überall gleich wären. Indessen zeigt der Schädel in keiner Stufe seiner Entwicklung eine kugelförmige Gestalt.

Es verbleiben unter diesen Verhältnissen noch zwei weitere Möglichkeiten, mit welchen man zu rechnen hat.

Erstens wäre es denkbar, daß der Druck, den der Schädelinhalt auf die Schädelwand ausübt, überall gleich groß wäre. In diesem Falle müßte man, nach empirischer Bestimmung der Dicke d und der Krümmungsradien R_x und R_y an verschiedenen Stellen des Schädeldaches mit Hilfe der Gleichung (8) überall gleiche Werte für s finden. Daß dies nicht zutrifft, geht aus den später mitzuteilenden Beobachtungen mit Sicherheit hervor.

Als zweite Möglichkeit kommt sodann in Betracht, daß der Druck i , den der Schädelinhalt auf die Schädelwand ausübt, an verschiedenen Stellen ungleich sein kann. Dies entspricht offenbar der Wirklichkeit in sehr vollkommener Weise, da die Impressiones digitatae und die Juga cerebralia der Schädelinnenfläche unmittelbar darauf hinweisen, daß manche Hirnwindungen einen stärkeren Druck auf die Schädelinnenfläche ausüben, der größer ist als der Druck des Liquor cerebrospinalis. Man gelangt damit zu der bereits früher berührten Anschauung, derzufolge die Schädelinnenfläche im allgemeinen unter dem Drucke des Liquor cerebrospinalis steht, daß jedoch an einzelnen Stellen der von gewissen Teilen des Gehirns auf die Schädelinnenfläche ausgeübte Druck höher ist als der Druck des Liquor. Man wird dann an allen Stellen, an welchen nur der Druck des Liquor auf die Schädelinnenfläche wirkt, mit Hilfe der Gleichung (8) übereinstimmende Werte für die Materialspannung s finden, vorausgesetzt, daß man zuvor an diesen Stellen der Schädelwand die Werte von d , R_x und R_y empirisch bestimmt hat. An allen Stellen dagegen, an welchen das Gehirn einen stärkeren Druck auf die Schädelinnenfläche ausübt, wird die Gleichung (8) zu kleine Werte von s geben, wenn man für den Druck i nur den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck in Rechnung

setzt. Wenn man aber an zahlreichen Stellen, an welchen nur der intrakranielle Flüssigkeitsdruck wirksam ist, die Materialspannung s bestimmt hat, kann man unter der histomechanischen Voraussetzung, daß die Materialspannung s des Knochens überall gleich groß sein muß, diesen Wert von s benützen, um an den Stellen, an welchen das Gehirn einen Druck auf die Schädelinnenfläche ausübt, die Höhe dieses Druckes mit Hilfe der Gleichung (7) zu finden, vorausgesetzt, daß für diese Druckstellen die Werte von d , R_x und R_y bekannt sind. Die folgenden Beobachtungen werden diese Anschauungen als zu Recht bestehend erweisen.

Wenn man sich sodann die Frage vorlegt, wie sich das Wachstum eines solchen unregelmäßig gestalteten Schädels, der überall die tangentiale Materialspannung s aufweist, vollzieht, so kann man zunächst mit der Tatsache rechnen, daß der Schädelinhalt im Laufe der Jahre an Volumen zunimmt, während zugleich der interkraniale Flüssigkeitsdruck, wie früher erörtert wurde, nicht ganz unerheblich höher wird. Man wird daher annehmen dürfen, daß durch diese Veränderungen des Schädelinhaltes die Materialspannung in der Schädelwand während des Wachstums um ein geringes über den kritischen Wert s erhöht wird. Die Erhöhung der Materialspannung kann sodann betrachtet werden als die Ursache für ein entsprechendes Flächen- und Dickenwachstum der Schädelwand. Dieses Flächen- und Dickenwachstum aber würde ein vollkommen gleichmäßiges sein müssen, wenn die Erhöhung der Materialspannung überall eine gleichmäßige wäre und dieser Erfolg würde erreicht werden, wenn der auf der Schädelinnenfläche lastende Druck i , der an verschiedenen Stellen ungleich ist, überall eine proportionale Steigerung erfahren würde. Die Schädelkapsel würde dann in verschiedenen Wachstumsperioden, ungeachtet ihrer Größenzunahme, geometrisch ähnliche Gestalten zeigen.

Das Wachstum der Schädelwand ist jedoch kein vollkommen gleichmäßiges. Die Störungen, welche von der massigen mit der Schädelkapsel verbundenen Schädelbasis, von dem Muskelzug und von der Gravitation ausgehen, sind keineswegs unerhebliche. Sie haben in Verbindung mit dem ungleichen Wachstum der verschiedenen Hirnteile zur Folge, daß letztere stellenweise stärker auf die Schädelwand drücken. Die sich ergebenden Folgen für das Wachstum des Schädeldaches lassen sich in ihren allgemeinen Umrissen verfolgen, wenn man von der Vorstellung ausgeht, daß in dem gleichmäßig wachsenden Schädeldache der Druck des wachsenden Gehirnes an irgendeiner Stelle in stärkerem Grade zunimmt, als dies für ein gleichmäßiges Wachstum erforderlich wäre. In diesem Falle wird in der Umgebung der Druckstelle, die man als Druckpol bezeichnen kann, ein besonderer Spannungszuwachs in der Schädelwand auftreten, dessen Trajektorien wie Meridiane in dem Druckpol zusammenlaufen. Dieser Zuwachs der Gesamtspannung führt, da zunächst die Dicke der Knochenschale keine Änderung erfahren hat, zu einer etwas beträchtlicheren Vergrößerung der Materialspannung in der Richtung der Meridiane. Die erhöhte meridionale Materialspannung aber erzeugt ein ra-

scheres interstitielles und appositionelles Wachstum in den meridionalen Richtungen, welches verbunden ist mit einem Dickenwachstum der Schädelwand.

Durch das interstitielle und appositionelle, meridionale Wachstum wird der Druckpol und seine Umgebung etwas vorgewölbt. Die Vorwölbung aber ist notwendigerweise mit einer Abnahme des meridionalen Spannungszuwachses verbunden. Letzterer ruft somit Veränderungen hervor, welche ihn selbst wieder kleiner werden lassen. Demgemäß ist auch die Epoche des lokal verstärkten meridionalen Wachstums der Schädelkapsel, welche durch eine kurze Epoche lokal verstärkten Hirnwachstums hervorgerufen wird, nur von beschränkter Dauer. Das Ende einer solchen Wachstumsepoke wird aber erreicht, wenn durch diese Spannungsänderungen und durch das entsprechende Flächen- und Dickenwachstum der Schädelwand die tangentialen Materialspannungen nach allen Richtungen wieder unter sich gleich groß und gleich der Materialspannung des gleichmäßig wachsenden Schädeldaches geworden sind.

Das Schädeldach zeigt jetzt eine kleine Ausbauchung, die jedoch nur dann dauernd bestehen bleiben kann, wenn an dem Druckpole dauernd ein etwas stärkerer Druck von seiten des Gehirns auf die Schädelwand ausgeübt wird. Wie die durch das Gewicht eines Flüssigkeitstropfens in die Länge gezogene Seifenblase ihre ellipsoidische Form nur so lange beibehält, als die von dem Gewichte des Flüssigkeitstropfens erzeugte Spannung sich zu den von dem Drucke des Blaseninhaltes erzeugten Spannungen addiert, so ist der Bestand der kleinen Ausbauchung des Schädeldaches, welche von der lokalen Druckwirkung des Gehirns veranlaßt wurde, geknüpft an das Zusammenwirken der Spannungen, welche die dauernde lokale Druckwirkung des Gehirns hervorruft, mit den Spannungen, welche von dem Drucke des Liquor cerebrospinalis erzeugt werden. Hier wird es sehr auffällig, daß sowohl bei der Spannungsgleichung von Laplace als bei den von mir aufgestellten, etwas allgemeineren Spannungsgleichungen keinesweges nur die von dem Flüssigkeitstrucke i erzeugten Spannungen, sondern zugleich auch alle anderen Spannungen berücksichtigt werden, welche in der Wand eines Hohlkörpers enthalten sind.

Die lokale Ausbauchung in der Wand des wachsenden Schädeldaches kann in der Folge, wie soeben gezeigt wurde, an dem gleichmäßigen Wachstum der Schädelwand teilnehmen oder nachträglich durch neu auftretende Druckwirkungen des Gehirns verändert werden. Am Schlusse des gesamten Körperwachstums muß jedoch auch im Gebiete der durch lokale, stärkere Druckwirkungen des Gehirns erzeugten Formabweichungen und Ausbauchungen der Schädelwand die Dicke des Schädeldaches soweit zunehmen, daß die tangentialen Materialspannungen auf den kritischen Wert s_1 , erniedrigt werden, bei welchem weder ein Wachstum noch ein Schwund der Knochensubstanz stattfindet.

Der numerische Wert dieser kritischen Materialspannung s_1 , wird ausschließlich von den Eigenschaften der Knochensubstanz bestimmt. Er stellt eine Konstante dar, auf welche sich die Spannung des Knochengewebes am Schlusse des Wachstums notwendigerweise einstellt. Dieser konstante Wert s_1 ist im Schädeldach in allen Richtungen der Tangente von gleicher Größe, woraus folgt, daß auch die Gesamtspannungen, also die Dicke des Schädeldaches d multipliziert mit der kritischen Spannung s_1 , am Schlusse des Wachstums an jeder einzelnen Stelle des Schädeldaches nach allen in der Tangentialebene gelegenen Richtungen gleich groß sein müssen. In dieser Beziehung stimmt die Gesamtspannung des Schädeldaches mit der nach allen tangentialen Richtungen gleich großen Gesamtspannung der Seifenblase überein. Doch besteht zugleich ein erheblicher Unterschied. Während in der festen Substanz des knöchernen Schädeldaches die Gesamtspannungen sich mit der Dicke der Knochenwand von Stelle zu Stelle ändern, ist der numerische Wert der nach allen tangentialen Richtungen gleich großen Gesamtspannung der dünnen Wand der Seifenblase eine ausschließlich von den Eigenschaften der Flüssigkeit abhängige Konstante. Diese ist dieselbe für alle Stellen der Seifenblasenwand und ändert sich auch nicht, wenn man die Seifenblase innerhalb gewisser Grenzen stärker aufbläst. Schließlich aber wäre noch darauf hinzuweisen, daß die kritische Materialspannung s_1 des Knochengewebes, welche am Schlusse des Wachstums eine Konstante darstellt und für alle Teile der Schädelkapsel gleich groß ist, voraussichtlich, wie alle anderen Konstanten des menschlichen und tierischen Körpers individuelle Variationen aufweist und wahrscheinlicherweise außerdem im Laufe des Lebens und namentlich im Laufe des fotalen und postfotalen Wachstums Änderungen erfährt. Dies erscheint um so wahrscheinlicher, weil der fötale und kindliche Knochen ungleich weicher ist als der an Kalksalzen erheblich reichere Knochen des Erwachsenen.

Notwendigerweise verbreiten sich bei den soeben geschilderten Wachstumsvorgängen des Schädels die in der Umgebung der Druckpole auftretenden meridionalen Spannungszuwachse über den ganzen Schädel, wenn sie auch in größerer Entfernung von den Druckpolen sehr rasch an Größe abnehmen. Demgemäß müssen auch die von den Druckpolen erzeugten Ausbauchungen der Schädelwand das Gebiet der direkten Druckwirkung des Gehirns wesentlich überschreiten. Man begreift daher, daß sich an der Schädelinnenfläche immer zahlreiche Stellen finden, an welchen sich der in den Maschen der weichen Hirnhäute enthaltene Liquor cerebrospinalis zwischen die Hirnoberfläche und die knöcherne Schädelwand einschiebt. Bereits R. Virchow hat sich indessen bei Untersuchung der vorzeitigen Nahtsynostosen davon überzeugt, daß bei abnormaler Enge einzelner Teile des Schädelraumes das wachsende Gehirn sich in andere Teile des Schädelraumes eindrängt und diese zu stärkerem Wachstum anregt. Wenn daher das Gehirn in der soeben besprochenen Weise durch umschriebene Druckwirkungen die Form der wachsenden Schädelkapsel beeinflußt, so dürften diese Druckwirkungen gleich-

zeitig auch auf das Wachstum des Gehirns zurückwirken und dieses veranlassen, einen Teil des in der weiteren Umgebung der Druckpole frei werdenden Raumes auszufüllen. Es besteht somit hier ein Wechselverhältnis zwischen Gehirn und Schädelwand, welches von großer Tragweite für die Entwicklung beider Organe ist, wie späterhin eine gesonderte Prüfung ergeben wird.

Nach diesen prinzipiellen Erörterungen ist man in der Lage, mit Hilfe der früher gegebenen Gleichungen (5) oder (8) die tangentialen Materialspannungen des normalen Schädeldaches empirisch zu bestimmen. Am erwachsenen Schädel dürften diese Bestimmungen ziemlich zuverlässige Resultate ergeben. Es erschien indessen zweckmäßig, dieselben auch auf wachsende Schädel auszudehnen. Bei diesen kann man allerdings nicht mit Bestimmtheit darauf rechnen, daß die Materialspannungen in allen Richtungen der Schädeloberfläche gleich groß sind, weil die das Wachstum bedingenden, von dem Drucke des wachsenden Gehirns ausgelösten Spannungszunahmen in den verschiedenen Richtungen Ungleichheiten aufweisen dürfen. Letztere aber erreichen offenbar im Verhältnisse zu der Gesamtspannung keine erheblichen Werte, so daß in dem wachsenden Schädel die

tangentialen Materialspannungen in den verschiedenen Richtungen nur geringe Verschiedenheiten darbieten können.

In diesem Falle aber gewinnt man, wie leicht nachzuweisen ist, durch Ver-



Fig. 5. Blattsäge, verkleinert 5 : 1.

wendung der obengenannten Gleichungen (5) oder (8) einen Mittelwert für die Materialspannung, welcher etwas kleiner als die größere und etwas größer ist als die kleinere Materialspannung, welche in dem wachsenden Schädeldache enthalten ist. Da sodann alle diese Werte nur wenig von einander verschieden sein können, ist das Ergebnis ungeachtet der unvermeidlichen Ungenauigkeiten zu einer ersten Orientierung von großem Werte.

Die Untersuchung beginnt mit der Feststellung der Hauptkrümmungsradien des Schädeldaches. Man kann dabei im einzelnen etwas verschieden verfahren.

In der Regel habe ich zunächst einen nach Augenmaß zur Schädeloberfläche senkrechten Sägeschnitt ausgeführt, welcher annähernd in der Ebene des kleineren Hauptkrümmungsradius eines gegebenen Punktes der Schädelwand lag. Diese Operation wird wesentlich erleichtert, wenn man sich dabei einer Blattsäge (Textfig. 5) bedient, wie sie zum Sägen von Metall verwendet wird. Sie erzeugt einen sehr engen Sägeschnitt und hält die einmal eingeschlagene Schnittrichtung verhältnismäßig sehr genau fest. Überall jedoch, wo die Sägeschnitte keine größere Länge haben müssen, verwendet man besser ganz feine Uhrfedersägeblätter von etwa 5 mm Breite, welche in einen passenden, festen Sägebogen eingespannt werden. Zweckmäßigerweise durchdringt der Sägeschnitt die ganze Dicke des Schädeldaches in einer Längenausdehnung von ungefähr 50 mm und wird zugleich so geführt, daß der mit Hilfe eines Pinsels und chinesischer Tusche bezeichnete Punkt des Schädeldaches, an welchem die Spannung der Schädelwand bestimmt werden soll, in die Mitte dieses ersten Sägeschnittes fällt. Man kann sodann einen gleichlangen zweiten Sägeschnitt annähernd parallel zu dem ersten in einem Abstande von etwa 8 mm anlegen, um weiterhin mit einer feinen Laubsäge den zwischen beiden Sägeschnitten liegenden Teil der Schädelwand auszulösen. Nunmehr ist man imstande, die erste Sägefläche dieses ausgelösten Stückes der Schädel-

wand auf Papier aufzulegen und die äußere und innere Krümmungslinie des Schädeldaches mit scharfem Bleistifte nachzuziehen. Die Bestimmung des Krümmungsradius geschieht dann in einfacher Weise mit Zirkel und Maßstab.

Auf die mannigfachen Fehler und Ungenauigkeiten dieses Verfahrens werde ich später einzugehen haben.

Behufs Bestimmung des zweiten Hauptkrümmungsradius habe ich sodann mit Zirkel und Bleistift an dem zu untersuchenden Punkte des Schädeldaches eine Senkrechte auf die erste Sägelinie konstruiert und mit ihrer Hülfe einen zweiten, ungefähr 8 mm breiten Streifen aus der Schädelwand ausgesägt, an dem die zweite Hauptkrümmung auf Papier nachgezogen werden konnte. Die Bestimmung des zweiten Hauptkrümmungsradius ist jedoch unter diesen Umständen etwas weniger genau, weil der zu untersuchende Punkt des Schädeldaches an dem einen Ende des zweiten Sägestückes liegt. Deshalb schien es mir zweckmäßig, das Verfahren so einzurichten, daß an diesem zweiten Sägestücke der größere Hauptkrümmungsradius gemessen wird, bei welchem auch etwas größere Messungsfehler schließlich viel weniger stark in das Gewicht fallen. Andere Methoden für die Bestimmung der Krümmungsradien werden später bei Beschreibung des Schädels V mitzuteilen sein. Sie werden notwendig, wenn die Schädelinnenfläche tiefe Impressionen und hohe Juga aufweist.

Sodann ergibt sich die Aufgabe, die Dicke d des Schädeldaches zu bestimmen, wobei darauf Bedacht zu nehmen ist, daß nur das Knochengewebe in Rechnung kommt. Denn in dem Inhalte der diploetischen Markräume werden, wie man anzunehmen berechtigt ist, keine merklichen Spannungen übertragen.

Ich habe daher Dünnschliffe des Schädeldaches hergestellt, welche senkrecht auf der Oberfläche des letzteren standen und den Flächeninhalt der auf den Dünnschliffen gegebenen senkrechten Durchschnitte des Schädeldaches, unter Abzug der Schnittflächen der diploetischen Hohlräume und der größeren Gefäßkanäle ausgemessen. Schließlich wurde der Flächeninhalt jedes Durchschnittes geteilt durch seine in der Tangente des Schädels gemessene Länge und dabei ein Wert für die Dicke d des Schädeldaches erhalten, welcher ausschließlich das Knochengewebe berücksichtigt.

Bei Herstellung der Dünnschliffe ging ich aus von den beiden, oben besprochenen, aus dem Schädeldach ausgesägten Sägestücken. Zuerst wurden die den Hauptschnittebenen entsprechenden Knochenflächen mit großen, planen Feilen abgeschliffen und mit einer höchst feinkörnigen Feile poliert, bis sie auf eine Spiegelglasplatte aufgesetzt sich als vollkommen plan erwiesen. Wenn man dabei die Schleifflächen mit starkem Spiritus benetzt, vollziehen sich diese Operationen ohne Unbequemlichkeiten und die Kontrolle mit der Glasplatte ist, wenn die Knochenflächen mit einem Tuche leicht abgetrocknet werden, ziemlich scharf. Eine genaue Kontrolle aber ist notwendig, denn nur, wenn die erste Schleiffläche vollkommen plan ist, gelingt es später Dünnschliffe herzustellen, welche auch die Randpartien des Knochens lückenlos enthalten.

Behufs Herstellung der zweiten Schleiffläche wird nunmehr das etwa 8 mm dicke Knochenstück mit der polierten ersten Schleiffläche auf einen planen Objektträger von Spiegelglas aufgekittet. Anfangs verwendete ich hierzu heißflüssigen Kanadabalsam. Bei der unvermeidlichen Erwärmung der Knochenstücke schrumpfen indessen letztere in nicht unerheblichem Grade. Ich habe daher beinahe in allen Fällen das Knochenstück 4 bis 8 Stunden lang oder länger unter Staubschluß getrocknet und mit Syndetikon aufgekittet. Das auf dem Objektträger aufgekittete Knochenstück wird dann zuerst mit Seidenpapier und weiterhin mit einer vierfachen Lage von geleimter Watte bedeckt, um schließlich mit Hülfe eines Schraubstockes zwischen zwei starken Brettstücken bei sehr mäßigem Drucke an das Glas angepreßt zu werden. In 8 bis 12 Stunden trocknet das Syndetikon ohne spröde zu werden. Man kann dann den Objektträger, welcher an seiner oberen Fläche das aufgekittete Knochenstück trägt, auf ein eben gehobeltes Brett legen, auf welchem durch aufgenagelte Streifen von Fournierholz ein dem gläsernen Objektträger genau entspreehender

Trog von ungefähr 1 mm Tiefe hergestellt ist. Das Brett wird in einen Schraubstock gefaßt und seine obere Fläche mit Hülfe einer einfachen Dosenlibelle, wie sie von den Amateurphotographen gebraucht wird, horizontal gestellt, um die Gewöhnung der Hände zu einer passenden Haltung der Feilen zu erleichtern. Der gläserne Objektträger aber gewährt bei der weiteren Bearbeitung den Feilen eine genügende Führung. Man hat nur mit Gesicht, Gehör und Gefühl dafür zu sorgen, daß die mit 96 % Spiritus benetzte Feile niemals in Berührung mit der Glasplatte gelangt. Dabei ist es zweckmäßig, wenn der längste Durchmesser des Knochenstückes dem längsten Durchmesser des gläsernen Objektträgers entspricht und wenn zugleich auch die Längsachse der Feile und die Richtung ihrer Bewegung mit dem längsten Durchmesser des Knochenstückes zusammenfällt. Zuletzt wird mit der Politurfeile blank glättert.

Man erhält bei diesem Verfahren nach geringer Übung ausgedehnte Knochenschliffe von großer Feinheit, welche weder an den Rändern noch in der Diploe Defekte aufweisen.

Diese Schliffe müssen nunmehr von dem Objektträger gelöst werden, wozu ein halbstündiges Eintauchen in Wasser zu genügen pflegt. Dabei läuft man Gefahr, daß einzelne Teile des Schliffes, welche keine knöchernen Verbindungen mit der Hauptmasse haben, verloren gehen. Diese Gefahr ist, wie aus Fig. 3 hervorgeht, bei Tangentialschliffen eine sehr große. Bei Schliffen, die senkrecht zu der Oberfläche des Schädeldaches stehen, kommt sie wenig in Betracht, weil auf diesen solche nach allen Seiten freie Knocheninseln relativ selten sind. Um sicher zu gehen, empfiehlt es sich indessen, die Schliffe, ehe sie von dem Objektträger abgelöst werden, mit Spiritus abzuspülen, mit einem Deckglase zu bedecken und unter dem Mikroskop nachzuprüfen. Finden sich sodann freie Knocheninseln, so wird man sie bei passender Vergrößerung mit der Camera lucida zeichnen, um nötigenfalls bei dem späteren Verfahren eine Korrektur ausführen zu können.

Die abgelösten Knochenschliffe verweilen etwa 2 Stunden in mehrfach gewechseltem Wasser, in dem sie einige Male vorsichtig abgepinselt werden. Man kann sie sodann nach dem alten Kruekenbergerischen Verfahren in heißflüssigen Kanadabalsam einschließen, wobei jedoch sehr unliebsame Schrumpfungen eintreten. Besser wäre es — wenn durchaus die Knochenkanälchen mit Luft gefüllt werden müssen —, daß man die Schliffe zuerst mit absolutem Alkohol und Äther entfettet, lufttrocken werden läßt, um sie sodann mit einer honigdicken Lösung von Gummi arabicum auf einen Objektträger aufzukleben, wobei auch die freie Oberfläche des Schliffes mit einer dünnen Schicht von Gummi arabicum bekleidet werden muß. Nach abermaligem Trocknen setzt man schließlich einen Tropfen Xylolkanaabalsam auf und bedeckt endgültig mit einem Deckglase, worauf man den überschüssigen Kanadabalsam sorgfältig mit einer Pipette entfernt, welche mit einer Wasserluftpumpe in Verbindung steht. Das Gummi arabicum hindert in diesem Falle das Eindringen des Xylools in die Knochenkanälchen. Ich würde diese Methode in allen Fällen empfohlen, in welchen man mit trockenen, mazerierten Knochen zu arbeiten hat.

Die Mazeration und Trocknung der Knochen verlangt ein etwas umständliches Verfahren und führt Veränderungen herbei, die sich nicht immer rechtfertigen lassen. Ich habe daher die hier verwendeten Schädeldächer zumeist in starkem Spiritus gehärtet, zuweilen nach vorausgegangener mehrstündiger Behandlung mit physiologischer Kochsalzlösung oder mit einer der hochhaltigen Salzlösungen, welche ich bei einer früheren Gelegenheit¹⁾ empfohlen habe. Diese Vorbehandlung ist namentlich dann wünschenswert, wenn das Schädeldach etwas lange der Luft ausgesetzt gewesen war. Die in Spiritus gehärteten Knochen lassen sich sodann sehr gut in der oben angegebenen Weise schleifen. Die Dünnschliffe habe ich 2 Stunden lang mit halbgesättigter, wäßriger Methylenblaulösung gefärbt, mit Wasser abgespült, einige Minuten in 80 % Alkohol differenziert, in absolutem Alkohol, dem man zweckmäßigerweise etwas Methylenblau zusetzt, 4 bis 12 Stunden lang entwässert, mit Xylool geklärt und in Xylolkanaabalsam eingeslossen. Man erhält dabei eine sehr willkommene Färbung der Weichteile des Knochens und vermeidet ungebührliche Schrum-

¹⁾ R. Thoma, Anatomische Sammlungspräparate mit Erhaltung der natürlichen Färbung. Ztbl. f. allg. Path. Bd. 2, 1891.

pfungen. Doch wird man erwarten müssen, daß bei diesem Verfahren, entsprechend der geringeren Schrumpfung die Materialspannungen um ein geringeres kleiner ausfallen.

Nachdem auf diese Weise zwei Knochenschliffe fertiggestellt sind, welche den beiden Haupt schnittebenen einer bestimmten Stelle der Schädelwand entsprechen, wurde auf jedem derselben, ausgehend von der Durchkreuzungsstelle der Hauptschnittebenen eine Strecke von 1 bis 8mm Länge zu der Bestimmung der Knochendicke d verwendet. Diese wurde zunächst bei 10- bis 50facher Vergrößerung mit der vortrefflichen Camera lucida von Leitz auf starkes Schreibpapier mit feingespitztem Bleistifte gezeichnet und die Vergrößerung sorgfältig bestimmt durch Messung eines genau bezeichneten Dickendurchmessers des Knochens, und zwar am Dünnschliff mit Hilfe des Objektschraubenmikrometers von Zeiß und an der Kammerzeichnung mit Hilfe eines genauen Millimetermaßstabes. Die Vergrößerungszahl ergab sich dann als der Quotient der beiden Messungsergebnisse.

Weiterhin wurde die Kammerzeichnung unter Mitbenutzung stärkerer Vergrößerung kontrolliert und da und dort verbessert, weil es immer einzelne unklare Stellen gibt, namentlich solche, an welchen die natürlichen Knochenflächen der Gefäßkanäle und Spongiosabalken die Schliff ebenen unter spitzen und stumpfen Winkeln schneiden. Dabei wurde immer dafür gesorgt, daß die Kammerzeichnung die dem Beobachter zugewendete Fläche des Knochenschliffes wiedergab. Nach diesen nicht immer ganz unerheblichen Korrekturen konnte durch zwei parallele Linien, die annähernd senkrecht auf der inneren und äußeren Begrenzung der Schädelwand standen, ein Teil des Bildes von 30 bis 100 mm Breite abgegrenzt werden. Aus diesem Gebiete wurden mit dem Federmesser die Räume der Diploe und die Gefäßkanäle ausgestochen. Schließlich konnte man mit der Schere die äußeren und inneren Begrenzungen des Knochenschnittes und die beiden geraden Grenzlinien durchtrennen. Dabei ergab sich ein Papiermodell des Knochenschliffes, welches auf einer Analysenwaage gewogen werden konnte. Gleichzeitig wurde ein rechteckiges, genau abgemessenes Stück des gleichen Quartblattes — unter Vermeidung der Randzonen der Papierbogen — gewogen, worauf eine einfache Rechnung den Flächeninhalt des Papiermodells in Quadratmillimetern ergab. Die Dicke d des Schädeldaches an der untersuchten Stelle fand sich dann weiterhin, indem der Flächeninhalt zunächst mit der Breite des Papiermodells und dann mit der Vergrößerungszahl dividiert wurde.

Wenn man bei diesem Verfahren die Dicke des Papiers vor dem Gebrauche bei durchscheinendem Lichte auf ihre Gleichmäßigkeit geprüft und fehlerhafte Stellen augeschieden hat, wenn man ferner das Papier vor dem Gebrauche lufttrocken macht und wenn man schließlich dafür sorgt, daß das Papier während des Gebrauches immer in gleichem Maße den Atmosphärierilien ausgesetzt wird, ergibt die Flächenbestimmung mit der Wage verschwindend geringe Fehler. Nicht ganz unbedeutend sind dagegen die variablen Fehler bei der Bestimmung von d , welche aus anscheinenden Zufälligkeiten der Knochenstruktur hervorgehen. Sie werden nicht unerheblich vermindert, da man bei dem gegebenen Verfahren zu jeder Bestimmung von d zwei Werte erhält, aus denen man das arithmetische Mittel ziehen kann, bleiben indessen immer bestehen. Zu ihnen gesellen sich variable Fehler bei den übrigen genannten Operationen, deren Bedeutung man sich am einfachsten in empirischer Weise vergegenwärtigt an den Abweichungen, welche man an den schließlich für die Materialspannung s errechneten Werten findet. Auf diese werde ich zurückzukommen haben. Sie sind keineswegs unerheblich, führen jedoch nicht in Gefahr, prinzipielle Irrtümer zu begehen.

Bedeutsamer für den Wert der Untersuchung sind die ihrer Richtung nach konstanten Fehler, welche den Bestimmungen der Dicke und der Krümmungsradien des Schädeldaches und damit auch der Berechnung der Materialspannung anhaften.

Obige Methode, welche für die Bestimmung von d in der spongiosahaltigen Schädelwand verwendet wurde, ergibt etwas zu hohe Werte, wenn man diesen Wert d gleichsetzt dem Knochenquerschnitte, welcher die tangentiale Materialspannung trägt. Dies geht in sehr einfacher Weise hervor aus einem Vergleiche eines vertikalen Dünnschliffes des Schädeldaches (Textfig. 6) mit den

Tangentialschnitten der Textfig. 3. Letztere enthalten an vielen Stellen Inseln von Knochensubstanz, welche in tangentialer Richtung keine Verbindungen besitzen und demgemäß tangentiale Spannungen nicht oder nicht ausschließlich übertragen. In dem Vertikalschliff aber sind diese Knocheninseln des Tangentialschnittes auch enthalten und werden als Knochensubstanz verrechnet, obwohl sie für die Tangentialspannungen nicht oder nicht mit ihrem vollen Gewichte in Betracht kommen. Dies ist nicht zu ändern, denn es würde jeder Willkür Tür und Tor öffnen, wollte man für diese Knocheninseln des Tangentialschliffes einen Abzug an den Werten von d in die Rechnung einsetzen. Der Fehler bleibt daher und hat, wie aus Gleichung (5) hervorgeht, zur Folge, daß die errechnete Materialspannung s etwas zu klein ausfällt. Da indessen die Glästafeln die Hauptmasse der Schädelwand bilden, dürfte der sich dabei ergebende Fehler mäßige Grenzen innehalten.

Es ist indessen noch eine wichtige Fehlerquelle zu nennen, welche gegeben ist, wenn die Schnittebenen, auf welchen die Dicke des Schädeldaches und die Krümmungsradien gemessen werden, nicht genau senkrecht zu der Schädelwand stehen. Auf solchen ungenauen Durchschnitten muß die Dicke des Schädeldaches zu groß ausfallen, während die Krümmungsradien etwas zu klein werden. Beide Ungenauigkeiten aber haben zur Folge, daß bei der numerischen Ausrechnung der



Fig. 6. Frontalschliff des Os parietale, 14 mm hinter der Kranznaht. Vergr. 7,10.

dann aber noch vor, daß bei der Herstellung des ersten Anschliffes die Schnittebene der Schädelwand noch weiter von der Senkrechten abweicht. Dies kann man mit einer Glasplatte und einem geteilten Kreisbogen ziemlich gut kontrollieren und, wenn die Abweichung nicht zu groß ist, auch korrigieren, indem man den rechhungsmäßig gefundenen Wert von d multipliziert mit dem Sinus des Winkels, welchen die Schädeloberfläche mit der Schliffebene bildet. Bei größeren Abweichungen aber scheint es besser, den Schliff zu verwerfen.

Auf einige andere, aus fehlerhafter Stellung der Schnittebenen hervorgehende Fehler will ich nicht näher eingehen, da sie verhältnismäßig unbedeutend zu sein scheinen. Dagegen darf nicht unerwähnt bleiben, daß bei diesen Berechnungen die Spannungen der Dura mater, der Galea und der Kopfhaut unberücksichtigt blieben. Diese Spannungen der Weichteile sind sicher nicht sehr hoch. Durch ein eigenartiges Verhältnis erfahren aber ihre Wirkungen noch eine erhebliche Erniedrigung. Bei aufrechter Körperhaltung werden die von dem negativen intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke in der knöchernen Schädelwand erzeugten Druckspannungen von den Druckwirkungen der Kopfhaut, der Galea und der Dura verstärkt. Bei liegender Körperhaltung dagegen ermäßigt die Spannung der genannten Weichteile die Zugspannungen, welche von dem jetzt positiven intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke in der knöchernen Schädelwand hervorgerufen werden. Die von der Spannung der Weichteile erzeugten Druckwirkungen auf das Schädeldach kommen daher, wenn die liegende Körperhaltung täglich 8 Stunden lang eingenommen wird, im täglichen Durchschnitt für das Knochenwachstum nur mit dem dritten Teile ihres Wertes zur Wirkung und bleiben somit sehr gering. Doch muß man immerhin annehmen, daß sie den Durchschnittswert

Gleichung (5) zu kleine Werte für die Spannung s gefunden werden. Eine Korrektur der Krümmungsradien halte ich nicht für durchführbar, man wird daher die Untersuchung nur dann fortsetzen, wenn die Sägeschnitte nach Augenmaß senkrecht auf der Schädeloberfläche stehen, wobei man zweckmäßigerweise eine Glasplatte an die Sägefläche anlegt, um das Urteil zu erleichtern. Unter Umständen kommt es

der Schädelspannung erhöhen und daher das Schädeldach etwas dicker werden lassen. Wenn man sie dann bei dem angegebenen Verfahren vernachlässigt, wird man notwendigerweise aus den Messungen etwas zu kleine Werte für die Materialspannung s errechnen. Dieser Fehler mag gering sein. Indessen addiert er sich seiner Wirkung nach mit den aus fehlerhaften Stellungen der Schnittebenen hervorgehenden Fehlern. Man gelangt daher insgesamt zu dem Ergebnisse, daß bei der gegebenen Methode die Bestimmung der Materialspannung des Schädeldaches mit einem konstanten Fehler behaftet ist, der allerdings nicht erheblich sein kann, jedoch etwas zu kleine numerische Werte für die Materialspannung zur Folge hat.

Nach obigen prinzipiellen Erörterungen wird man erwarten dürfen, daß an allen Stellen des Schädeldaches, welche an ihrer Innenfläche tiefen, von den Hirnwundungen herührende Impressionen aufweisen, verhältnismäßig stärkere Druckwirkungen von seiten der Hirnwundungen auf die Schädelwand ausgeübt worden waren. Die mechanischen Beziehungen sind indessen an solchen Stellen weniger einfache, weil die innere und die äußere Glastafel erhebliche Verschiedenheiten ihrer Verlaufsrichtung aufweisen. Ich habe daher vorläufig solche Stellen tunlichst vermieden, indem ich mir vorbehalte, später auf dieselben zurückzukommen. Geringfügige, von dem Drucke der Hirnwundungen herührende Vertiefungen der Schädelinnenfläche sind indessen so häufig, daß man ihnen nicht immer mit Sicherheit ausweichen kann. Sie sind es hauptsächlich, welche die Bestimmung der Spannungen außerhalb des Gebietes der Druckpole erschweren und unsicher machen. Doch wird es demungeachtet möglich sein, einige grundlegende Ergebnisse zu gewinnen.

Mit Hilfe dieser, leider etwas zeitraubenden Methoden habe ich eine Reihe von Schädeldächern untersucht. In der folgenden Tabelle I finden sich zunächst die Ergebnisse der Messung und Rechnung für den erwachsenen, mazerierten und getrockneten Schädel I.

Tabelle I. Erwachsener Schädel I, mazeriert, getrocknet.
d Dicke der Knochensubstanz. R' größerer Hauptkrümmungsradius des Schädels. R'' kleinerer Hauptkrümmungsradius desselben. i intrakranieller Flüssigkeitsdruck. s Materialspannung welche der Druck i erzeugt. P Binnendruck, welcher die Materialspannung von 3 g pro qmm erzeugt.

Punkt der Fig. 7	Ort	d mm	R' mm	R'' mm	i Gramm pro qmm	s Gramm pro qmm	P Gramm pro qmm
1	Os frontale dext.	3,53	213	73	0,2034	3,12	—
2	Os frontale sin.	3,71	151	73	0,2034	2,69	—
3	Os parietale dext.	3,57	213	75	0,2034	3,14	—
5	Os parietale dext.	4,03	195	83	0,2034	2,93	—
7	Os parietale dext.	4,00	138	84	0,2034	2,65	—
Nahe bei 7	Os parietale dext.	4,29	195	106	0,2034	3,25	—
	Os parietale sin.	3,09	102	83	0,2034	3,00	—
6	Os parietale sin.	3,24	106	102	0,2034	3,26	—

Mittelwert der Materialspannung $s = 3,006$ g (qmm)

Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers für die einzelne Beobachtung = 0,160 = 5,3%

Wahrscheinlicher Werth des variablen Fehlers des Mittelwertes = 0,057 = 1,9 %

	Boden der Sella turcica	0,6	-9,8	4,961	0,176	2,95	—
	Sulcus opticus	0,6	-12	5	0,180	2,57	0,210
9	Tuber frontale dext.	2,79	39,30	31,53	0,2034	1,28	0,479
11	Tuber parietale dext.	2,54	49	48	0,2034	1,95	0,313
12	Tuber parietale sin.	2,75	58	54	0,2034	2,06	0,296
a	Squama ossis occipit.	0,54	32	28,45	0,163	4,55	0,108
b	Squama ossis occipit.	1,23	38,44	34,89	0,163	2,42	0,202
c	Squama ossis occipit.	1,6	38,10	24,56	0,163	1,52	0,321
14	Regio temporalis ossis par. sin.	2,63	∞	106,7	0,1832	7,43	0,074
16	Regio temporalis ossis par. sin..	2,69	148,0	71,13	0,1832	3,27	0,168

Bemerkung: Einzelne Krümmungsradien sind — der Unterscheidung halber — in vierstelligen Zahlen angegeben. Diese stellen Mittelzahlen dar für die zusammengehörigen Krümmungsradien der Innen- und Außenfläche der Schädelwand und wurden nach einer später zu besprechenden Methode gewonnen. An den übrigen der Messung unterzogenen Punkten der Schädelwand waren bei diesem Schädel keine merklichen Unterschiede der Krümmungsradien der Innen- und Außenfläche erkennbar. Die inneren und äußeren Krümmungsradien, aus welchen die Mittelzahlen hervorgingen, sind in dem folgenden Nachtrage enthalten.

Nachtrag zu Tabelle I.

Außere und innere Krümmungsradien der Schädelwand, für welche in der Tabelle I Mittelwerte angegeben sind, nebst den zugehörigen Werten der Dicke der äußeren Knochenschicht, ausgedrückt in Bruchteilen der Dicke d .

Punkt	Ort	Außen-fläche mm	R'	Innen-fläche mm	Außen-fläche mm	R''	Innen-fläche mm	Rel. Dicke d. äußeren Knochenschicht
Schädel I, Erwachsenen.								
9	Boden der Sella turcica ...	—	—	—	5,66	—	4,415	0,5
9	Tuber frontale dext.	50	—	31	38	—	26	0,555
a	Squama ossis occipit.	28	—	16	25	—	33	0,5
b	Squama ossis occipit.	40	—	37	37	—	33	0,5
c	Squama ossis occipit.	80	—	25	100	—	14	0,5
14	Regio temp. ossis pariet. sin.	—	—	—	89	—	133	0,5
16	Regio temp. ossis pariet. sin.	65,5	—	200	72,6	—	69,2	0,58

Es erscheint wünschenswert, die einzelnen in dieser Tabelle enthaltenen Beobachtungen zunächst getrennt zu besprechen. Sie betreffen den mazerierten Schädel I (Textfig. 7) eines älteren Individuums. Die acht ersten Beobachtungen beziehen sich auf Teile des Schädeldaches, welche keine Besonderheiten darbieten, und geben demgemäß ziemlich übereinstimmende Werte für die Materialspannung s. Es schien daher gerechtfertigt, einen Mittelwert zu nehmen, der sich mit 3,006 g für den Quadratmillimeter fand. Dieser Mittelwert ist, wie oben bereits besprochen wurde, voraussichtlich etwas zu klein, so daß man für denselben einen geringen konstanten Fehler annehmen muß, der jedoch einen Vergleich analoger Beobachtungen nicht wesentlich erschweren dürfte. Er wird später, bei einer besonderen Würdigung dieses Mittelwertes, wieder zu erwähnen sein.

Für den Vergleich analoger Beobachtungen ist es jedoch von besonderer Bedeutung, die Größe der variablen Fehler, welche der einzelnen Beobachtung und demgemäß auch dem Mittelwerte anhaften, kennen zu lernen. In dieser Beziehung zeigen nun die Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung¹⁾, daß der wahrscheinliche Wert²⁾ des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung annähernd 5 % und der wahrscheinliche Wert des variablen Fehlers für die soeben gegebene, auf 8 Beobachtungen beruhende Bestimmung der Mittelzahl ungefähr 2 % beträgt.

¹⁾ R. Thoma, Untersuchungen über die Größe und das Gewicht der anatomischen Bestandteile des menschlichen Körpers. Leipzig 1882.

²⁾ Der wahrscheinliche Wert des variablen Fehlers wird in der Hälfte der Fälle nicht erreicht und in der andern Hälfte der Fälle überschritten. Wegen der Einzelheiten vergleiche meine soeben genannte Schrift.

Es ist dies ein Grad der Genauigkeit, mit dem man sich bei vielen anatomischen und physiologischen Untersuchungen genügen lassen muß, und der auch hier vorläufig ausreichen dürfte. Indessen bieten die Krümmungsradien und Dicken-durchmesser des Schädeldaches bei den ersten 8 Beobachtungen keine sehr großen Verschiedenheiten dar. Demgemäß liegt die Frage nahe, ob die annähernde Übereinstimmung der Materialspannungen bei den in Rede stehenden 8 Beobachtungen nicht einfach Folge ist des Umstandes, daß die Krümmungsradien und Dicken-durchmesser des Schädeldaches an den verschiedenen Stellen derselben Größenordnung angehören.

Unter diesen Umständen wurde es wünschenswert, Stellen der Schädelwand aufzusuchen, welche sich durch sehr kleine Krümmungsradien auszeichnen und zugleich zur Messung geeignet erscheinen. Zwei solche Stellen fand ich am Boden der Sella turcica und des Sulcus opticus des in Rede stehenden Schädel I. Die knöcherne Schädelwand wird an diesen Stellen am Lebenden nur durch eine dünne Schleimhautbekleidung geschieden von dem mit der äußeren Luft in offenem Zusammenhange stehenden gasförmigen Inhalte der Keilbeinhöhlen. Störende Druckwirkungen von seiten der Muskulatur fehlen hier vollständig, und die im gegebenen Falle stark aus der Median-ebene abweichende Lage der Scheidewand der Keilbeinhöhle begünstigte die Messungen. Ich habe daher die Krümmungsradien der inneren und der äußeren Schädelfläche teils am Stearinäusgusse, teils am Knochendurchschnitt unter Benutzung schwacher Vergrößerungen gemessen und die Knochendicke d mit einem Deckglastaster, der 0,1 mm direkt abzulesen gestattete, bestimmt. Die entsprechenden Zahlen finden sich in der obigen Tabelle.

Sodann mußte in Erwägung gezogen werden, daß der intrakranielle Flüssigkeitsdruck in der Gegend der Sella turcica und des Sulcus opticus beeinflußt wird durch die Niveaudifferenz, welche zwischen dem Scheitel und den beiden Messungsstellen 80 und 70 mm betrug. Unter diesen Umständen wurde der bei aufrechter Körperhaltung in der Scheitelhöhe negative Druck von 0,2034 g (qmm) an der Sella und dem Sulcus ermäßigt um das Gewicht zweier Flüssigkeitssäulen von der genannten Höhe und von dem spezifischen Gewichte 1,01. Bei der Bettruhe dagegen, für welche ich täglich 8 Stunden rechnete, war umgekehrt der nunmehr positive intrakranielle Flüssigkeitsdruck an den beiden Messungsstellen um den entsprechenden Betrag höher als an der höchstgelegenen Stelle des Schädelraumes.

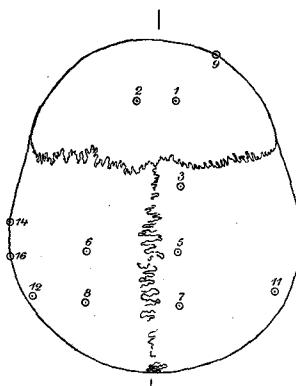


Fig. 7. Erwachsenes Schädeldach I., von oben betrachtet. Verkleinert 4 : 1. Die mit Zahlen versehenen kleinen Kreisflächen bezeichnen die Messungsstellen. Die Stirnnaht verknöchert und verstrichen. Die übrigen Nähte des Schädeldaches an der Innenfläche beinahe überall verknöchert und verstrichen, an der Außenfläche nahezu vollständig erhalten. Nähte der unteren Schädelhälfte und des Gesichtes, mit Ausnahme der verstrichenen Stirnnaht, der Stirn-Kiefernaht und der Nähte des Siebbeines und der Sphenok枕ipitalfuge, erhalten.

Berücksichtigt man diese Tatsachen, so findet man als Mittelwert für die 24 Stunden des Tages am Boden der Sella turcica einen intrakraniellen Flüssigkeitsdruck von 0,176 g (qmm) und am Sulcus opticus einen solchen von 0,180 g (qmm).

Die Rechnung ergibt sodann in der dünnen Knochenlamelle, welche die Sella turcica von der Keilbeinhöhle scheidet, eine Materialspannung von 2,95 g (qmm), welcher Wert sehr genau mit dem obigen Mittelwerte von 3,006 g (qmm) übereinstimmt. Am Sulcus opticus wurde eine etwas geringere Materialspannung von 2,57 g (qmm) gefunden. Dies mag zum Teil damit zusammenhängen, daß unter den gegebenen Umständen die Bestimmung der Krümmungsradien und Knochendicken nur eine geringere Genauigkeit erreichen konnte. Indessen ist die abgeplattete Gestalt des Chiasma und der Sehnerven ein Beweis dafür, daß sie von seiten des Gehirns einen geringen Druck erleiden, den sie selbstverständlich auf den Knochen weitergeben. Die weitere Rechnung zeigt dann, da die Materialspannungen dem Drucke proportional sind, daß die normale Materialspannung von 3 g (qmm) im Boden des Sulcus opticus erreicht wird, wenn ein Druck von 0,21 g (qmm) auf diesem Boden lastet. Da der intrakranielle Flüssigkeitsdruck an dieser Stelle 0,18 g (qmm) beträgt, würde man daher anzunehmen haben, daß das Gehirn durch sein Gewicht unter Vermittlung des Chiasma einen Druck auf den Sulcus opticus ausübt, welcher um 0,03 g (qmm) höher ist als der an dieser Stelle herrschende intrakranielle Flüssigkeitsdruck. Diese 0,03 g würden einer Wassersäule von 30 mm Höhe entsprechen. Sie stellen eine Differenz dar, welche im Grunde genommen mit Bestimmtheit vorauszusehen war.

Meiner Ansicht nach konnte man bei den Schwierigkeiten, welche die Messungen an der Sella turcica und im Sulcus opticus finden, keine weitergehenden Übereinstimmungen gewärtigen. In jedem Falle aber zeigt das Ergebnis dieser Messungen, daß der am Schädeldache gefundene Mittelwert für die Materialspannung des Knochengewebes nicht auf Zufälligkeiten beruht, welche aus der annähernd gleichen Größenordnung der gemessenen Werte hervorgehen könnten. Dieser Schluß aber erscheint um so zuverlässiger zu sein, als an den in Rede stehenden Stellen der Schädelkapsel die Unterschiede der Größenordnung der gemessenen Werte durch das negative Vorzeichen des einen Krümmungsradius wesentlich erhöht werden. In der Tat hat man es sowohl an der Sella turcica wie am Sulcus opticus mit sattelförmigen Flächen zu tun, in deren Bereich indessen die Materialspannungen gleichfalls obigen Gleichungen gehorchen müssen, vorausgesetzt, daß das negative Vorzeichen der Krümmungsradien Berücksichtigung findet. Wenn aber die Übereinstimmung der Materialspannungen nicht Folge der gleichen Größenordnung der gemessenen Werte sein kann, so ist man nunmehr vollkommen berechtigt, anzunehmen, daß die hier vertretenen Auffassungen bezüglich der Spannung der Schädelwand zutreffen.

Eine vollständige Bestätigung dieser Anschauungen ergibt sich aus einer Untersuchung derjenigen Stellen der Schädelwand, welche einer erheblicheren Druckwirkung von seiten des wachsenden Gehirns unterliegen. Diesen Anschauun-

gen zur Folge entstehen die eigenartigen Formen des Schädeldaches in der Weise, daß das Gehirn an bestimmten Stellen einen stärkeren Druck auf die Schädelwand ausübt und durch diesen Druck Beschleunigungen des Knochenwachstums auslöst, welche zu umschriebenen Ausbauchungen der Schädelwand führen. Solche Ausbauchungen sind in der Schädelwand zu finden in den Tubera frontalia und parietalia und im Gebiete der Schuppe des Hinterhauptbeines. An diesen fünf Druckstellen müssen nach den früheren Auseinandersetzungen die Materialspannungen während des Wachstums größer werden als an allen andern Stellen der Schädelkapsel. Demgemäß treten auch an diesen fünf Stellen die ersten Knochenspangen auf, welche die Ossifikation der Schädelkapsel einleiten.

Unterzieht man sodann diese fünf Druckstellen der Schädelwand der mechanischen Untersuchung, so findet man, wie aus Tabelle I hervorgeht, an denselben geringere Materialspannungen, vorausgesetzt, daß man als intrakraniellen Druck nur den Druck des Liquor cerebrospinalis¹⁾ in Rechnung bringt. Dies war von vornherein zu erwarten, da der Druck des Gehirns auf die Schädelwand erst wirksam wird, wenn er den Druck der intrakraniellen Flüssigkeit übersteigt, wie bereits früher erörtert wurde. Demgemäß ist der Druck der intrakraniellen Flüssigkeit nicht imstande, an den genannten fünf Druckpolen die normale Materialspannung in der Schädelwand zu erzeugen, obwohl die letztere hier erheblich dünner ist als an andern Stellen. Vielmehr bewegen sich hier, wenn man nur den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck berücksichtigt, die Materialspannungen zwischen den Grenzen von 1,28 und 2,42 g für den Quadratmillimeter. Nur eine ziemlich weit nach vorn gelegene Stelle *a* der Squama occipitalis ergibt unter der Wirkung des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes eine Materialspannung von 4,55 g (qmm), welche somit höher als normal erscheint. Es ist dies indessen eine Stelle der Schädelwand, auf deren Außenfläche offenbar bei den Bewegungen des Kopfes Druckwirkungen von seiten der Querfortsätze des Atlas und der sich an diesen inserierenden Muskulatur ausgeübt werden. Solche äußere Druckwirkungen ermäßigen notwendigerweise die von dem intrakraniellen Flüssigkeitsdruck erzeugten Materialspannungen, wie später ausführlicher erörtert werden wird. Nach den Angaben der Tabelle I ist indessen auch hier die normale Materialspannung von 3 g (qmm) zu gewärtigen, wenn der intrakranielle Flüssigkeitsdruck minus dem Äquivalente der Druckwirkung der Muskulatur einem Binnendrucke von $P = 0,108$ g (qmm) gleichkommt. Später werde ich auf diese Stelle zurückzugreifen haben.

Sodann kann man untersuchen, wie hoch der Druck des Gehirns an den fünf Druckpolen werden muß, wenn er die normale Materialspannung erzeugen soll. Die entsprechenden, in dem letzten Stabe der Tabelle I enthaltenen Zahlen ergeben, wenn man nunmehr von der Stelle *a* der Squama occipitis absieht, Druckwerte zwischen 0,202 und 0,479 g (qmm). Dabei zeigt sich, daß unter den hier gemesse-

¹⁾ Für die Berechnung der Materialspannungen im Gebiete der Hinterhauptschuppe schien es mir angezeigt, in der früher besprochenen Weise die Niveaudifferenzen zu berücksichtigen, wobei dann der intrakranielle Flüssigkeitsdruck den Wert 0,163 g annahm.

nen Stellen die Stelle *b* der Squama den geringsten Druckwirkungen des Gehirns ausgesetzt ist. Der Druck des Hirns mit 0,202 g (qmm) ist daselbst nicht erheblich größer als der intrakranielle Flüssigkeitsdruck, welcher an dieser Stelle mit 0,163 g (qmm) gefunden wurde. Doch zeigt die Stelle *c*, daß auch an der Hinterhauptschuppe stärkere Druckwirkungen von seiten des Gehirns vorkommen. Die stärksten Druckwirkungen des Gehirns auf die Schädelwand sind indessen im Gebiete der Tuber frontalia zu suchen. Hier erreicht der Druck des Gehirns den Wert von 0,479 g (qmm). Dieser entspricht dem Drucke einer Quecksilbersäule von ungefähr 35 mm Höhe, während nach den Erfahrungen der Experimentatoren der intrakranielle Flüssigkeitsdruck auf 50 mm Hg gesteigert werden kann, ehe Funktionsstörungen auftreten. Es ist somit kein Grund für die Annahme vorhanden, daß die in Rede stehenden Druckwirkungen des Gehirns Funktionsstörungen in letzterem auslösen könnten. Daß sie dagegen geeignet erscheinen, nicht nur das Wachstum des Schädels, sondern auch das Wachstum des Gehirns zu beeinflussen, wurde bereits oben berührt und wird später noch eingehender zu erörtern sein. Für den Augenblick aber mag es vielleicht noch wünschenswert sein, darauf hinzuweisen, daß der in Rede stehende Druck am Tuber frontale annähernd zweimal so hoch ist als der intrakranielle Flüssigkeitsdruck.

Die Stellen der Schädelwand, an welchen die früher besprochenen, von dem Basilarbeine ausgehenden, durch die Gravitation und den Muskelzug veranlaßten Knochenspannen die Schädelwand verstärken, habe ich vorläufig der Messung nicht unterworfen. Hier schien die mechanische Beanspruchung des Materials eine zu mannigfaltige zu sein. Meines Erachtens wird man der letzteren in einfacher Weise gerecht, wenn man die Schädelkapsel in zwei Bestandteile zerlegt denkt. Der erste Bestandteil würde von einem nach allen Seiten hin geschlossenen knöchernen, blasenförmig gestalteten Hohlkörper gebildet werden, in dessen Wandungen der Druck der intrakraniellen Flüssigkeit und des Gehirns überall die tangentiale Materialspannung von 3,0 g pro qmm erzeugen würde. Der zweite Bestandteil der Schädelkapsel wäre sodann gegeben in einem von den Processus articulares des Grundbeines ausstrahlenden, netzförmigen Systeme von Knochenleisten, dessen Materialspannung im wesentlichen von dem Muskelzuge und von der Gravitation herrühren würde. Man könnte sich sodann vorstellen, daß der wirkliche Bau des Schädels gegeben sei durch eine Verwachsung des knöchernen Hohlkörpers mit dem netzförmigen System der Knochenleisten, und an dieser Vorstellung soll zunächst festgehalten werden.

Sie ist jedoch eine unvollkommene. Knochenteile, welche ausschließlich von dem Drucke der intrakraniellen Flüssigkeit und des Gehirns beansprucht werden, finden sich nur am Schädeldache und an einzelnen durch ihre geringe Wandstärke ausgezeichneten Teilen der hinteren und vielleicht auch der mittleren Schädelgrube. Bereits die dünnen Knochenlamellen der Sella turcica und des Sulcus opticus nötigen zu der Annahme, daß fortgeleitete Spannungen, welche vermutlich von der Gravitation herrühren, in die Wandspannung der Schädelkapsel aufgenommen

sind und diesen Knochenlamellen ihre sattelförmige Gestalt verleihen. In diesem Falle kann die nach allen tangentialen Richtungen hin gleich große und mit gleichem Vorzeichen versehene Materialspannung erst erreicht werden durch das Zusammenwirken der von dem Drucke der intrakraniellen Flüssigkeit und des Gehirns erzeugten Spannungen mit den Spannungen, welche die Gravitation hervorruft. Die beiden Teile, in welche soeben die Schädelkapsel zerlegt wurde, erscheinen somit hier zu einer untrennbaren Einheit verbunden, und dieses Verhältnis dürfte auch an vielen andern Stellen der Schädelkapsel wiederkehren. Indessen wird sich im Verlaufe dieser Untersuchungen ergeben, daß an bestimmten Stellen der wirkliche Sachverhalt nur durch ein Zurückgreifen auf obige Vorstellung eines aus zwei Teilen bestehenden Schädels erkannt werden kann.

Außer den Stellen, an welchen ausgiebigere Einwirkungen der Gravitation auf die Schädelwand stattfinden, kommen am Schädel auch Gebiete vor, in deren Bereich äußere Einwirkungen verschiedener Art in regelmäßiger Weise sich geltend machen. Von diesen äußeren Einwirkungen könnte zunächst der *D r u c k d e r G a l e a u n d d e r H a u t d e c k e n* erwähnt werden. Derselbe muß bei aufrechter Körperhaltung die von dem negativen intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke erzeugte Druckspannung in der Schädelwand erhöhen. Bei liegender Körperhaltung dagegen wird er notwendigerweise die von dem jetzt positiven intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke erzeugte Zugspannung in der knöchernen Schädeldecke ermäßigen. Nimmt man sodann an, daß die aufrechte Körperhaltung täglich 16 Stunden dauert und die liegende 8 Stunden, so bemerkt man, daß die von den weichen Schädeldecken erzeugten Druckwirkungen für den Durchschnitt der 24 Stunden des Tages nur mit dem dritten Teile ihres Betrages in Rechnung kommen. Dieser dritte Teil wird sich als eine Mehrbelastung des knöchernen Schäeldaches darstellen. Indessen ist der Druck der Galea kein erheblicher, so daß der dritte Teil desselben, der allein in Rechnung kommt, ohne großen Fehler vernachlässigt werden kann. In gleicher Weise wäre auch die *S p a n n u n g d e r D u r a* zu betrachten, die gleichfalls nur mit einem Drittel ihres ohnehin geringen Wertes in Rechnung kommt. Wie bereits oben, bei Betrachtung der Beobachtungsfehler berichtet wurde, muß infolge dieser Mehrbelastungen die knöcherne Schädelwand etwas dicker werden, so daß ihre Materialspannung etwas zu klein ausfällt, wenn sie aus obigen Messungen unter Vernachlässigung der weichen Schädeldecken bestimmt wird. Auf eine numerische Bestimmung dieser Ungenauigkeit mußte jedoch begreiflicherweise verzichtet werden.

Wesentlich in anderer Weise wirkt der *M u s c u l u s t e m p o r a l i s* auf die Schädelwand. Indem er von letzterer seinen Ursprung nimmt, muß er bei jeder Kontraktion in unmittelbarer Weise eine Zugspannung in der Schädelwand erzeugen. Daneben mag er auch direkte Druckwirkungen auf die Schädelwand auslösen. Eine theoretische Betrachtung dürfte unter diesen Umständen auf Schwierigkeiten stoßen. Bei einer empirischen Prüfung kann man indessen annehmen, daß die Zugspannungen durch äquivalente Druckwirkungen auf die

Schädelaußenfläche ersetzt wären, die sich dann mit den direkten Druckwirkungen summieren. Weiterhin ist es jedoch kaum zu übersehen, ob die Summe dieser indirekten und direkten Druckwirkungen bei aufrechter und bei liegender Körperhaltung ihrer Größe und Richtung nach gleich oder verschieden sind. Die Zugspannung des Muskels dürfte in beiden Fällen eine sehr ungleiche sein. Ihr durchschnittliches Äquivalent ist jedoch nicht schwer zu finden.

In der Regio temporalis ist die Schädelwand von sehr geringer Dicke, während die Krümmungsradien der Schädelinnenfläche sehr große sind. Wenn man sodann unter Berücksichtigung der Niveauverhältnisse den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck im Durchschnitt für die 24 Stunden des Tages mit 0,1832 g für den qmm in Rechnung bringt, so ergeben sich für die beiden in Tabelle I berücksichtigten Stellen der Temporalregion des Scheitelbeines Materialspannungen von 3,27 und 7,43 g für den Quadratmillimeter. Diese Spannungen sind offenbar viel zu hoch. Die Rechnung aber zeigt, daß an den genannten Stellen eine normale Materialspannung von 3 g auftritt, wenn auf der Knocheninnenfläche ein Druck von 0,168 und 0,074 g (qmm) in Rechnung gesetzt wird. Indessen besteht an den genannten Stellen ein intrakranieller Flüssigkeitsdruck von 0,1832 g (qmm). Wenn man sodann annimmt, daß an den genannten Stellen die Wirkung des Temporalmuskels äquivalent ist einem auf der Außenfläche des Schädels lastenden Drucke, welcher im Durchschnitte für die 24 Stunden des Tages an der einen Stelle 0,0152 g (qmm) und an der andern Stelle 0,1092 g (qmm) beträgt, so erhält man eine mechanische Beanspruchung des Knochens, welche die normale Materialspannung von 3 g (qmm) erzeugt. Denn der auf der Außenfläche des Schädels lastende Druck muß von dem intrakraniellen Flüssigkeitsdruck abgezogen werden, wenn der die Spannung s erzeugende Binnendruck gefunden werden soll. In diesem Falle aber wird $0,1832 - 0,0152 = 0,1680$ g (qmm) und $0,1832 - 0,1092 = 0,0740$ g (qmm), entsprechend obigen, die normale Materialspannung erzeugenden Werten.

In Beziehung auf die Wachstumsorgänge in der knöchernen Schädelwand ist somit die Wirkung des Musculus temporalis eine ganz andere als diejenige des Musculus epicranius und seiner sehnigen Ausbreitung, der Galea aponeurotica. Während letzterer für den Durchschnitt der 24 Stunden des Tages die Spannungen des Schädeldaches, wie oben gezeigt wurde, um ein geringes erhöht und damit die Schädelwand dicker werden läßt, erzeugt der Musculus temporalis ebenso wie die Druckwirkung des Atlas an der Stelle *a* der Squama occipitis eine Ermäßigung der für das Knochenwachstum maßgebenden durchschnittlichen Spannung der Schädelwand. Die Wirkung ist dieselbe, wie sie in einer dauernd unter positivem Binnendruck stehenden Schädelkapsel auftreten würde bei einer Steigerung des auf der Außenfläche des letzteren lastenden Druckes.

Unter diesen Umständen versteht man es ohne weiteres, wenn man den Temporalmuskel verantwortlich macht für die mehr oder weniger deutliche Einziehung der Temporalregion des knöchernen Schädels, welche so häufig beobachtet wird und sich bis zu einer lokalen Schädelenge steigern kann. Eine direkte, ex-

perimentelle Bestätigung der vorgetragenen Anschauungen und Ergebnisse aber kann man aus einem interessanten Versuche von L. Fick¹⁾ gewinnen. Dieser entfernte bei einem 6 Wochen alten Hunde den größten Teil des Temporalmuskels und fand nach Ablauf eines Jahres im Bereiche der Operation eine beträchtliche Zunahme der Dicke der Schädelwand. Manche Forscher werden nun allerdings geneigt sein, diesen Versuch einfach durch eine von den verschiedenen Formen der Lehre von dem Grenzstreite der Gewebe zu erklären. Wenn das eine Gewebe verschwunden ist, nimmt das Nachbargewebe an Masse zu. Diese sogenannte Erklärung bedeutet indessen tatsächlich nur ein Gleichen. Dagegen erscheint die von L. Fick beobachtete Tatsache durch obige Betrachtung erklärt. Denn diese zeigt, daß die Verdickung der Knochenwand erfolgt, weil die Entfernung des Muskels eine lokale Funktionssteigerung in Gestalt einer Spannungserhöhung nach sich zieht.

Indessen hat L. Fick einen ähnlichen Versuch auch im Bereiche der Orbita angestellt. Nachdem er das eine Auge eines 6 Wochen alten Hundes entleert hatte, fand er 12 Monate später eine erhebliche Zunahme der Dicke des Orbitaldaches. Man kann sich auch hier vorstellen, daß der experimentelle Eingriff die Druckverhältnisse in der Orbitalhöhle verändert und damit eine stärkere Spannung und funktionelle Beanspruchung des Orbitaldaches mit entsprechender Verdickung des Knochens zur Folge gehabt habe. Indessen ist es sehr schwierig, die mechanische Beanspruchung des Orbitaldaches klarzulegen, so daß eine rechnungsmäßige Durchführung dieser Erklärung vorläufig nicht wohl ausführbar erscheint.

Diese ausführliche Besprechung der in Tabelle I niedergelegten Beobachtungen dürfte meines Erachtens die Annahme rechtfertigen, daß die normale Materialspannung des Knochengewebes in allen zu der Schädeloberfläche tangentialen Richtungen annähernd 3 g für den Quadratmillimeter des Knochenquerschnittes beträgt. Zufolge der vorhandenen Fehlerquellen ist dieser Mittelwert voraussichtlich etwas zu klein ausgefallen. Doch kann der konstante Fehler nicht wohl mehr als höchstens 10 % betragen, wobei sich der Mittelwert für die normale Materialspannung auf 3,3 g (qmm) erhöhen würde. Am mazerierten und getrockneten Oberschenkel des Menschen hatte ich indessen, wie eingangs erwähnt wurde, unter Zuhilfenahme einiger Messungen die normale Materialspannung auf etwa 6,5 g (qmm) geschätzt und habe keinen Grund zu der Annahme, daß jene Schätzung um die Hälfte zu hoch gewesen wäre. Der hier anscheinend bestehende Widerspruch dürfte sich indessen auflösen, wenn man beachtet, daß an den untersuchten Stellen des Oberschenkels die Belastung nur in einer Richtung wirkte, während im Schädeldach eine nach allen tangentialen Richtungen wirkende Beanspruchung vorausgesetzt wurde. Letztere wurde bei der Ableitung der Gleichungen (1), (5) und (8) in zwei aufeinander senkrecht stehende Tangentialspannungen zerlegt, und es fanden sich sodann Gründe für die Annahme, daß diese beiden senkrecht

¹⁾ L. Fick, Über die Ursachen der Knochenformen. Göttingen 1857.

aufeinander stehenden Tangentialspannungen unter sich gleiche Größe besitzen. Aus den Tatsachen kann man daher nur schließen, daß das nur nach einer Richtung belastete Knochengewebe eine durchschnittliche Materialspannung von ungefähr 6,5 g (qmm) trage, während in einem nach zwei aufeinander senkrechten Richtungen beanspruchten Knochengewebe normalerweise nur annähernd die Hälfte dieser durchschnittlichen Materialspannung, also 3 bis 3,3 g (qmm) nach jeder der beiden Richtungen hin bestehe.

Bei der Würdigung dieses Satzes muß man im Auge behalten, daß hier in keiner Weise von der Festigkeit und Tragfähigkeit des Knochengewebes die Rede ist, welche beide einer ganz andern Größenordnung angehören. Während hier von Materialspannungen von 3 bis 7 g (qmm) die Rede ist, wäre die Festigkeitsgrenze des Knochens bei 8000 bis 15 000 g (qmm) zu suchen. Es handelt sich auch nicht um die höchsten oder niedrigsten Belastungen des Knochengewebes, sondern um einen Durchschnittswert, um die mittlere Belastung, von welcher das Knochenwachstum abhängig ist. Wie sich bei dieser die Festigkeit und Elastizität des Knochengewebes verhält, kann vorläufig unentschieden bleiben. Die physiologische Reaktion auf die Belastungen kommt hier zunächst allein in Frage. Es erscheint daher keineswegs unwahrscheinlich, daß das Knochengewebe, welches zwei aufeinander senkrechten, unter sich gleichgroßen Belastungen ausgesetzt ist, einen kritischen Wert seiner Materialspannung aufweist, welcher nur halb so groß ist als der kritische Wert der Materialspannung bei der Belastung in nur einer Richtung. Vor allem jedoch spricht in diesem Sinne die einfache Prüfung der Beobachtungen.

Es scheint nunmehr wünschenswert, die gewonnenen Erfahrungen bezüglich der Spannung der Schädelwand durch weitere Beobachtungen zu vervollständigen. Zu diesen wurde ein ausgewähltes Material annähernd normaler Schädeldächer verwendet, welche ich dem liebenswürdigen Entgegenkommen der Kollegen Chiarì und Ernst verdanke. Zunächst aber wende ich mich zu der Untersuchung des Schädelns II, deren zahlenmäßige Ergebnisse in der folgenden Tabelle II enthalten sind.

Die in Tabelle II enthaltenen Werte wurden gewonnen an dem anscheinend normalen Schädeldache eines 28 jährigen Mannes. Zunächst findet man wieder vier Messungen in der Stirn- und Scheitelgegend, welche annähernd übereinstimmende Werte für die Materialspannung s aufweisen und als arithmetisches Mittel die Materialspannung von 2,8 g (qmm) ergeben. Diese Mittelzahl ist etwas kleiner als die in Tabelle I gefundene Mittelzahl. Möglicherweise hängt dies damit zusammen, daß dieses Schädeldach nicht mazeriert und getrocknet, sondern feucht aufbewahrt worden war, wobei allerdings vorausgesetzt werden müßte, daß das

Tabelle II.

Schädel II (Salzlösung, Alkohol). Mann, 28 Jahre alt.

d Dicke der Knochensubstanz. R' größerer Hauptkrümmungsradius der Schädelwand.
 R'' kleinerer Hauptkrümmungsradius derselben. i intrakranieller Flüssigkeitsdruck. s Materialspannung, welche der Druck i erzeugt. P Druck, welcher die Materialspannung von 2,822 g pro qmm erzeugt.

Punkt der Fig. 8	Ort	d mm	R' mm	R'' mm	i Gramm pro qmm	s Gramm pro qmm	P Gramm pro qmm
1	Os frontale dext.	4,74	147	117	0,2034	2,79	—
2	Os frontale sin.	4,75	150	125	0,2034	2,92	—
3	Os parietale dext.	3,84	112	111	0,2034	2,96	—
4	Os parietale sin.	3,86	140	77	0,2034	2,62	—
Mittelwert der Materialspannung $s =$						2,822	g qmm
Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung =						0,103	= 3,6 %
Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers des Mittelwertes =						0,051	= 1,8 %
5	Tuber frontale dext.	3,91	63,29	40,03	0,2034	1,28	0,450
6	Tuber frontale sin.	3,89	63,15	42	0,2034	1,32	0,435
7	Tuber parietale dext.	3,22	78,92	44,15	0,2034	1,79	0,321
8	Tuber parietale sin.	3,60	89	43,40	0,2034	1,65	0,348
10	Os parietale sin.	3,73	105,4	29,72	0,2034	1,27	0,453
11	Os parietale dext.	4,14	54	48,37	0,2034	1,25	0,458
12	Os parietale sin.	4,12	58,29	48,06	0,2034	1,30	0,441

Bemerkung. Wiederum wurden hier, wenn die Krümmungsradien der inneren und der äußeren Schädelfläche verschieden waren, nach dem alsbald zu beschreibenden Verfahren Mittelzahlen berechnet und diese — der einfachen Unterscheidung halber — vierstellig ausgedrückt. Betreffs der direkten Messungsresultate an diesen Stellen siehe den beigefügten Nachtrag.

Nachtrag zu Tabelle II.

Außere und innere Krümmungsradien der Schädelwand, für welche in Tabelle II Mittelwerte angegeben sind, nebst den zugehörigen Werten der Dicke der äußeren Knochenschichten, ausgedrückt in Bruchteilen der Dicke d .

Punkt	Ort	Außen-fläche mm	Innen-fläche mm	Außen-fläche mm	Innen-fläche mm	Rel. Dicke d. äußeren Knochenschicht
Schädel II, Mann, 28 Jahre.						
5	Tuber frontale dext.	100	50	53	34	0,42
6	Tuber frontale sin.	66	61	—	—	0,45
7	Tuber parietale dext.	81	76	52	36	0,6
8	Tuber parietale sin.	—	—	46	40	0,6
10	Os parietale sin.	223	69	42	23	0,5
11	Os parietale dext.	—	—	46	51	0,5
12	Os parietale sin.	62	55	44	53	0,5

mazerierte und das feucht aufbewahrte Schädeldach ungleichen Schrumpfungen in der Richtung der Dicke und der Oberfläche unterworfen ist. Wichtiger scheint es mir indessen zu sein, daß die Dünnschliffe des Schädel I bei dem Einlegen in Kanadabalsam zumeist etwas erwärmt worden waren. Die bei solchen Erwärmungen eintretende starke Schrumpfung des Knochengewebes ließ die Dicke d des Schädeldaches kleiner werden, woraus sich bei der Berechnung eine entsprechende Erhöhung der Materialspannung s ergeben mußte. Damit würden sich die Ver-

schiedenheiten der Mittelwerte von s bei Schädel I und II jedenfalls zum Teil erklären. Außerdem wird man die variablen Beobachtungsfehler zu berücksichtigen haben und nicht minder auch den Umstand, daß die Mittelwerte von s wahrscheinlicherweise individuelle Variationen aufweisen, welche vielleicht zu dem allgemeinen Ernährungszustand und wohl auch zu dem Kalkgehalt des Knochen-

gewebes in Beziehung stehen. In der Tat möchte ich auch solche individuelle Variationen für einen Teil der errechneten Unterschiede in den Mittelwerten der Materialspannung s verantwortlich machen, da dieser Schädel bereits bei der Betrachtung mit unbewaffnetem Auge als verhältnismäßig etwas dicker erscheint.

Sodann bemerkt man, daß wiederum die Tubera frontalia und parietalia nur sehr kleine Werte für die Materialspannung s ergeben, wenn an der Innenfläche der Tubera nur der intrakranielle Flüssigkeitsdruck von 0,2034 g (qmm) in Wirksamkeit gedacht wird. Wie früher gelangt man zu dem Ergebnisse, daß die normale Materialspannung von 2,822 g (qmm) im Bereich dieser Tubera erst erreicht wird, wenn an denselben eine Druckwirkung von seiten des Gehirns stattfindet, welche den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck übersteigt und, wie die letzte Spalte der Tabelle II zeigt, zwischen 0,321 und 0,450 g (qmm) liegt. Es sind dieses wieder Druckwerte, welche etwa dem doppelten Betrage des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes gleichkommen und annähernd dem Drucke einer Quecksilbersäule von 30 mm Höhe äquivalent sind. Daß solche Druckwerte keine Funktionsstörungen von seiten des Gehirns zur Folge haben, wurde früher bereits besprochen.

Unweit der Mittellinie, zu beiden Seiten der Pfeilnaht, finden sich jedoch an den Scheitelbeinen einige Stellen (Punkte 10, 11, 12), an welchen der

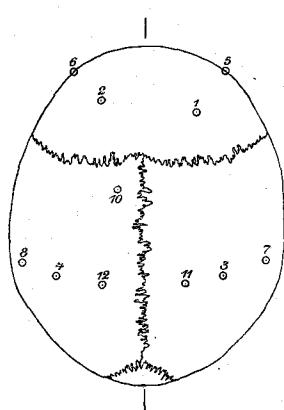


Fig. 8. Schädeldach II eines 28-jährigen Mannes, von oben betrachtet, verkleinert 4 : 1. Die numerierten Kreise bezeichnen die in Tabelle II genannten Punkte. Die Umrisslinien dieser Figur wurden an dem abgesägten Schädeldach auf Papier nachgezogen und dann verkleinert. Die Nahtlinien, welche freihändig gezeichnet wurden, sind etwas ungenau, da das Periost die Erkennung der Nähte erschwert. Sämtliche Nähte des Schädeldaches, außer der Stirnnaht, sind erhalten. Todesursache: chronische tuberkulöse Pneumonie, tuberkulöse Darmgeschwüre, tuberkulöse Koxitis. Schädeldach in 96 % Alkohol konserviert nach kurzem Aufenthalt in Salzlösung (5 % Kochsalz + 5 % kristall. schwefelsaures Natron + 2 % Chlor-kalium + 1 % Kalisalpeter in Wasser).

intrakranielle Flüssigkeitsdruck gleichfalls nicht imstande ist, die normale Materialspannung herbeizuführen. Diese Tatsache erklärt sich jedoch in sehr einfacher Weise, wenn man die Besonderheiten der anatomischen Gestaltung dieses Schädeldaches etwas genauer betrachtet. Letzteres zeigt an seiner Außenfläche im Gebiete der Pfeilnaht eine flache Furche, welche in den vorderen Abschnitten der Scheitelbeine (Textfigur 9) etwas tiefer ist als in den hinteren und am vorderen Ende der Pfeilnaht rasch und am hinteren Ende derselben langsam verschwindet. Diese mediane

Längsrinne auf der Außenfläche des Schädeldaches steht in einem gewissen Gegensatze zu dem medianen Längswulste der Kielköpfe, *Crania carinata*, über deren Pathogenese ich mich in einer früheren Mitteilung¹⁾ geäußert habe. Man könnte dem entsprechend die mit medianer Längsrinne versehenen Schädel als Rinnenköpfe, *Crania sulcata* bezeichnen; ihre Pathogenese aber ist begreiflicherweise sehr wesentlich von derjenigen der Kielköpfe verschieden.

Die Pathogenese der Rinnenköpfe ergibt sich ohne Schwierigkeit, wenn man beachtet, daß der äußeren Längsrinne des Schädeldaches eine mehr oder weniger deutliche Einbuchtung der Schädelinnenfläche entspricht, welche als Längswulst in den Schädelraum vorragt. Dieser Längswulst trägt auf dem Teile seines Rückens, welcher am weitesten nach unten in den Schädelraum vorspringt, bei f die Hirnsichel. Macht man sodann den Versuch zu beiden Seiten dieses Längswulstes, etwa an den Punkten 9, 10, 11, 12 der Textfig. 8 und 9 die Materialspannungen zu bestimmen, so begegnet man zunächst der Schwierigkeit, daß an diesen Stellen die innere und die äußere Oberfläche der Schädelwand erhebliche Abweichungen von einem parallelen Verlaufe aufweisen.

Unter diesen Umständen erscheinen die oben abgeleiteten Spannungsgleichungen als ungünstig. Man kann jedoch den bestehenden Verhältnissen gerecht werden, wenn man Mittelwerte zwischen den reziproken Werten der Krümmungsradien der äußeren und der inneren Schädelfläche bildet. Bezeichnet man die Hauptkrümmungsradien der äußeren Schädelfläche mit R_1 und R_2 und die Hauptkrümmungsradien der inneren Schädelfläche mit r_1 und r_2 , so kann man sich die Schädelwand ihrer Dicke nach in zwei Schichten zerlegt denken, welche bei vorhandener Diploë der äußeren und inneren Glastafel entsprechen würden. Die Dicke der äußeren Schicht der Schädelwand wäre dann mit αd zu bezeichnen, wenn d die Summe der Dicke der äußeren und der inneren Schicht und α eine Zahl bedeutet, welche kleiner als die Einheit ist. Die Dicke der inneren Schicht der Schädelwand wäre dann gleich $(1 - \alpha) d$. Die Materialspannung s_a in der äußeren Schicht der Schädelwand wäre dann

$$s_{a\alpha} = \frac{i_a}{\alpha d \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

wenn i_a denjenigen Teil des intrakraniellen Druckes bezeichnet, welcher die Gesamtspannung $s_a \cdot \alpha d$ in der äußeren Schicht der Schädelwand erzeugt. Ebenso kann man die Materialspannung s_i in der inneren Schicht der Schädelwand zum Ausdruck bringen durch die Gleichung

$$s_i = \frac{i_i}{(1-\alpha) d \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)},$$

in welcher wiederum i_i denjenigen Teil des intrakraniellen Druckes bezeichnet, welcher die Gesamtspannung $s_i \cdot (1 - \alpha) d$ in der inneren Schicht der Schädelwand hervorruft.

¹⁾ R. Thoma, Synostosis sut. sagitt. Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

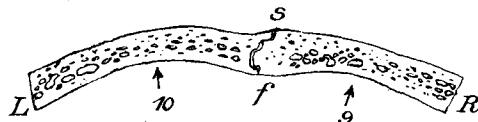


Fig. 9. Frontaler Durchschnitt des Schädels II durch das vordere Viertel der Pfeilnaht s und den Punkt 10 der Fig. 8. R rechts, L links. Die Diploë frei-händig eingetragen, ungenau. Umrisse am Knochen entlang gezogen, genau. Natürliche Größe.

Wenn man sodann erwägt, daß die Materialspannungen s_a und s_i den Voraussetzungen nach gleich groß und gleich s sein müssen, so folgt aus diesen Gleichungen, da zugleich $i_a + i_i = i$ ist:

$$s = \frac{i}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)} \quad (9)$$

wobei die beiden Mittelwerte ρ_1 und ρ_2 bestimmt sind durch die Gleichungen

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{\alpha}{R_1} + \frac{1-\alpha}{r_1} \quad (10)$$

und

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{\alpha}{R_2} + \frac{1-\alpha}{r_2}. \quad (11)$$

In diesen beiden letzten Gleichungen bezeichnen R_1 und r_1 den äußeren und inneren Hauptkrümmungsradius der Schädelwand und ρ_1 ihren Mittelwert für die eine Hauptschnittebene und R_2 , r_2 und ρ_2 die gleichen Werte für die andere Hauptschnittebene. Indessen bemerkt man, daß zufolge des Euler'schen Satzes diese Gleichungen ihre Gültigkeit auch dann behalten, wenn die beiden aufeinander senkrechten Durchschnitte der Schädelwand, auf welchen die Krümmungsradien gemessen wurden, nicht mit den beiden Hauptschnittebenen zusammenfallen, was allerdings erst deutlich hervortritt, wenn man die Addition der beiden Gleichungen 10 und 11 ausführt.

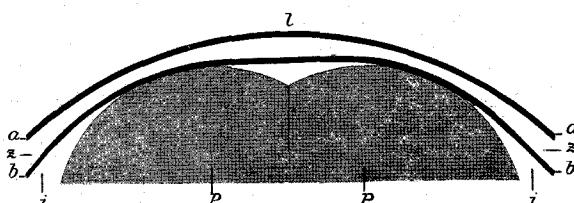


Fig. 10. Schädelwand durch zwei Membranen, eine äußere a und eine innere b ersetzt, in deren Zwischenraum der Druck z herrscht. P, P zwei Hirnwundungen, an die Innenfläche der inneren Membran b drückend. i intrakranieller Flüssigkeitsraum. l äußere Luft. Schema.

Zunächst ist es jedoch von weitergehendem und allgemeinerem Interesse, die Vorstellungen zu besprechen, welche dieser Methode der Bildung der Mittelzahlen zugrunde gelegt werden können, weil sich aus ihnen das Verständnis für die verschiedenartige Gestaltung der äußeren und der inneren Glastafel, für die Jugae cerebralia und Impressiones digitatae und für einige andere Besonderheiten des Baues der Schädelwand ergibt.

Man kann von dem Gedanken ausgehen, daß die Schädelwand ersetzt sei durch zwei Membranen a und b (Textfig. 10), in welchen ähnlich wie in der Wand einer Seifenblase die Gesamtspannung nach allen Richtungen der Tangenten gleich groß ist. Zwischen beiden Membranen, in dem Zwischenraume z befindet sich eine Flüssigkeit, Wasser oder Luft, in welcher notwendigerweise der Druck, den man gleichfalls durch z ausdrücken kann, überall gleich groß ist. An die innere Membran drücke an bestimmten Stellen das Gehirn P mit dem Drucke P , während im übrigen die — in den Maschenräumen der weichen Hirnhäute eingeschlossene — Flüssigkeit i mit dem intrakraniellen Flüssigkeitsdruck i auf die Innemembran b wirkt. Wenn man sodann annimmt, daß der intrakranielle Flüssigkeitsdruck i größer sei als der äußere Luftdruck l — was bei liegender Körperhaltung zutrifft, so werden beide Membranen gespannt sein. Die innere Membran aber wird einen welligen Verlauf darbieten, den man sich veranschaulichen kann, wenn man auf ein aufgeblasenes Luftkissen der üblichen Konstruktion mit den gespreizten Fingern einer Hand drückt. Indessen ist dieses Beispiel etwas mangelhaft, weil man keine Gewähr dafür besitzt, daß die Spannung der Wand des Luftkissens in allen tangentialen Richtungen gleich groß ist.

Bei der hier vorausgesetzten Versuchsanordnung ist die Zugspannung in jeder der beiden Membranen überall nach allen tangentialem Richtungen gleich groß, während zugleich die Möglichkeit offen gehalten wird, daß die Spannung in der äußeren Membran eine andere sei als in der inneren Membran. In diesem Falle muß, da die Materialspannung überall gleich groß sein soll, die Dicke der beiden Membranen verschieden sein. Die Zugspannung der inneren Membran bewirkt sodann, da die Krümmung der letzteren sich bald nach innen, bald nach außen wendet, den Ausgleich zwischen dem an verschiedenen Orten ungleichen Drucke der auf der Innenfläche der Innenmembran lastet, und dem überall gleichen Drucke der den Zwischenraum z füllenden Flüssigkeit. Wo der Druck der Hirnwindingen auf die Innenfläche der Membran b größer ist als der Druck der Flüssigkeit, welche den Zwischenraum z ausfüllt, werden die Hirnwindingen die Membran b konvex nach außen vorbauchen, bis bei der gegebenen Spannung die Krümmungsradien der Membran der Druckdifferenz $P - z$ entspricht. Umgekehrt ist vorauszusehen, daß überall da, wo die Innenfläche der Innenmembran b nur unter dem intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke i steht, welcher kleiner ist als der auf der Außenfläche der Innenmembran lastende Druck z , letztere Membran konvex nach innen gebaucht wird, bis bei der gegebenen Spannung die Krümmungsradien der Druckdifferenz $i - z$ entsprechen. Dabei ergibt sich als notwendige Folge der in Textfig. 10 schematisch gezeichnete wellige Verlauf der Innenmembran. Letztere ist in der Tat gegenüber dem wechselnden, an ihrer Innenfläche wirkenden Drucke in dem Grade empfindlich, daß die Innenfläche der Schädelwand, wie namentlich Stearinausgüsse des Schädels zeigen, ein außerordentlich scharfes Abbild der — bei gefüllten Arachnoidealräumen — von den Hirnhäuten bedeckten Gehirnoberfläche darstellt. Solche Stearinausgüsse des Schädels gestatten in der Tat, die räumliche Anordnung der Hirnwindingen und den Verlauf der Blutgefäße in ungewöhnlich zuverlässiger Weise zu verfolgen.

Die Zugspannung in der äußeren Membran des Schädels (Textfigur 10 a) steht unter dem Einflusse des in dem Zwischenraume z herrschenden Druckes einerseits und unter der Wirkung des Außendruckes l andererseits. Wenn keine weiteren Wirkungen hinzukommen, muß unter diesen Umständen die Außenmembran, deren Spannung nach allen Richtungen gleiche Größe besitzt, die Gestalt einer Kugelschale aufweisen, und die Konvexität der letzteren muß nach außen gekehrt sein, weil der Druck z höher ist als der Außendruck l . Wenn dagegen an den oben genannten fünf Druckpolen des Schädels der Druck des Hirns die Innenmembran in dem Grade vorwölbt, daß letztere an diesen Polen einen Druck auf die Innenfläche der Außenmembran ausübt, welcher höher ist als der Druck der Flüssigkeit z , so wird notwendigerweise die Kugelgestalt der Außenmembran verloren gehen.

Die Bedingungen, unter welchen die Außenmembran des Schädels steht, stimmen jetzt genau mit denjenigen überein, welche in der Wand der früher besprochenen Seifenblase auftreten, sowie diese mit einem Flüssigkeitstropfen belastet wird. Der an den fünf Druckpolen verstärkte Druck auf die Innenfläche der Außenhaut des Schädels führt während des Wachstums zu einer Ausbauchung in der Gegend der Druckpole, und zwar nimmt diese Ausbauchung so lange zu, bis die Tangentialspannungen überall ihren normalen, nach allen Richtungen hin gleich großen Wert erreicht haben. Dabei wird, wenn keine anderen Einwirkungen hinzutreten, die Krümmung der Außenhaut des Schädels überall ihre Konvexität nach außen kehren und zugleich sehr einfache Formen zeigen, wie dies in der Wirklichkeit der Fall ist. Man ist somit vollständig in der Lage, die glatte und abgerundete Gestaltung der äußeren Oberfläche des Schäeldaches zu erklären und gleichzeitig zu verstehen, weshalb unter der Mitwirkung der Gravitation, des Muskelzuges und anderer Kräfte die Schädelbasis sehr verwickelte Formen darbietet. Zugleich aber erkennt man, daß die von den fünf Druckpolen ausgehenden meridionalen Zugspannungen die Innenmembran des Schädels in ähnlicher Weise wie die Außenhaut beeinflussen müssen, so daß die Innenmembran, obgleich die Hirnwindingen Impressionen und Juga auf ihr erzeugen, dem allgemeinen Verlaufe der äußeren Membran folgen wird.

Nach diesen Ergebnissen ist indessen noch zu prüfen, ob die in Textfig. 10 dargestellten

Formen auch Bestand haben, wenn bei aufrechter Körperhaltung der intrakranielle Flüssigkeitsdruck f kleiner und unter Umständen kleiner als der äußere Luftdruck wird. In letzterem Falle wird, wenn der äußere Luftdruck f gleich Null gesetzt wird, der intrakranielle Flüssigkeitsdruck negativ. Dabei ist allerdings anzunehmen, daß die Membranen a und b in Knochensubstanz übergegangen sind, nachdem sie zuvor alle die Krümmungen angenommen haben, durch welche die tangentiale Zugspannungen bei den der Textfig. 10 zugrunde liegenden Druckverhältnissen überall gleich groß wurden. In diesem Falle werden die Membranen imstande sein, sowohl die Zugspannungen, welche bei positivem, als die Druckspannungen, welche bei negativem intrakraniellen Flüssigkeitsdruck zu gewärtigen sind, in gleicher Weise zu tragen.

Wenn man sodann für die liegende Körperhaltung den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck an einer bestimmten Stelle mit f bezeichnet und den überall gleichen Druck in der zwischen den Membranen a und b enthaltenen Flüssigkeit gleich z , so wird die Gesamtspannung in der inneren Membran gleich

$$(1-\alpha) ds_i = \frac{f - z}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}$$

und die Gesamtspannung in der äußeren Membran

$$\alpha ds_a = \frac{z}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Hierbei bezeichnet d die Summe der Dicke der beiden Membranen, αd die Dicke der Außenmembran und $(1-\alpha)d$ die Dicke der Innenmembran, während die zugehörigen Materialspannungen s_i und s_a unter sich gleich sind und gleich m gesetzt werden können. Durch Summierung der beiden Gleichungen folgt sodann für die liegende Körperhaltung

$$\text{Materialspannung } m = \frac{f}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}, \quad (12)$$

wenn wie früher

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{\alpha}{R_1} + \frac{1-\alpha}{r_1} \quad (13)$$

und

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{\alpha}{R_2} + \frac{1-\alpha}{r_2}. \quad (14)$$

Wenn sodann bei aufrechter Körperhaltung der intrakranielle Flüssigkeitsdruck sich ändert, indem er gleich $f - g$ wird, ist in vorstehender Betrachtung der Wert f durch $f - g$ zu ersetzen, und man findet für die aufrechte Körperhaltung die Materialspannung n gleich

$$\text{Materialspannung } n = \frac{f - g}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}. \quad (15)$$

Sowie die Membranen aus Knochengewebe bestehen, ändern sich die Krümmungsradien derselben im Laufe einzelner Tage nicht oder nicht in nachweisbarer Weise. Man ist somit genötigt, anzunehmen, daß sie diejenige Länge besitzen, welche dem 24stündigen Mittelwerte der Spannungen m und n entspricht. Den 24stündigen Mittelwert s der Spannungen m und n gewinnt man jedoch, wenn man annimmt, daß die Spannung n täglich 16 Stunden lang bestehe, während die Spannung m nur täglich 8 Stunden lang in Wirkung sei. Somit ergibt sich der 24stündige Mittelwert s der Materialspannungen m und n gleich

$$s = \frac{m + 2n}{3}$$

oder

$$s = \frac{i}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}, \quad (16)$$

wobei

$$i = \frac{f + 2(f-g)}{3}. \quad (17)$$

während zugleich die reziproken Werte von ρ_1 und ρ_2 in den Gleichungen (13) und (14) gegeben sind. In diesen Gleichungen (13) bis (17) sind jedoch bei der Bildung der Mittelwerte immer nur die absoluten Werte der Drucke f und $(f-g)$ und der Spannungen m und n ohne Rücksicht auf ihre Vorzeichen miteinander zu addieren, weil positive und negative Spannungen gleiche histomechanische Wirkung ausüben.

In dieser Weise sind in vorliegender Arbeit überall die Materialspannungen s bestimmt worden. Denn auch diejenigen Fälle, in welchen die Krümmungsradien der Innen- und Außenfläche des Schädelns für jede Hauptsnittebene gleich waren, können hierher gerechnet werden, da für diese — zufolge der Gleichungen (13) und (14) — die genannten Krümmungsradien außerdem gleich ρ_1 und ρ_2 waren. Dabei ergab zugleich die Beobachtung unter den verschiedensten Bedingungen Werte für die Materialspannung s , welche soweit übereinstimmten, daß man die vorstehenden Auffassungen als zu Recht bestehend anerkennen wird.

Nachdem sodann die Materialspannung s numerisch bestimmt ist, kann man, wie dies oben gleichfalls geschah, die Betrachtung auch auf diejenigen Stellen der Schädelwand ausdehnen, welche unter einer unmittelbaren Druckwirkung des Gehirns stehen. Wenn bei liegender Körperhaltung der Druck des Gehirns an einer gegebenen Stelle der Schädelwand gleich P und bei aufrechter Körperhaltung gleich P' ist, wird nach den hier vertretenen Auffassungen die Materialspannung in der gegebenen Stelle der Schädelwand

$$\text{bei liegender Körperhaltung} = \frac{P}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}$$

$$\text{und bei aufrechter Körperhaltung} = \frac{P'}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)},$$

wobei indessen hier die Mittelwerte ρ_1 und ρ_2 andere sind als früher, jedoch mit Hilfe der Gleichungen (13) und (14) aus den gemessenen Krümmungsradien der gegebenen Stelle zu bestimmen sind. Setzt man sodann den 24ständigen Mittelwert für P' und P gleich p , so wird

$$p = \frac{P + 2P'}{3}$$

und die mittlere Materialspannung für die 24 Stunden des Tages gleich

$$s = \frac{p}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)} \quad (18)$$

Nach den Prinzipien der Histomechanik muß jedoch die tangentiale Materialspannung s an allen Punkten der Schädelwand dieselbe sein, so daß man berechtigt ist, die nach Gleichung (16) bestimmte Materialspannung hier einzusetzen. Dann erhält man den an der gegebenen Stelle auf die Schädelwand einwirkenden Druck p des Gehirns im Mittel für die 24 Stunden des Tages:

$$p = sd \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right).$$

Indessen fehlt jeder Anhaltspunkt für die Höhe der beiden Druckwerte P und P' . Denn es wäre willkürlich anzunehmen, daß der Druck des Hirns auf die Innenfläche der Schädelwand bei dem Übergange von der liegenden zu der aufrechten Körperhaltung um den gleichen Betrag abnimmt wie der intrakranielle Flüssigkeitsdruck.

Wendet man nun die Aufmerksamkeit zurück auf die Gleichungen (16) und (18), so bemerkt man, daß in denselben ausschließlich 24stündige Mittel für die Spannungen s , i und p enthalten sind. Diese aber sind es, welche überall der histomechanischen Betrachtung zugrunde gelegt werden müssen. Damit ergibt sich die Berechtigung, das Schema der Textfig. 10 und die an dasselbe geknüpften Erklärungen auf die 24ständigen Mittelwerte der Drücke und der Spannungen zu übertragen. Der fertige Schädel, welcher den Gleichungen (16) und (18) entspricht, muß notwendigerweise die Formen besitzen, welche in Textfig. 10 schematisch zur Darstellung kamen. Dabei erscheint die innere Membran überall da, wo ihre Innenfläche erheblichen Ungleichheiten des Druckes des Schädelinhaltes ausgesetzt ist, in Krümmungen gelegt, durch welche diese Ungleichheiten ihren Ausgleich finden. Nur an den Tubera und an der Squama occipitis ist dieser Ausgleich gegenüber den hier sehr starken Druckwirkungen des Gehirns nicht genügend, so daß die innere Membran unmittelbar auf die äußere drückt und damit die typischen Abweichungen von der Kugelgestalt des Schädelns hervorruft.

Indessen fehlt im wirklichen Schädel die zwischen den beiden Membranen der Schädelwand angenommene Flüssigkeit z . Ihre Aufgabe wird sicher nicht von dem zum Teil flüssigen Inhalte der diploetischen Räume übernommen, sondern überall da, wo sich die beiden Membranen nicht direkt aneinander legen, von den Knochenbalkchen der Diploe. Diese übertragen den Druck von der inneren auf die äußere Kompakta und umgekehrt. Die Flüssigkeit z wurde nur angenommen, um auszudrücken, daß diese Druckwirkungen, welche von einer Membran auf die andere übertragen werden, sowohl an der Außenfläche der Innenmembran wie an der Innenfläche der Außenmembran für den Quadratmillimeter dieser Oberflächen berechnet — ähnlich wie der Druck einer Flüssigkeit — gleiche Größe besitzen. Der Ersatz der Flüssigkeit z durch die Spongiosa beeinflußt daher in keiner Weise die Tragweite und Bedeutung obiger Entwicklungen. Doch erhebt sich noch die Frage, ob die Spongiosa mitbeteiligt werde bei den tangentialen Materialspannungen des Schäeldaches. Wenn man nun die Gestalt der Spongiosamaschen als eine unregelmäßige bezeichnen könnte, so würde sie wohl kaum imstande sein, tangentiale Materialspannungen von erheblicher Größe zu tragen. Tangentiale Materialspannungen würden das unregelmäßig gestaltete Maschenwerk wesentlich stärker deformieren als die genau nach den Spannungsrichtungen konstruierten Glastafeln, und damit würde die Materialspannung der Spongiosa erheblich abnehmen. Nimmt man dagegen an, daß auch die Spongiosa einen der mechanischen Beanspruchung entsprechenden Bau besitzt, so muß diese auch an den Materialspannungen vollkommen teilnehmen. Die periodischen Änderungen des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes erschweren indessen das Urteil in erheblichem Grade. Eine nicht geringfügige Mitbeteiligung der Diploe an den Tangentialspannungen scheint mir indessen nicht abzulehnen zu sein, so daß es sich empfiehlt, bei den Bestimmungen der Dicke d des Schäeldaches die Diplobalken mit in Rechnung zu bringen, wie dies oben geschah. Dies gilt um so mehr als eine Abgrenzung der Diploe gegen die kompakten Rindenschichten nicht ohne erhebliche Willkür herbeigeführt werden kann. Bei der Betrachtung der Fehlerquellen der Messungsmethoden wurde diese Tatsache bereits berücksichtigt.

Mit diesen Erörterungen scheint der Bau des Schäeldaches in seinen Grundzügen dem Verständnis nähergerückt. Doch wird man nicht ausschließen können, daß stellenweise auch weniger einfache Bedingungen für den Bau der Schädelwand bestehen. Namentlich können Biegungs- spannungen, welche durch die Gravitation oder den Muskelzug ausgelöst werden, Knochenlamellen zur Entwicklung bringen, welche die innere Glastafel weit in den Schädelraum hineinziehen. Schematisch sind diese Verhältnisse zu veranschaulichen, wenn man annimmt (Textfig. 11), eine starke Schnur oder ein Draht liege zwischen der äußeren und inneren Membran und ziehe letztere gegen das Schädelinnere hinein. Wie sich indessen dabei die Materialspannung gestaltet, wird sich bei

einer andern Gelegenheit erörtern lassen. Zu erwarten aber ist, daß auch hier die Materialspannungen die normale Höhe erreichen.

Diesen Betrachtungen zufolge entstehen die Abweichungen von dem parallelen Verlaufe der inneren und der äußeren Schädeloberfläche immer dann, wenn das 24stündige Mittel der Druckbelastung, unter welcher die Schädelinnenfläche steht, von Stelle zu Stelle Unterschiede aufweist. Diese Unterschiede beruhen hauptsächlich darauf, daß die Hirnwundungen an einzelne Teile der Schädelinnenflächeandrängen und diese unter einen Druck setzen, welcher den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck übersteigt. Durch die mannigfachen Änderungen der Krümmungsradien der Schädelinnenfläche werden diese Druckunterschiede ausgeglichen, indem dabei jene Bildungen entstehen, welche man als Jugacebra lia und Impressiones digitatae bezeichnet.

Diese erwiesen sich nahezu in allen Einzelheiten vergleichbar mit den Eindrücken, welche unregelmäßig verteilte Druckwirkungen auf der Oberfläche eines Luftkissens hervorrufen. Die weitere Folge des Druckausgleiches ist so dann in der Tatsache gegeben, daß die Schädelaußenfläche, überall wo keine

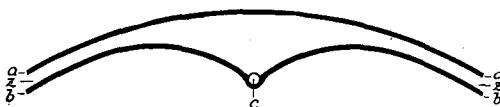


Fig. 11. Schema der Schädelwand. Die innere Membran wird durch eine gespannte Schnur *c* nach innen gezogen. Bezeichnungen im übrigen wie in Fig. 10.

weiteren Umstände hinzutreten, auffallend glatt und gleichmäßig gekrümmt erscheint.

Wenn aber die Druckunterschiede an benachbarten Stellen der Schädelinnenfläche etwas erheblichere sind, wird dieser Druckausgleich ohne Mitbeteiligung der Außenfläche der Schädelwand nur möglich, wenn in der Dicke der letzteren eine Spongiosa vorhanden ist, welche den Abstand der Innen- und Außenfläche des Schädels vergrößert und damit der inneren Schädelfläche Raum zu der Entwicklung ausgiebiger Kompensationskrümmungen gewährt. Damit ist aber nicht etwa die Ursache gegeben, welche die Entwicklung der Diploe veranlaßt, denn man findet diese auch in Gebieten, in welchen die innere und die äußere Schädeloberfläche parallel verlaufen. Doch steht demungeachtet die Entwicklung der Diploe in naher Beziehung zu den Ungleichheiten des an der inneren Seite der Schädelwand herrschenden Druckes, was indessen erst später bei einer genaueren Betrachtung der Schädelentwicklung in zutreffender Weise gewürdigt werden kann.

Schließlich findet man an den fünf Druckpolen des Schädels, an den *Tubera frontalia* und *parietalia* und an der *Squama ossis occipitis* Stellen, an welchen der Druck der unterliegenden Hirnteile auch den Verlauf der äußeren Schädeloberfläche beeinflußt, indem hier die Dicke der Schädelwand nicht ausreicht zu einer völligen Kompensation der Druckunterschiede des Schädelinhaltes durch entsprechende Krümmung ausschließlich der inneren Schädelfläche. Die äußere

Schädelfläche wird daher bei der Kompensation mitbeteiligt und bewahrt dabei die einfachen und glatten Formen, wie sie bei der Abwesenheit komplizierender Umstände notwendigerweise erwartet werden müssen.

Die Materialspannung an jeder einzelnen Stelle der Schädelwand wird sodann im Durchschnitt für die 24 Stunden des Tages ausgedrückt durch die Gleichung

$$s = \frac{\omega}{d \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)} \quad (19)$$

Hier bezeichnet ω den 24stündigen Mittelwert des in Gramm ausgedrückten Druckes auf den Quadratmillimeter der inneren Schädelfläche, gleichviel ob dieser Druck von der intrakraniellen Flüssigkeit oder von der Hirnsubstanz oder von einer anderen Quelle herrührt. Sodann entspricht d , wie bisher, der Dicke der Knochensubstanz des Schädels an der gegebenen Stelle und ρ_1 und ρ_2 stellen Mittelwerte für die Krümmungsradien der inneren und äußeren Schädelfläche dar, welche gefunden werden können durch die Gleichungen

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{\alpha}{R_1} + \frac{1-\alpha}{r_1} \quad (20)$$

und

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{\alpha}{R_2} + \frac{1-\alpha}{r_2} \quad (21)$$

In diesen Gleichungen bezeichnen R_1 und r_1 den äußeren und den inneren Krümmungsradius der Schädelwand in der einen Schnittebene und R_2 und r_2 den äußeren und den inneren Krümmungsradius derselben in der anderen Schnittebene, wenn beide Schnittebenen senkrecht zu der Schädelinnen- und -außenfläche und senkrecht aufeinander stehen. Außerdem gibt α multipliziert mit d die Dicke der äußeren Schichte der Schädelwand, für welche die Krümmungsradien R_1 und R_2 maßgebend sind und $1 - \alpha$ multipliziert mit d in gleicher Weise die Dicke der inneren Schichte der Schädelwand, für welche die Krümmungsradien r_1 und r_2 in Wirkung treten. Bei Ausbildung einer spongiösen Diploe kann man dabei annähernd α der Dicke der äußeren Glastafel und $(1 - \alpha)$ der Dicke der inneren Glastafel proportional setzen. Fehlt die Spongiosa, so ist es wohl am einfachsten $\alpha = (1 - \alpha) = 0,5$ anzunehmen. Wenn aber diese Gleichungen (19)–(21) für alle Teile der Schädelwand gelten, an denen keine anderweitigen Besonderheiten störend einwirken, so ist man doch nur da, wo die intrakranielle Flüssigkeit auf die Schädelwand drückt, imstande, diesen Druck experimentell festzustellen, um sodann mit Hilfe desselben die Materialspannung s zu finden. Nachdem letztere aber bekannt ist, kann man diese Gleichungen, wie dies oben geschah, auch dafür verwenden, um aus der Materialspannung s den Druck zu berechnen, den das Gehirn an einer bestimmten Stelle auf die Schädelwand ausübt.

Den Abweichungen von dem parallelen Verlaufe der inneren und der äußeren Schädeloberfläche wird man, wie aus dieser Betrachtung hervorgeht, bei der Bestimmung der Materialspannungen in genügender Weise gerecht, wenn man mit

Hilfe obiger Gleichungen (20) und (21) Mittelwerte für die Krümmungsradien der beiden Schädelflächen berechnet, um sie sodann in die Spannungsgleichungen (7), (8) oder (19) einzuführen. Diese Mittelwerte wurden in den Tabellen — der einfachen Unterscheidung halber — in vierstelligen Zahlen gegeben in der Erwartung, daß sich der Leser durch diese vierstelligen Zahlen nicht täuschen läßt bezüglich der verhältnismäßig geringen Genauigkeit, die bei der Ausmessung der Krümmungsradien erreicht wird. Die unmittelbar aus den Messungen hervorgehenden Zahlen, aus denen die Mittelwerte abgeleitet wurden, finden sich sodann in den Hilfstabellen nachgewiesen, welche den Tabellen I und II beigefügt sind.

Für die Punkte 10, 11 und 12 des in Textfig. 8 und 9 abgebildeten Rinnenkopfes ergibt sodann die Rechnung einen verhältnismäßig starken von dem Hirn auf die Schädelinnenfläche ausgeübten Druck¹⁾. Dieser Druck erreicht nach der Aussage der Tabelle II die Höhe von 0,441 bis 0,458 g (qmm) und kommt somit annähernd dem Drucke an den *Tubera frontalia* gleich. Solche Druckwirkungen an immerhin sehr ausgedehnten Gebieten der Scheitelregion des Schädels sind ohne ausgedehnte Ausbauchungen der letzteren nur denkbar, wenn zugleich in der Mittellinie eine Einziehung der Schädelwand durch den Zug der Hirnsichel oder durch andere Momente stattfindet. In dem vorliegenden Falle dürfte wohl die Zugwirkung der Hirnsichel eine verstärkte gewesen sein, entweder weil die medialen Ränder der beiden Großhirnhemisphären etwas weiter voneinander abgerückt waren oder weil Entwicklungsanomalien des Gehirns oder des Schädels die Stellung der Scheitelbeine verändert hatten oder endlich weil die Ossifikation des Schädeldaches zur Zeit der Geburt noch wenig fortgeschritten war. In dieser Beziehung werden erst besondere Erfahrungen ein bestimmtes Urteil ermöglichen. Doch kann kein Zweifel darüber bestehen, daß die Pathogenese der Rinnenköpfe schließlich auf abnorme Zugwirkungen der Falx cerebri zurückgeführt werden muß. Der Zug der Hirnsichel aber setzt sich auf die derben Bindegewebsmassen der Sutura sagittalis fort und trifft daher nicht nur die inneren, sondern zugleich auch die äußeren Schichten der knöchernen Schädelwand. Damit erklärt es sich endlich, daß auch die äußere Oberfläche der Schädelwand an der rinnenförmigen Einziehung teilnimmt.

Schematischerweise könnte man sodann die Pathogenese der Rinnenköpfe durch Textfig. 12 zur Darstellung bringen. In dieser ist die innere und äußere

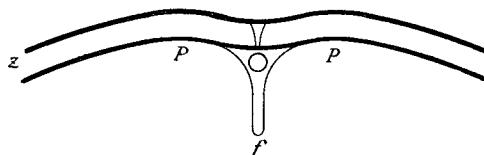


Fig. 12. Pathogenese der Rinnenköpfe. Deformation der äußeren und inneren Glastafel des Schädeldaches durch den Zug der Falx und des Nahtknorpels der Sutura sagitt. f Falx cerebri. P, P Druckstellen des Gehirns. Schema.

voneinander abgerückt waren oder weil Entwicklungsanomalien des Gehirns oder des Schädels die Stellung der Scheitelbeine verändert hatten oder endlich weil die Ossifikation des Schädeldaches zur Zeit der Geburt noch wenig fortgeschritten war. In dieser Beziehung werden erst besondere Erfahrungen ein bestimmtes Urteil ermöglichen. Doch kann kein Zweifel darüber bestehen, daß die Pathogenese der Rinnenköpfe schließlich auf abnorme Zugwirkungen der Falx cerebri zurückgeführt werden muß. Der Zug der Hirnsichel aber setzt sich auf die derben Bindegewebsmassen der Sutura sagittalis fort und trifft daher nicht nur die inneren, sondern zugleich auch die äußeren Schichten der knöchernen Schädelwand. Damit erklärt es sich endlich, daß auch die äußere Oberfläche der Schädelwand an der rinnenförmigen Einziehung teilnimmt.

Schematischerweise könnte man sodann die Pathogenese der Rinnenköpfe durch Textfig. 12 zur Darstellung bringen. In dieser ist die innere und äußere

¹⁾ Der in der Tabelle II fehlende, symmetrisch zu Punkt 10 gedachte Punkt 9 des Schädels konnte aus äußeren Gründen nicht nach dieser Richtung hin untersucht werden.

Glastafel der Schädelwand durch je eine dunkel gezeichnete Membran ersetzt, die durch einen mit Wasser oder Luft gefüllten Zwischenraum voneinander getrennt und durch den Zug der Falx und der Nahtsubstanz der Pfeilnaht nach innen gezogen werden. Wenn sodann die tangentialen Spannungen in jeder der beiden Membranen nach allen Richtungen hin gleich groß sind, müssen dieselben die gezeichnete Form annehmen. Letztere aber läßt sich, wie oben ausführlicher besprochen wurde, auch auf die Form der knöchernen Schädelwand übertragen, weil der nach allen Richtungen hin gleich große Druck des Wassers oder der Luft in dem Zwischenraume z im wesentlichen die mechanische Beanspruchung der spongiösen Diploe zum Ausdrucke bringt.

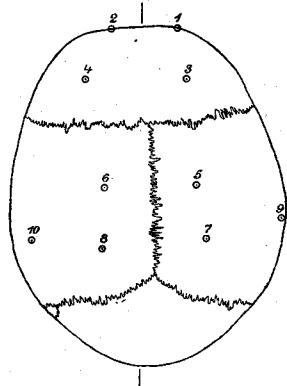


Fig. 13. Schädeldach III eines 19 jährigen Mannes, von oben betrachtet. Verkleinert 4 : 1. Die numerierten Kreise umgeben die in Tabelle III genannten Punkte.

Das Schädeldach war etwas schräg abgesägt worden, so daß die Pfeilnaht etwas seitlich verschoben erscheint. Nähte frei-händig eingezeichnet, ungenau. Sämtliche Nähte des Schädeldaches, außer der Stirnnaht, sind erhalten. Tod 3 Tage nach Unfall. Schädeldach in Alkohol aufbewahrt nach kurzem Aufenthalt in Salzlösung (6 % Kochsalz + 6 % kristall. schwefelsaures Natron + 2 % Chloralkalium + 1 % Kalisalpeter in Wasser).

wesentlich zu verstärken. Daß eine seitliche Kompression des Schädels bereits vor der Geburt erfolgen kann, läßt sich auf Grund ausreichender Erfahrungen bestimmt behaupten. Für den hier gegebenen Fall indessen erscheint es mir wahrscheinlicher, daß die Deformation des Schädels erst nach der Geburt eintrat. Der bei aufrechter Körperhaltung negative Druck der Flüssigkeit im Schädel des Neugeborenen ermöglicht jedenfalls derartige Ereignisse namentlich

Der "Schädel III" stammt von einem 19jährigen Manne und kann im allgemeinen als normal gelten. Doch zeigt derselbe im Gebiete des Stirnbeins und der vorderen Hälfte des Scheitelbeines eine schwache, mediane, kielförmige Erhebung, welche indessen so gering ist, daß sie auf Textfig. 13 nicht bemerkt werden kann. Eine genauere Vorstellung gewinnt man durch die Umrisse senkrechter Schädeldurchschnitte, welche in Textfig. 14 gegeben sind. Nach den Erläuterungen, welche ich bezüglich der Pathogenese der *Crania carinata* in einer früheren Arbeit¹⁾ gegeben habe, glaube ich mich jedoch auf den Hinweis beschränken zu dürfen, daß hier die Pfeilnaht in ihrer ganzen Länge erhalten ist, woraus hervorgeht, daß prämature Synostosen dieser Naht keine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung der medianen kielförmigen Erhebung des Schädeldaches sein kann. Maßgebend ist, nach meiner früheren Darstellung, nur ein seitlicher Druck, welcher die medianen Ränder der Scheitelbeine und der beiden noch unvereinigten Stirnbeine gegeneinander preßt, während allerdings die prämature Synostose der Pfeil- und Stirnnaht geeignet ist, die Deformation

¹⁾ R. Thoma, *Synostosis sagittalis cranii*. Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

bei verzögerter Ossifikation der Schädelwand und vielleicht auch bei Entwicklungsstörungen des Gehirns. Wie sich dabei die Verhältnisse im einzelnen gestalten, läßt sich allerdings ohne besondere Erfahrungen nicht entscheiden.

Wenn man erwägt, daß bis zur Geburt der intrakranielle Druck ohne Unterbrechung ein positiver ist, scheint es begreiflich, daß nach der Geburt leicht Störungen in der Gestalt des Schädels auftreten, wenn bei dem Aufrichten der Kinder der intrakranielle Flüssigkeitsdruck negativ wird. Die noch weichen Schädelnähte müssen dann häufig etwas deformiert werden, indem die Knochen des Schäeldaches sich aneinanderdrängen oder sich mit ihren Rändern übereinanderschieben. Solche Annahmen erklären es dann auch, wenn in dem vorliegenden Falle die Schädelaußenfläche im Bereich des hinteren Viertels der Pfeilnaht eine rinnenförmige Einziehung aufweist (Textfigur 14, C). Diese röhrt jedenfalls nicht von einem abnormen Zuge der Falx cerebri her, da die

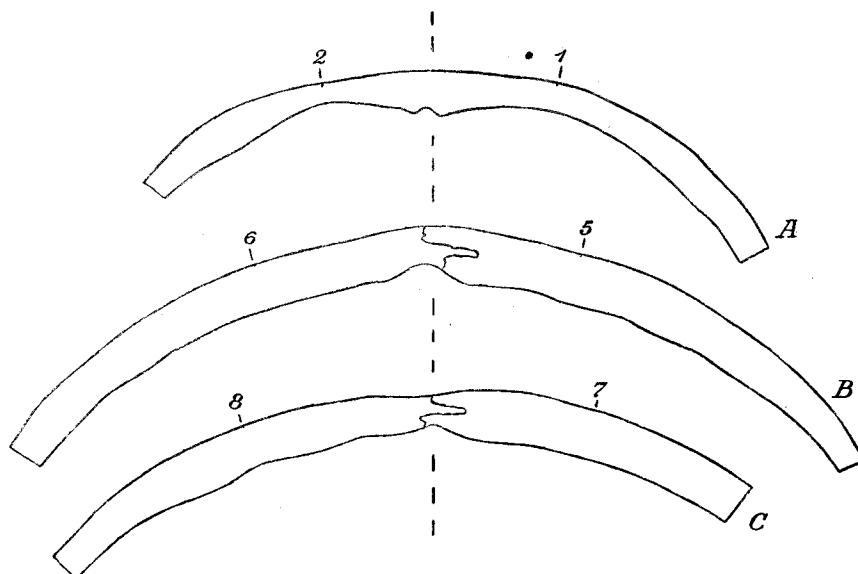


Fig. 14. Schädel III. Senkrechte Durchschnitte durch die Schädelwand, entsprechend den Punkten 1—2, 5—6 und 7—8 der Fig. 13. Die gestrichelte Linie entspricht der Medianebene. Die Pfeilnaht ist durch eine zackige Linie auf den Schnitten B und C angegeben. Etwas verkleinert.

Schädelinnenfläche hier nicht gegen den Binnenraum des Schädels vorspringt, wie dies bei dem Rinnenschädel II der Fall war, sondern vielmehr die bei dem Kielschädel vorkommende Ausbuchtung aufweist. Wahrscheinlich waren hier bei aufrechter Körperhaltung die gegeneinandergedrückten Ränder der Scheitelbeine im Bereich der vorderen zwei Drittel der Pfeilnaht gehoben und im Bereich des hinteren Drittels der Pfeilnaht gesenkt durch eine Drehung der Scheitelbeine um eine horizontale, an der Grenze des hinteren und mittleren Drittels der Naht verlaufende Achse. Als Ursache der Drehung könnten jedoch Entwicklungsstörungen des Gehirns verantwortlich gemacht werden, und unter diesen vielleicht leichte Hydrocephalien, die zugleich auch die Ossifikation der Ränder der Schädelknochen zu verzögern pflegen. Das etwas kurz gehaltene Sektionsprotokoll gibt allerdings in diesem Falle keine entsprechenden Anhaltspunkte. Die vorgetragene Anschauung wird jedoch der Tatsache gerecht, daß diese geringeren Anomalien der Pfeilnahtregion des Schädels anscheinend sehr häufige Befunde darstellen.

Im übrigen erscheint das Schäeldach III durch etwas tiefere *Impressiones digitatae* und etwas höhere *Juga cerebralia* ausgezeichnet. Die Folge ist, daß bei-

nahe an allen Stellen die Krümmungsradien der inneren und der äußeren Schädeloberfläche erhebliche Unterschiede darboten. Unter diesen Umständen waren die Materialspannungen nur nach der oben gegebenen Methode der Mittelzahlen mit Genauigkeit festzustellen. Die Mittelzahlen an sich bieten jedoch weiter kein besonderes Interesse dar. Ich habe daher auf der beigegebenen Tabelle III die Krümmungsradien der äußeren und inneren Fläche des Schädeldaches zusammengestellt, da sich aus diesen — unter Berücksichtigung des Wertes α — die Mittelzahlen jederzeit berechnen lassen. Im übrigen ist die Anordnung der Tabelle III die gleiche wie früher.

Tabelle III.

Schädel III (Salzlösung, Alkohol). Mann, 19 Jahre alt.

d Dicke der Knochensubstanz. α Dicke der äußeren Knochenschicht in Bruchteilen von d . R' annähernd sagittale Hauptkrümmungsradien der Schädelwand. R'' annähernd frontale Hauptkrümmungsradien derselben. s Materialspannung, welche der intrakranielle Flüssigkeitsdruck $i = 0,2034$ g (qmm) erzeugt. P Druck, welcher die mittlere Materialspannung von 2,573 g (qmm) erzeugt.

Punkt der Fig. 13	Ort	d mm	α	R' sagittal Außen-fläche mm	R'' frontal Außen-fläche mm	Innen-fläche mm	Material- span- nung s Gramm pro qmm	Druck P Gramm pro qmm	Bemerkungen
5	Os pariet. d.	5,38	0,55	93	93	94	-180	2,68	
6	Os pariet. sin.	4,59	0,5	66	∞	84	141	2,59	
7	Os pariet. d.	4,61	0,6	64	∞	111	200	2,98	} Juga cerebralia.

Mittelwert der Materialspannung s = 2,753

Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung = 0,14 = 5,0 %.

Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers des Mittelwertes = 0,08 = 2,9 %.

3	Os frontale d.	4,10	0,5	187	178	82	25	1,57	0,356	Impressio-
4	Os frontale sin.	4,38	0,5	129	106	156	44	2,01	0,279	nes
8	Os pariet. sin.	5,04	0,6	66	153	112	25	1,22	0,459	digitatae.
1	Tuber front. d.	3,98	0,5	105	89	52	30	1,40	0,402	
2	Tub. front. sin.	3,20	0,5	85	85	70	13	1,11	0,505	
9	Tub. pariet. d.	3,32	0,57	97	93	62	30	1,80	0,311	
10	Tub. par. sin.	3,72	0,56	93	83	54	20	1,25	0,447	} Druckpole.

In dieser Tabelle III sind zunächst die Materialspannungen s nachgewiesen für die Punkte 5, 6 und 7 der Textfig. 13 und zwar wiederum unter Voraussetzung eines intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes von 15 mm Hg = 0,2034 Gramm für den Quadratmillimeter. Diese Punkte 5, 6 und 7 der Textfig. 13 sind, wie aus Tabelle III hervorgeht, dadurch ausgezeichnet, daß an ihnen die Krümmungsradien der Schädelinnenfläche größer sind als die entsprechenden Krümmungsradien der Schädelaußenfläche. Einer dieser Krümmungsradien ist sogar negativ, bezeichnet somit eine Stelle, an welcher die Schädelinnenfläche nach innen konvex vorspringt. (Vgl. auch Textfig. 14.) Man darf somit annehmen, daß diese drei Punkte ebensovielen Juga cerebralia entsprechen. Die Juga cerebralia aber sind Stellen, welche den die Hirnfurchen ausfüllenden Arachnoidealmaschen anliegen und daher ausschließlich unter dem Drucke der intrakraniellen Flüssigkeit stehen. Demgemäß findet man in diesen Juga cerebralia — unter Voraussetzung eines intra-

kraniellen Druckes von 0,2034 mm — überall Materialspannungen, die so vollkommen miteinander übereinstimmen, als dies in Anbetracht der unvermeidlichen Beobachtungsfehler erwartet werden kann. Als der nach tunlichster Elimination der Beobachtungsfehler in Rechnung zu bringende Wert dieser Materialspannungen ergibt sich sodann mit größter Wahrscheinlichkeit ihr arithmetisches Mittel mit annähernd 2,75 g (qmm).

Dieser Mittelwert ist um 0,07 g kleiner als der für Schädel II gefundene. Der Unterschied liegt unzweifelhaft innerhalb der Grenzen der variablen Fehler, welche obigen Bestimmungen dieser Mittelwerte anhaften. Doch kommen hier zugleich individuelle Verschiedenheiten in Frage, weil ohne Rücksicht auf obige Messungen der Schädel auch auf Grund der einfachen Betrachtung zu den etwas dickwandigeren gerechnet werden darf, jedoch ohne in das pathologische Gebiet zu streifen. Nach dem, was sonst über individuelle Verschiedenheiten bekannt ist¹⁾, darf man wohl annehmen, daß auch der kritische Wert der Materialspannung des Knochengewebes bei verschiedenen Individuen geringe Abweichungen darbietet. Indessen weisen tiefe Impressionen des Gehirns und hohe Juga an der Innenfläche des Schädels auf größere Differenzen zwischen dem intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke und dem Drucke der Hirnwindungen hin. Wenn diese größeren Differenzen auf höheren Druckwirkungen der wachsenden Gehirnwindungen beruhen, muß der Schädel dieses 19jährigen Mannes, gleiche Materialspannung des Knochengewebes vorausgesetzt, für die einfache Betrachtung etwas dickwandiger erscheinen. Man bemerkt, daß diese Fragen erst durch weitere Beobachtungen zu klären sind.

Dazu bietet bereits die Untersuchung der *Impressiones digitatae* dieses Schädels III einige Gelegenheit. In Tabelle III findet man drei solche Impressionen verzeichnet, entsprechend den Punkten 3, 4 und 8. Diese sind zunächst dadurch ausgezeichnet, daß die Krümmungsradien der Schädelinnenfläche erheblich kleiner sind als die Krümmungsradien der Schädelaußenfläche. Sodann findet man, daß der intrakranielle Flüssigkeitsdruck von 0,2034 g (qmm) Materialspannungen s erzeugt, welche wesentlich kleiner sind als der Mittelwert der Materialspannung von 2,753 g (qmm). Letzterer wird, wie aus dem letzten Stabe der Tabelle III hervorgeht, erst erreicht, wenn die Hirnwindungen einen Druck von 0,279 bis 0,459 g (qmm) auf die Schädelwand ausüben. Dabei ist es zugleich ganz charakteristisch, daß dieser Druck für verschiedene Hirnwindungen erhebliche Unterschiede aufweist. Hier ist somit, in Übereinstimmung mit obigen Erörterungen gezeigt, daß in diesem Falle das Hirn offenbar etwas stärkere Druckwirkungen auch außerhalb des Bereiches der *Tubera* auf die Schädelwand ausübte. Außerdem erscheinen in den Gebieten der *Tubera frontalia* und *parietalia* die Druckwirkungen des Gehirns in Tabelle III durchschnittlich etwas größer als auf Tabelle II. Ich darf dies betonen, weil die untersuchten Stellen der *Tubera*

¹⁾ R. Thoma, Untersuchungen über die Größe und das Gewicht der anatomischen Bestandteile des menschlichen Körpers. Leipzig 1882.

gleichfalls zerebralen Impressionen entsprechen, an welchen die Krümmungsradien der Schädelinnenfläche erheblich kleiner sind als die Krümmungsradien der Schädelaußenfläche.

Der in Textfig. 15 wiedergegebene Schädel IV stammt von einem 12jährigen Mädchen. Er kann, wie die früheren als annähernd normal bezeichnet werden, obwohl auch hier die genauere Untersuchung jene, offenbar recht häufig vorkommenden Besonderheiten in der Entwicklung der Stirn- und Pfeilnahtregion aufdeckt, welche oben in Beziehung gebracht wurden zu dem Umstande, daß der

während der Fötalperiode dauernd positive intrakranielle Flüssigkeitsdruck nach der Geburt je nach der Körperhaltung abwechselnd positive und negative Werte annimmt. Während der Perioden negativen intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes geht die sonst bestehende Zugspannung des Schädelgewölbes in eine Druckspannung über. Diese hat zur Folge, daß die medialen Ränder der Stirn- und Scheitelbeine sich gegeneinanderstemmen, woraus sich dann Besonderheiten der Form und Lage der Stirn- und Scheitelbeine ergeben. Die in diesem Sinne zu deutenden Crania sulcata und carinata wurden bereits oben beschrieben. In dem vorliegenden Falle handelt es sich um eine Besonderheit, die man als Spitzbogen-Schädel, Cranium ogivale bezeichnen kann, weil sie an die Spitzbogenform des gotischen Gewölbes erinnert. In dem gegebenen Schädel ist diese Form-eigentümlichkeit am stärksten ausgesprochen im Gebiete der mittleren und vorderen Teile der Pfeilnaht (Textfig. 16). Wenn man hier die Krümmungsradien der äußeren Schädeloberfläche auf frontalen Durchschnitten numerisch bestimmt, bemerkt man, daß die Fortsetzungen der Krümmungslinien der beiden Schädel-

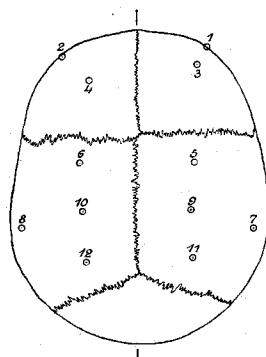


Fig. 15. Schädeldach IV eines 12jährigen Mädchens, von oben betrachtet. Verkleinert 4 : 1. Die numerierten Kreise umgeben die in Tabelle IV genannten Punkte.

Auch hier sind die freihändig eingetragenen Nahtlinien ungenau, weil das Periost großen Teils erhalten war. Todesursache: Tuberkulose der Lungen, des Darms, des Bauchfelles und einiger anderer Organe. Schädeldach in 96 % Alkohol konserviert.

hälften sich in der Mittellinie stumpfwinkelig durchkreuzen, wie dies in Textfig. 16 angedeutet ist. Der zwischen diesen Krümmungslinien entstehende scharfe First ist allerdings am Schädel etwas abgerundet und infolgedessen nicht sehr auffällig. Im Gebiete der hinteren Abschnitte der Pfeilnaht geht aber das Cranium ogivale in diesem Falle in ein Cranium sulcatum über, während in den vordersten Teilen der Stirnnahtregion hier die Form des Cranium carinatum getroffen wird, wie in Textfig. 15, vielleicht etwas zu auffällig, zu bemerken ist. In der Tat werden die hier in Rede stehenden drei Form-eigentümlichkeiten, was bei der Art ihrer Entstehung leicht begreiflich ist, nicht nur überhaupt häufig sondern offenbar auch häufig vereint an dem gleichen Schädel getroffen. Man wird daher, wenn sich diese Form-eigentümlichkeiten — wie bei Schädel IV — in engen Grenzen

halten, wahrscheinlich nicht an pathologische Störungen zu denken haben. Wohl aber bieten diese Besonderheiten den Schlüssel zu der Erklärung gewisser, unzweifhaft pathologischer Formen des Cranium carinatum, sulcatum und ogivale und schließen sich mit einer etwas abweichenden Pathogenese enge an die ogivale Schädelform, welche ich in Verbindung mit kongenitaler sagittaler Synostose in der mehrfach erwähnten Abhandlung beschrieben habe. Sie sind deshalb auch der Aufmerksamkeit der Kinderärzte dringend zu empfehlen.

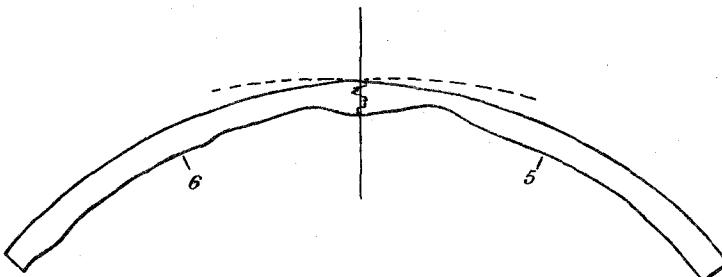


Fig. 16. Schädel IV. Cranium ogivale. Frontaler Durchschnitt des Schädeldaches durch die Punkte 5 und 6 der Fig. 15. Etwas verkleinert. Die senkrechte Linie entspricht der Medianebene.

Die mechanische Untersuchung des Schädeldaches IV ist in der folgenden Tabelle IV enthalten.

Tabelle IV.

Schädel IV (Alkoholhärtung). Mädchen, 12 Jahre alt.

d Dicke der Knochensubstanz. *a* Dicke der äußeren Knochenschicht in Bruchteilen von *d*. *R'* annähernd sagittale Hauptkrümmungsradien der Schädelwand. *R''* annähernd frontale Hauptkrümmungsradien derselben. *s* Materialspannung, welche der intrakranielle Flüssigkeitsdruck *i* = 0,2034 g (qmm) erzeugt. *P* Druck, welcher die mittlere Materialspannung von 3,10 g (qmm) erzeugt.

Punkt der Fig. 15	Ort	<i>d</i> mm	<i>a</i>	<i>R'</i> sagittal Außen-fläche mm	<i>R''</i> frontal Innen-fläche mm	<i>R''</i> frontal Außen-fläche mm	<i>R''</i> frontal Innen-fläche mm	Material- spannung <i>s</i> Gramm pro qmm	Druck <i>P</i> Gramm pro qmm	Bemerkungen
4	Os front. sin.	3,52	0,5	102	41	92	-104	3,26	—	Jugum cerebr.
5	Os pariet. d.	3,68	0,5	220	165	88	74	3,11	—	
6	Os pariet. sin.	3,94	0,5	∞	109	83	61	2,74	—	
9	Os pariet. d.	3,47	0,5	70	∞	44	-180	3,73	—	Jugum cerebr.
10	Os pariet. sin.	3,32	0,5	98	94	82	99	2,85	—	
11	Os pariet. d.	3,80	0,51	56	-145	63	120	2,99	—	Jugum cerebr.
12	Os pariet. sin.	4,02	0,5	58	-40	58	42	3,04	—	

Mittelwert der Materialspannung *s* = 3,10

Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung = 0,22 = 7,1 %.

Wahrscheinl. Wert des variablen Fehlers des Mittelwertes = 0,08 = 2,6 %.

3	Os front. d.	3,40	0,52	112	84	81	51	2,28	0,277	Impressio digitata.
1	Tub. front. d.	3,13	0,56	31	49	43	12	1,49	0,424	
2	Tub. front. s.	3,33	0,53	46	37	38	15	0,88	0,717	
7	Tub. pariet. d.	3,04	0,53	46	46	41	33	1,37	0,460	
8	Tub. pariet. s.	2,96	0,52	66	49	44	33	1,56	0,405	Druckpole.

Diese Tabelle ergibt für die Stellen, an welchen die intrakranielle Flüssigkeit an die Schädelwand drückte, eine Materialspannung von durchschnittlich 3,1 Gramm für den Quadratmillimeter, vorausgesetzt, daß man wieder, wie früher, einen intrakraniellen Flüssigkeitsdruck von 0,2034 g (qmm) = 15 mm Hg in Rechnung bringt. Im Vergleiche mit den früheren Ergebnissen erscheint diese Materialspannung etwas hoch. Doch hängt dies aller Wahrscheinlichkeit nach nur mit dem Umstände zusammen, daß für das 12jährige Mädchen der intrakranielle Flüssigkeitsdruck etwas zu hoch bemessen wurde. Nach den früheren Darlegungen ist der Druck des Liquor cerebrospinalis bei Kindern wesentlich niedriger als bei Erwachsenen. Bei letzteren betrug er ungefähr \pm 15 mm Hg, während er im dritten Lebensjahre ungefähr gleich \pm 9 mm Hg und zur Zeit der Geburt ungefähr gleich 7 mm Hg gefunden wurde. Für zwölfjährige Kinder könnte er daher auf annähernd \pm 13 mm Hg geschätzt werden. Ein Druck von 13 mm Hg ist jedoch annähernd gleich 0,176 g (qmm). Führt man diesen Wert für den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck in die Tabelle IV ein, so wird der Mittelwert der Materialspannung für das Schädeldach des 12jährigen Mädchens gleich 2,68 g (qmm). Diese Zahl dürfte der Wahrheit ziemlich nahe kommen. Wenn sie aber etwas kleiner ist als der Mittelwert für die Materialspannung des erwachsenen Knochens, so ist dies nur ein weiteres Argument für ihre Richtigkeit. Denn man darf wohl vermuten, daß der weichere, an organischer Substanz reichere, an Kalksalzen ärmere Knochen des Kindes etwas geringeren Materialspannungen unterworfen ist als der feste, kalkreiche Knochen des Erwachsenen.

In gleicher Weise wie der Mittelwert der Materialspannung erfahren sodann auch die Materialspannungen s an den Impressionen und Druckpolen eine Ermäßigung, wenn man an diesen Stellen den ermäßigten intrakraniellen Flüssigkeitsdruck in Anrechnung bringt. Dabei wird jedoch keine weitere Erkenntnis erzielt, da diese Stellen unzweifelhaft unter dem Drucke des wachsenden Gehirns stehen. Dagegen ist es von Interesse, daß der Wert P , welcher den Druck des Gehirns anzeigt, gleichfalls kleiner wird, wenn man an den Impressionen und Druckpolen nur eine Materialspannung von 2,68 g (qmm.) in der Schädelwand voraussetzt. Namentlich am Tuber frontale sin., an welchem in der Tabelle IV der Hirndruck P den auffällig hohen Wert von 0,717 g (qmm) erreicht, wird dieser Wert auf 0,620 g (qmm) ermäßigt. Dies aber ist von Bedeutung, da ein Hirndruck von 0,717 g (qmm) doch wohl für die Funktion des Gehirns bedenklich sein könnte.

Zugleich erkennt man, daß die hier vorgelegten Messungen der Krümmungsradien und Knochendicken ihren Wert auch dann behalten, wenn später genauere Anhaltspunkte über die Höhe des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes gewonnen werden. Druck und Materialspannung sind, wenn die Krümmungsradien und die Dicken der Schädelwand feststehen, einander proportional, so daß auch die Mittelwerte der Materialspannung mit einer einfachen Rechnung korrigiert werden können, wenn die weitere Untersuchung andere Werte für den intrakraniellen

Flüssigkeitsdruck ergeben. Strenge genommen können die hier vertretenen Auffassungen der Histogenese des Schädeldaches und sämtliche hier gezogene Schlußfolgerungen auch dann aufrecht erhalten werden, wenn die vorliegenden numerischen Bestimmungen des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes erhebliche Fehler und Ungenauigkeiten enthalten. Wie hoch auch der intrakranielle Flüssigkeitsdruck genommen wird, immer bleibt die Tatsache bestehen, daß gleiche Materialspannungen an den verschiedenen Teilen der Schädelwand nur möglich sind, wenn an bestimmten Stellen das Hirn einen innerhalb mäßiger Grenzen sich haltenden Druck auf die Schädelinnenfläche ausübt, welcher etwas höher ist als der intrakranielle Flüssigkeitsdruck. Und ebenso kann es als ein gesichertes Ergebnis angesehen werden, daß die Einzelheiten der allgemeinen Form der Schädelkapsel und der Gestaltung der inneren und äußeren Glastafel histomechanisch durch das Zusammenwirken des Gehirns und des Liquor cerebrospinalis bestimmt wird. Nur die numerischen Werte der Materialspannungen der knöchernen Schädelkapsel und der Druckwirkungen des Gehirns werden andere, wenn für den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck andere Werte in Anrechnung zu bringen sind. Dieses aber bleibt für die allgemeinen Ergebnisse vorliegender Untersuchung ohne wesentliche Bedeutung.

Bei der weiteren Prüfung der Tabelle IV macht es sich sodann bemerklich, daß in derselben der wahrscheinliche Wert des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung verhältnismäßig groß erscheint. Dieser aber ändert sich nicht in nennenswerter Weise, wenn man einen etwas geringeren Wert für den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck in Rechnung bringt. Vielmehr muß man annehmen, daß die einzelnen Beobachtungen verhältnismäßig weniger genau ausgefallen sind, obwohl mit derselben Sorgfalt wie früher vorgegangen wurde. Die geringere Genauigkeit dürfte in der Tat nur Folge des Umstandes sein, daß der Schädel IV verhältnismäßig tiefe und zahlreiche Impressionen von seiten des Gehirns und relativ hohe Juga aufwies. In diesem Falle kann man der gestellten Aufgabe in vollkommener Weise nur gerecht werden, wenn man die Messungen auf diejenigen Punkte beschränkt, an welchen eine Linie, welche senkrecht auf der Schädelaußenfläche steht, zugleich auch die Schädelinnenfläche in rechten Winkeln schneidet. Diese Punkte entsprechen zumeist den tiefsten Einsenkungen der Impressionen und den Firsten der Juga. Bei der Vermessung des Schädels IV wurde offenbar diesem Umstande nicht gebührend Rechnung getragen, so daß viele Messungen auf Stellen trafen, welche obigen Anforderungen nicht völlig entsprachen. Die Folge ist eine Erhöhung der variablen Beobachtungsfehler. Die Bestimmung des Mittelwertes der Materialspannung scheint dagegen nicht von wesentlich geringerer Genauigkeit zu sein, weil die Zahl der hierzu verwendbaren Beobachtungen eine etwas größere war.

Indessen darf man sich bei der Beurteilung des Wertes solcher Beobachtungen nicht ausschließlich auf die Ergebnisse der Wahrscheinlichkeitsrechnung verlassen, weil diese nur über die variablen Fehler ein Urteil gestattet. Ich möchte daher die Gelegenheit ergreifen, an dieser Stelle nochmals auf die Kritik der hier in Betracht kommenden Beobachtungsfehler und Beobachtungsmethoden einzugehen, weil diese nach den bisher gewonnenen Erfahrungen jetzt etwas vollkommener durchführbar erscheint. Dabei aber lasse ich die Bestimmung der Dicke d der Schädelwand gänzlich außer Betracht. Sie wurde bereits früher ausführlicher kritisiert, und die bis jetzt gegebenen Beobachtungen haben gezeigt, daß sie ungleich genauer und sicherer durchführbar ist als die Bestimmung der Größe der Krümmungsradien, welche die Hauptschwierigkeit solcher Untersuchungen darstellt.

Die krummen Linien, welche auf jedem senkrechten Durchschnitte der Schädelwand die äußere und die innere Fläche der letzteren bezeichnen, ändern von Stelle zu Stelle ihre Krümmungsradien und zwar nicht selten in erheblichem Maße. Dem ungeachtet könnten für jede einzelne Stelle die Krümmungsradien mit Hilfe des Ophthalmometers sehr genau bestimmt werden, wenn die äußere und die innere Schädelwand spiegelnd glatt wären. Dies ist nicht der Fall. Allein wenn auch die Anwendung des Ophthalmometers möglich wäre, würde sie ungeachtet ihrer Zuverlässigkeit keine durchaus brauchbaren Ergebnisse liefern, weil die Krümmungen

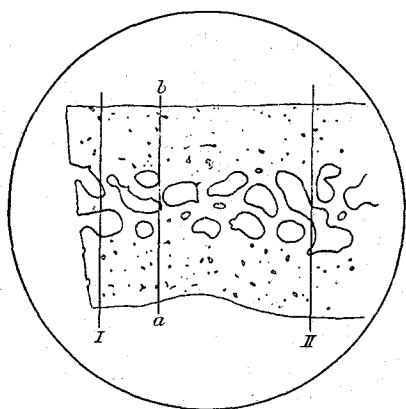


Fig. 17. Schädel IV. Sagittaler Dünnschliff durch den Punkt 6 mit einem Sulcus arteriosus. Vergr. annähernd 5,4.

Die geraden Linien I und II begrenzen das Gebiet des Dünnschliffes, welches zu der Bestimmung der Größe d verwendet wurde, während der Durchmesser des Präparates in der Richtung der Linie ab zu der Bestimmung der Vergrößerung diente. Der Kreis zeigt den Rand des Gesichtsfeldes an, da die Randzone des letzteren bei Messungen — ohne besondere Vorsichtsmaßregeln — nicht benutzt werden dürfen.

der äußeren und namentlich auch der inneren Schädelfläche noch von anderen Faktoren beeinflußt werden, von denen bisher noch nicht die Rede war.

Um ein Beispiel einer derartigen Beeinflussung zu geben, will ich zunächst die Spannungs- und Druckverhältnisse im Grunde eines Sulcus arteriosus der inneren Schädelfläche prüfen. Auf dem sagittalen Knochenschliffe durch den Punkt 6 des Schädels IV ist ein solcher Sulcus arteriosus gegeben, der sehr nahezu im rechten Winkel durchschnitten sein dürfte. Der Rand des Sulcus ist, wie Textfig. 17 zeigt, abgerundet. In seinem Grunde aber findet man bei 20,36facher Vergrößerung einen Krümmungsradius von annähernd genau 70 mm. Derselbe beträgt somit in Wirklichkeit, wenn die Vergrößerung in Rechnung gezogen wird, 3,438 mm. Nimmt man sodann an, daß die Arterie im übrigen der inneren Schädel-

fläche parallel verlief, so ist für den Boden des Sulcus der eine Krümmungsradius gleich 3,438 mm und der andere nach Tabelle IV gleich 61 mm. Für die Schädelaußenfläche aber kommen nach der gleichen Tabelle die Krümmungsradien ∞ und 83 mm in Rechnung. Setzt man außerdem nach der gleichen Tabelle $d = 3,94$, ferner $\alpha = 0,5$ und $s = 2,74$, so findet man den Druck $P = 1,72$ g (qmm) gleich 127 mm Hg. Der Druck am Boden des Sulcus arteriosus war somit in der Ausdehnung, in welcher die Arterie dem Knochen anlag, nur wenig kleiner als der arterielle Blutdruck. Man erkennt, daß der Bestand des Sulcus arteriosus eine erhebliche Druckwirkung auf die Schädelwand voraussetzt. Dieser Druck aber dürfte aus dem Seitenschub hervorgehen, welchen die parallel der inneren Schädelwand gekrümmte Arterie auf ihre Umgebung ausübt¹⁾.

Es hätte wohl nicht dieses Aufgebotes sorgfältiger Untersuchung bedurft, um zu zeigen, daß man die Krümmungsradien am Boden der Sulci arteriosi nicht verwenden darf, wenn man die von dem Liquor cerebrospinalis und von dem Gehirn erzeugten Materialspannungen zu prüfen beabsichtigt. Indessen erschien es wichtig, an diesem Beispiele anschaulich zu machen, wie das Knochengewebe auf jede Größe, welche der auf ihm lastende Druck annehmen kann, in gesetzmäßiger Weise reagiert. Deutlicher wird dies noch, wenn man Stearinausgüsse des mazierierten und getrockneten Schädels betrachtet und sich davon überzeugt, daß die Schädelinnenfläche nicht nur die Formen der von den Hirnhäuten bedeckten Hirnwundungen, sondern sogar vieles von den Strukturen der harten Hirnhaut wieder gibt. In der Tat ist die Schädelinnenfläche nur aus dem Grunde nicht spiegelnd glatt, weil jede Bindegewebefaser der Dura, welche der Schädelwand entlang läuft, eine Spur im Knochen erzeugt. Und was von der Innenfläche gilt, ist auch für die Außenfläche des Schädels und ihre Beziehungen zu dem Periosteum externum maßgebend. Außerdem aber bemerkte man an der Oberfläche der Stearinausgüsse, wie an der Innen- und Außenfläche der Schädelwand fast überall noch flache Unebenheiten, welche offenbar anderen Ursprungen sind.

Die Formen der inneren und äußeren Glastafel der Schädelwand wurden oben verglichen mit den Formen zweier gespannter Membranen, deren Zwischenraum mit einer Flüssigkeit, Wasser oder Luft gefüllt ist. Der Vergleich war nur in einem Punkte nicht völlig durchführbar. Der Ausgleich zwischen den Spannungen der beiden Membranen wird in dem einen Falle in kontinuierlicher Weise herbeigeführt durch die zwischen den beiden Membranen befindliche Flüssigkeit,

¹⁾ Damit würde zugleich die Entwicklung einer Längsspannung in der Arterienwand mehr oder weniger vollständig verhindert werden. Wenn man sodann annimmt, daß sämtliche an den Verzweigungsstellen und Krümmungen der arteriellen Bahn auftretenden Längsspannungen der Wand jeweils an Ort und Stelle auf die Umgebung abgeleitet werden, so erhält man ein Arteriensystem, in welchem alle Längsspannungen der Arterienwand fehlen, soweit diese nicht unvermeidliche Folge der Änderungen der Länge der Arterien sind, welche bei verschiedenen Gelenkstellungen eintreten. Es scheint nicht unwahrscheinlich, daß diese Anordnung der Wirklichkeit annähernd entspricht. Indessen fehlt eine sorgfältigere Beweisführung.

welche an allen Stellen den gleichen Druck aufweist. In der Schädelwand dagegen wird ein bestimmter Teil des auf der Innenfläche lastenden Druckes durch die Spongiosabalken von der Eburnea interna auf die Eburnea externa übertragen. Diese Übertragung ist notwendigerweise eine diskontinuierliche, da sie nur durch die Spongiosabalken vermittelt wird. Dieser Umstand macht sich sowohl an der inneren als an der äußeren Fläche des Schädels bemerklich durch eine leicht wellige Beschaffenheit dieser Oberflächen, welche die numerische Bestimmung der Krümmungsradien nicht unerheblich erschwert.

Endlich habe ich den Eindruck gewonnen, daß neben diesen aus der diskontinuierlichen Druckübertragung hervorgehenden kleinen Unregelmäßigkeiten noch geringe Ausbauchungen der Eburnea externa vorkommen an Stellen, welchen an der Innenfläche hohe Juga cerebralia oder tiefe Impressionen entsprechen. Zum Teil scheinen dies jene Höcker zu sein, auf welche die Lehren der Phrenologie aufgebaut waren. Sie sind indessen auf dem Schädeldurchschnitte im allgemeinen schwer zu erkennen, wenn man nicht, wie dies hier geschah, die Krümmungsradien sorgfältigen Messungen unterzieht.

Diese verschiedenartigen Einflüsse, unter welchen die Gestaltung der inneren und äußeren Schädeloberfläche steht, erklären die Schwierigkeiten, denen man begegnet, wenn man den Versuch macht, mit dem Zirkel oder mit andern Hilfsmitteln die Krümmungsradien der beiden Schädelflächen zu bestimmen. Manche Krümmungen, wie z. B. die in Textfig. 17 gezeichnete Gefäßfurche, ferner die den Struktureinzelheiten entsprechenden Unebenheiten der Schädelflächen und viele auf Diskontinuität der Druckübertragung beruhende Ungleichmäßigkeiten wird man unberücksichtigt lassen müssen, wenn man die von dem Hirn und dem Liquor cerebrospinalis erzeugten Spannungen studieren will. Dagegen hat man die über den Juga und Impressionen stehenden Ausbauchungen der äußeren Schädelfläche mit in Rechnung zu bringen, wenn sie nicht auf Diskontinuität der Druckübertragung beruhen, was allerdings nicht immer mit Bestimmtheit erkannt werden kann. Man darf daher wohl sagen, daß bei der praktischen Ausführung der Messungen nicht selten Unsicherheiten bestehen bleiben, welche auf verschiedenen Möglichkeiten der Auffassung gegebener Formen beruhen. Endlich ist es überhaupt sehr schwierig, die Krümmungsradien einer Kurve, deren Krümmung sich häufig ändert, mit Zirkel und Maßstab zu messen, da man von vornherein niemals weiß, in wie großer Ausdehnung die Kurve den von der Zirkelspitze beschriebenen Kreisbogen decken muß. Allgemein kann man allerdings sagen, diese Deckung muß soweit, als es erreichbar ist, stattfinden. Allein die kleinen Unregelmäßigkeiten des Kurvenverlaufes, die nicht in Rechnung kommen sollen, stehen der Ausführung dieser Vorschrift sehr erheblich im Wege.

Im allgemeinen ist es bei der Bestimmung der Krümmungsradien der Schädelwand nur durch ein sehr sorgfältiges Studium der einzelnen, in Untersuchung genommenen Stellen möglich, zum Ziele zu kommen, wobei man sich nicht selten über verschiedene Auffassungen der gegebenen Formen Rechenschaft zu geben hat.

Die hier tabellarisch zusammengestellten Messungsresultate können daher nur als Interpretationen der beobachteten Formgestaltungen angesehen werden, bei welchen histomechanische Gesichtspunkte zum Ausgangspunkt dienten. Indessen ergab sich bei der Ausführung dieser Messungen die befriedigende Wahrnehmung, daß die errechneten Spannungen um so geringere Abweichungen darboten, je genauer die von der Zirkelspitze beschriebenen Kreisbögen mit den Krümmungslinien der Schädelwand zusammenfielen.

Das Schädel a ch V, von einem elfjährigen Knaben herrührend, war durch ungewöhnlich tiefe Impressionen und hohe Juga ausgezeichnet, welche einem sehr windungsreichen Gehirn entsprachen. Es bot die erwünschte Gelegenheit, die vorgetragenen Anschauungen an einem Falle zu prüfen, der anscheinend extreme Verhältnisse darbot. Dies machte sich unter anderem auch durch den Umstand bemerklich, daß die früher besprochene Methode der Bestimmung der Krümmungsradien wenigstens an der Schädelinnenfläche einer nicht geringen Schwierigkeit begegnete. Wenn es verhältnismäßig einfach ist, in der Mitte eines senkrechten Durchschnittes einer gegebenen Stelle der Schädelwand den Krümmungsradius in der früher beschriebenen Weise zu finden, so wird das Verfahren bei kleinen, sich von Stelle zu Stelle rasch ändernden Krümmungsradien doch recht unsicher, wenn man nun einen zweiten Durchschnitt senkrecht zu dem ersten herstellt und an den sich ergebenden Stücken zu messen beginnt. Ich habe mich daher veranlaßt gesehen, bei diesem Schädel ein Verfahren regelmäßig anzuwenden, welches bei den früher beschriebenen Schädeln nur gelegentlich an schwierigeren Stellen zur Anwendung kam.

Vor allem erscheint es wichtig, die kleinen Krümmungsradien der Juga und Impressionen genau zu messen. Zu diesem Zwecke wird zunächst an der Schädelinnenfläche die Mitte einiger Juga und Impressionen mit kleinen Punkten bezeichnet, welche am besten mit dem Pinsel und chinesischer Tusche ausgeführt werden. Diese Punkte wähle ich so, daß ihre Verbindungslinie ein Jugum senkrecht zu seiner Verlaufsrichtung kreuzte. Dann stellte ich eine große Zahl von Papierschablonen von Kreisbögen her, deren Radius von 6 bis 250 mm variierte. Wenn man solche Papierschablonen senkrecht zu der Knochenfläche aufstellt, kann man bei guter, seitlich einfallender Beleuchtung den Grad der Oskulierung der Knochenoberfläche und der Papierschablone zumeist ziemlich gut beurteilen und damit die Krümmungsradien der Schädelinnenfläche zwar nicht mit großer Genauigkeit, aber in der Regel ohne gröbere Fehler feststellen.

Sodann brachte ich an der Schädelinnenfläche in der Richtung der oben genannten Verbindungslinie einige weitere, etwa 2 cm von den Punkten abstehende Marken an. An diesen Marken durchbohrte ich mit Hilfe eines feinen Spiralbohrers die Schädelwand in senkrechter Richtung und erhielt dadurch die Mittel, die zur Untersuchung bestimmten Punkte auch an der äußeren Schädelfläche zu finden. Das Verfahren erscheint im allgemeinen als ausreichend genau, da die Krümmungsradien der Schädelaußenfläche sich von Stelle zu Stelle nur wenig ändern. Somit war ich in der Lage, auch die äußeren Krümmungsradien der Schädelwand an den gewählten Punkten mit Hilfe der Papierschablonen zu messen.

Nachdem diese erste Messung beendigt war, wurde die Schädelwand in der Richtung der Verbindungslinie der zu untersuchenden Punkte der Schädelwand, senkrecht zu der Oberfläche der letzteren, durchsägt. Bei sorgfältigem Verfahren schneidet diese Sägefläche die Juga senkrecht zu ihrer Verlaufsrichtung und trifft zugleich die Mitte der Impressionen. Man kann dann mit Hilfe des früher beschriebenen Verfahrens Bleistiftumrisse des Schädeldurchschnittes herstellen

und die Krümmungsradien mit Zirkel und Maßstab ausmessen. Dabei ergeben sich zuweilen einige Abweichungen, die man sofort nach den früher gegebenen Gesichtspunkten prüfen wird, um nötigenfalls Korrekturen vorzunehmen. In der Regel schien es jedoch nicht von Bedeutung zu sein, noch weitere Sägeflächen durch die zu untersuchenden Punkte der Schädeloberflächen zu legen, da diese, wie früher erwähnt, bei den kleinen Krümmungsradien der Schädelinnenfläche nur wenig zuverlässige Resultate ergeben, während die Krümmungsradien der Schädelaußenfläche mit Hilfe der Papiermodelle ausreichend genau bestimmt erscheinen.

Nach diesen Vorbereitungen wurden nun Dünnschliffe an den gegebenen Sägeflächen hergestellt. Diese können, wenn sie in befriedigender Weise senkrecht zu den Schädelflächen stehen, zu einer erneuten Kontrolle der Krümmungsradien dienen. Man legt die mit Methylenblau gefärbten, in Kanadabalsam eingeschlossenen Dünnschliffe auf ein System konzentrischer Kreise von bekanntem Radius (Textfig. 18), und zwar in der Weise, daß der Dünnschliff nur durch das dünne Deckglas von der Papierfläche getrennt ist. Durch Verschieben des Präparates kann man

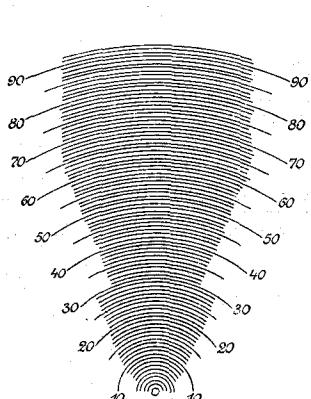


Fig. 18.

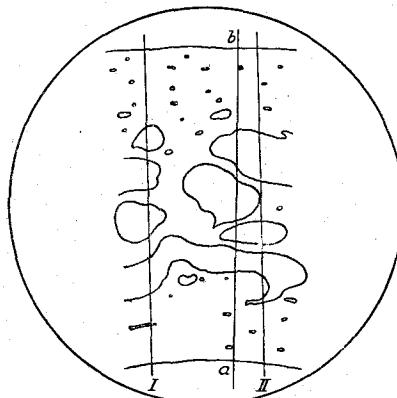


Fig. 19.

Fig. 18. System von konzentrischen Kreisen zur Messung von Krümmungsradien an fertigen Kanadabalsampräparaten. Halbe natürliche Größe. — Die Kreise von 98 bis 250 mm Radius, bei welchen das Intervall allmählich auf 10 mm anstieg, sind hier der Raumersparnis halber nicht abgebildet.

Fig. 19. Schema für eine Messung der Größe d an stark gewölbten Stellen der Schädelwand. Die geraden Linien I und II begrenzen das Gebiet des Dünnschliffes, welches zu der Bestimmung der Größe d verwendet wird, während der Durchmesser des Präparates in der Linie ab zu der Bestimmung der Vergrößerung diente. Der Kreis zeigt den Rand des Gesichtsfeldes an.

sodann die scharf hervortretenden Ränder des Dünnschliffes mit einem der Kreise zur Deckung bringen, wobei man sich zweckmäßigerweise einer guten Lupe bedient. Diese Methode gibt sehr gute Resultate, doch wird man in der Regel Krümmungsradien, die kleiner als 5 mm sind, genauer finden können, wenn man die Dünnschliffe bei sorgfältig bestimmter Vergrößerung mit der Camera lucida zeichnet und dann mit dem Zirkel nachmisst. Im ganzen aber führen diese Methoden zu relativ zuverlässigen Ergebnissen.

Es fehlt dann noch die Bestimmung der Dicke d der Schädelwand, welche mit den früher besprochenen Hilfsmitteln durchgeführt wird. Dabei pflegt es — namentlich wenn keine Diploë vorhanden ist — vorteilhaft zu sein, in Anbetracht der raschen Änderungen, welche d von Stelle zu Stelle erleidet, nur schmale Ausschnitte der Schädelwand zu der Messung dieser Größe zu benutzen (Textfig. 19). Solche schmale Ausschnitte können dann bis in die peripheren Teile des Gesichtsfeldes der Camera lucida reichen, vorausgesetzt, daß man der Bestimmung der Vergrößerung was sich auch sonst immer empfiehlt, die Messung eines ganzen Dickendurchmessers ($a b$ auf Textfig. 19) zugrunde legt. Dieser Durchmesser wird bei dem in Rede stehenden Verfahren in der Regel

nicht genau senkrecht zu der inneren und äußeren Oberfläche des Schädels stehen (Textfig. 19). Denn wenn man ihn bei der Mikrometermessung am Präparate wiederfinden will, muß seine Lage etwa durch die Ränder zweier Gefäßlücken (Textfig. 19) etwas genauer bestimmt sein.

Bei diesem Verfahren kann indessen die Dicke d für die Höhe der Juga mit Sicherheit nur auf solchen Dünnschliffen richtig gemessen werden, welche wie die obengenannten senkrecht zu der Verlaufsrichtung der Juga stehen. Und in gleicher Weise ist bei tiefen Impressionen die Dicke d in befriedigender Weise nur auf solchen Dünnschliffen zu messen, welche sich über die ganze Impression erstrecken. Denn nur auf solchen Schnitten gelingt es, mit Sicherheit die höchste Stelle des Jugum und die tiefste Stelle der Impression zu finden. Es erschien daher für die vorliegenden Zwecke ausreichend, wenn für jeden untersuchten Punkt der Schädelwand nur ein vollgeeigneter Dünnschliff für die Bestimmung der Dicke d Verwendung fand.

Mit Hilfe dieser den besonderen Verhältnissen angepaßten Methoden wurden die in Tabelle V enthaltenen Messungsresultate erzielt.

Tabelle V. Schädel V (Alkoholhärtung). Knabe, 11 Jahre alt.
Tiefe Impressionen.

d Dicke der Knochensubstanz. α Dicke der äußeren Knochenschichten in Bruchteilen von d . R' annähernd sagittale Krümmungsradien der Schädelwand. R'' annähernd frontale Krümmungsradien derselben. s Materialspannung bei dem intrakraniellen Flüssigkeitsdrucke $i = 0,2034 \text{ g (qmm)}$ P Druck, welcher die mittlere Materialspannung von $3,472 \text{ g (qmm)}$ erzeugt. φ Krümmungsradius, welcher an Stelle des negativen Krümmungsradius eingesetzt werden muß, damit die mittlere Materialspannung von $3,472 \text{ g (qmm)}$ eintritt.

Punkt der Fig. 20	Ort	d mm	α	R' sagittal		R'' frontal		Spannung s Gramm pro qmm	Druck P Gramm pro qmm	Radius φ mm	Bemerkungen
				Außen-fläche mm	Innen-fläche mm	Außen-fläche mm	Innen-fläche mm				
Impressiones.											
10	Os pariet. sin.	2,92	0,53	52	15	110	13	0,844	0,837	—	nahe Tub. par.s.
26	Os front. sin.	3,34	0,5	90	18	93	20	0,957	0,738	—	
17	Os front. dext.	1,82	0,5	86	18	48	7	0,968	0,709	—	nahe Tub. fr. d.
18	Os front. sin.	2,63	0,5	56	30	71	12	1,04	0,678	—	
14	Os front. sin.	2,98	0,5	66	42	134	14	1,16	0,610	—	
7	Os par. dext.	2,49	0,6	63	14	34	30	1,18	0,597	—	nahe Tub. par.d.
4	Os par. sin.	3,12	0,5	65	60	90	15	1,19	0,594	—	
22	Os front. sin.	3,35	0,5	75	33	72	25	1,24	0,568	—	
30	Os front. sin.	1,65	0,5	140	20	62	9	1,34	0,529	—	nahe Tub. fr. s.
3	Os pariet. d.	3,05	0,5	54	75	92	18	1,36	0,521	—	
13	Os front. d.	2,97	0,5	80	24	140	12	1,97	0,359	—	
Juga.											
20	Os front. sin.	3,38	0,5	74	74	58	—220	3,03	—	—	
2	Os par. sin.	4,02	0,5	57	135	64	—134	3,06	—	—	
6	Os par. sin.	4,50	0,55	44	—25	26	—180	3,44	—	—	
1	Os par. dext.	3,68	0,5	75	90	85	—180	3,61	—	—	
15	Os front. dext.	3,26	0,5	74	44	60	—50	3,80	—	—	
16	Os front. sin.	3,14	0,5	50	48	44	—33	3,90	—	—	

Mittelwert der Materialspannung in vorstehenden sechs Juga ¹⁾ = $s = 3,472 \text{ g (qmm)}$

Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung = $0,25 \text{ g (qmm)} = 7\%$

Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers des Mittelwertes = $0,10 \text{ g (qmm)} = 3\%$.

11	Os front. dext.	3,42	0,5	80	50	89	—36	7,46	—	—106	
5	Os pariet. dext.	3,42	0,5	52	—16	39	46	28,9	—	—31	
24	Os front. sin.	3,75	0,46	86	130	68	—34	140	—	—828	
12	Os front. sin.	3,65	0,5	66	89	∞	—37	—174	—	+ 175	
8	Os par. sin.	3,42	0,5	50	50	230	—16	—6,54	—	—99	
28	Os front. sin.	3,03	0,5	100	50	120	—6	—1,05	—	+ 2627	
19	Os front. dext.	3,30	0,5	40	—3	44	14	—0,58	—	—12	

¹⁾ Zuverlässiger erscheint es, die mittlere Materialspannung nur aus den beiden flachen Juga 20 und 2 zu errechnen, welche sich alsdann gleich $3,05 \text{ g (qmm)}$ ergibt.

Die Lage der untersuchten Punkte der Schädelwand ergibt sich aus Textfig. 20. In der Tabelle V aber sind die einzelnen Beobachtungen geordnet nach steigenden Werten der sich rechnungsmäßig ergebenden Spannung s . Demgemäß trifft man zunächst 11 Beobachtungen, welche sich auf Impressionen beziehen, und dann 13 Beobachtungen an zerebralen Juga. Unter den Juga weisen die ersten 6 Beobachtungen Spannungen zwischen 3 und 4 g auf. Man überzeugt sich leicht davon, daß diese flacheren Juga entsprechen, und aus ihnen kann man als Mittel der Materialspannung den Wert von 3,47 g ableiten. Die steileren, höheren Juga, auf welche sich die 7 letzten Beobachtungen der Tabelle V beziehen, bedürfen dagegen einer besonderen Besprechung.

Die sieben letzten in Tabelle V enthaltenen Beobachtungen führen zu Materialspannungen von rasch zunehmender Größe, die schließlich negativ werden, um sodann als negative Größen wieder abzunehmen. Diese Erscheinung ist Folge des Umstandes, daß die mit negativem Vorzeichen versehenen Krümmungsradien immer kleiner werden. Beachtet man, daß die Spannung s gefunden wird aus der früher abgeleiteten Gleichung (19), welche vollständig ausgeschrieben lautet:

$$s = \frac{i}{d} \left[\frac{\alpha}{R_1} + \frac{1-\alpha}{r_1} + \frac{\alpha}{R_2} + \frac{1-\alpha}{r_2} \right]$$

so erkennt man, daß bei abnehmender Größe des mit negativem Vorzeichen versehenen Krümmungsradius eines Jugum die Spannung s immer größer werden muß, bis sie unendlich groß wird. Dies gilt wenigstens für die am menschlichen Schädel beobachteten Dimensionen. Bei weiterer Abnahme des genannten negativen Krümmungsradius ergeben sich dann zunächst sehr große negative Werte von s , die allmählich immer kleiner und schließlich sehr klein werden.

Indessen ist es klar, daß derartige Spannungen nicht tatsächlich vorkommen, zumal da man auch Grund hat zu der Vermutung, daß das Knochengewebe bei hohen Spannungen der Resorption unterliege. Vielmehr dürften hier Verhältnisse ge-

geben sein, welche früher schematisch durch Textfig. 11 zum Ausdruck gebracht wurden. Doch fehlt in dem knöchernen Jugum, wie hoch es auch sei, die Schnur oder der Stahldraht c der Textfig. 11, welcher die innere Membran in den Schädelbinnenraum hereinzieht. Für die hohen Juga und für die Cristae der Schädelinnenfläche ist die mechanische Deutung eine andere, wenn sie auch in manchen Beziehungen Ähnlichkeiten mit den Voraussetzungen der Textfig. 11 bietet.

Man kann ohne Schwierigkeit für jedes Jugum einen Krümmungsradius φ finden, welcher — eingesetzt an Stelle des negativen Krümmungsradius — die Spannung s der mittleren Normalspannung gleich werden läßt. Für die 7 letzten Beobachtungen der Tabelle V sind diese Krümmungsradien φ in der letzten Spalte zusammengestellt, wobei die mittlere, normale Materialspannung = 3,472 g angenommen wurde. Diese Krümmungsradien φ besitzen zum Teil positive zum Teil negative Vorzeichen und erreichen zum Teil eine sehr beträchtliche Größe. Will man sich sodann eine Vorstellung von der mechanischen Bedeutung dieser Krümmungsradien φ bilden, so kann dazu die schematische Textfigur 21 dienen. Auf dieser findet man unter a einen Querschnitt

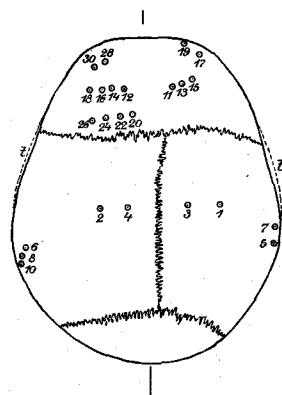


Fig. 20. Schädeldach V eines 11jährigen Knaben, von oben betrachtet. Verkleinert 4:1. Die numerierten Kreise umgeben die in Tabelle V genannten Punkte. Die freihändig eingetragenen Nahtlinien sind etwas ungenau, lassen jedoch erkennen, daß auch hier das Schädeldach etwas schräg abgesägt wurde. Todesursache: Osteomyelitis acuta suppura-tiva ossis coxae sin. Pyohae-mia. Meningitis supp. incipiens.

der Schädelwand, der zugleich quer durch den Verlauf eines Jugum gelegt ist. Die Krümmung auf der Höhe des Jugum wendet ihre Konvexität nach innen gegen den Schädelraum. Demgemäß besitzt der zugehörige Krümmungsradius —12 mm ein negatives Vorzeichen. Dieser negative Krümmungsradius der Innenfläche des Jugum ist jedoch hier so klein gedacht, daß rechnungsmäßig die Spannung s viel höher als 3,472 g wird. Wenn sodann die Rechnung zeigt, daß an diesem Jugum die normale Materialspannung von 3,472 g (qmm) zustande kommen würde, sowie der Krümmungsradius —12 mm durch den Krümmungsradius —50 mm ersetzt wird, so kann man die entsprechende Krümmung in das Jugum einzeichnen. Dabei muß man dafür Sorge tragen, daß die Krümmungen der Schädelinnenfläche nur kontinuierliche Änderungen aufweisen. Man erhält dann die Kurve, welche in Textfig. 21a die Grenze zwischen dem heller und dem dunkler schraffierten Teile des Querschnittes bildet.

Weiterhin kann man sich endlich die Vorstellung bilden, daß der dunkler schraffierte Teil dieses Jugum ausschließlich durch Spannungen beansprucht wird, welche vom Muskelzug, der Gravitation und etwaigen Biegungsbeanspruchungen herrühren, jedoch unabhängig sind von den Druckwirkungen des Schädelinhaltes. Dagegen würden die heller schraffierten Teile dieses Durchschnittes Textfig. 21a die durch den Druck des Schädelinhalt erzeugten Spannungen tragen und durch diese eine normale Materialspannung von 3,472 g erfahren. Der ganze Querschnitt des Jugum würde in diesem Falle eine normale Materialspannung aufweisen. Diese aber würde im Gebiete der einseitigen Belastung durch Muskelzug, Gravitation und Biegung voraussichtlich ungefähr 6,5 g pro qmm betragen und im Gebiete der zweiseitigen Beanspruchung durch den intrakraniellen Druck gleich 3,427 g (qmm) sein¹⁾.

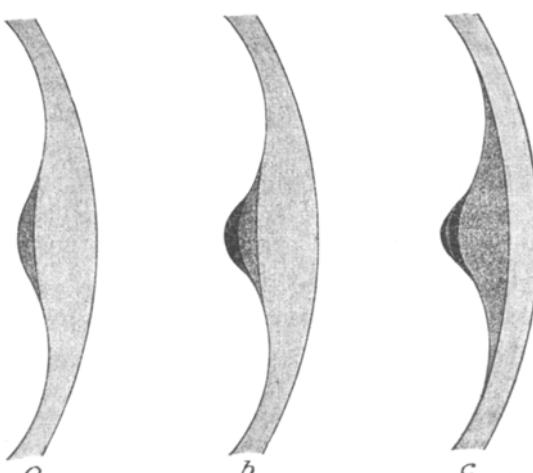


Fig. 21. Schematische Querschnitte durch Juga cerebralia.

Zugleich aber erkennt man, daß an diesen hohen Juga die mechanischen Verhältnisse in gewissem Grade durch das Schema der Textfig. 11 zum Ausdruck gebracht werden. Der dunkel schraffierte Teil der Textfig. 21a entspricht dem Stahldraht c in Textfig. 11. Die Spannungsgleichungen aber erscheinen nur anwendbar für die Oberflächengestaltung desjenigen Teils der Membranen, welche nicht unmittelbar auf dem Stahldraht aufrufen und für denjenigen Teil der Schädelinnenfläche, welcher nicht von den in Textfig. 21a dunkler schraffierten Knochenmassen bedeckt ist. Mit anderen Worten: die anatomische Gestaltung der Juga, welche erhebliche von dem Binnendrucke des Schädels unabhängige Spannungen enthalten, zeichnet sich durch kleine negative Krümmungsradien aus, welchen ein steiles Ansteigen der Seitenränder der Juga und eine beträchtliche Höhe derselben entspricht. Auf dem Kamme dieser Juga, welche man einfach als *hoh*e

¹⁾ Bei dieser Rechnung wurde außer acht gelassen, daß nunmehr nur ein Teil der Dicke d des Knochengewebes den Materialspannungen zur Verfügung steht, welche von dem Drucke des Schädelinhalt erzeugt werden. Dieser Umstand ließe sich leicht berücksichtigen, wenn er auch die Darstellung etwas weniger übersichtlich gestalten würde. Prinzipiell aber würde dabei kein anderes Ergebnis erzielt werden, so daß ich es bei der einfachen Darstellung beenden lasse.

Jug a bezeichnen kann, werden aber die Krümmungsradien nicht einfach in der Weise von dem Binnendrucke bestimmt, wie dies in obigen Spannungsgleichungen zum Ausdrucke kommt. Maßgebend dürften hier vielmehr die Spannungen sein, welche Gravitation, Muskelzug und Biegungsbeanspruchung erzeugen.

Ähnliche Verhältnisse bestehen offenbar auch in den verschiedenen Cristae der Schädelinnen- und Außenfläche. Bei diesen handelt es sich in der Regel um Membranen, Faszien und Sehnen, welche sich an den Schädel ansetzen und in bestimmter Ausdehnung, soweit ihre Spannungen den kritischen Wert s_1 überschreiten, ossifizieren. Der Zug dieser Membranen und Faszien aber kann die Tabula interna weit nach innen ziehen in einer Weise, die eine sehr weitgehende Übereinstimmung mit dem Schema der Textfig. 11 aufweist.

Aus dieser Darstellung ergibt sich, daß man flache und hohes Juga unterscheiden kann.

Die hohen Juga enthalten außer den von dem Drucke des Schädelinhaltes erzeugten Materialspannungen auch akzessorische Spannungen, welche von andern Ursachen, Gravitation, Muskelzug, Biegung herrühren. Dieser Umstand hat zur Folge, daß auf Schnittflächen, welche die hohen Juga senkrecht zu ihrer Verlaufsrichtung durchschneiden, die negativen Krümmungsradien sehr klein werden. Man kann dann die bestehenden mechanischen Verhältnisse am einfachsten zur Anschauung bringen, wenn man annimmt, daß die akzessorischen Spannungen im wesentlichen im Kamme der Juga verlaufen und hier ein Gebiet einnehmen, welches von den durch den Druck des Schädelinhaltes erzeugten Materialspannungen nicht beansprucht wird. Dieses Gebiet ist in obiger Fig. 21 a dunkler schraffiert, während das Gebiet, welches die von dem Drucke des Schädelinhaltes hervorgerufenen Materialspannungen beanspruchen, in dieser Figur heller erscheint. Die Grenzlinie zwischen beiden Gebieten kann aber einen sehr verschiedenen Verlauf nehmen, indem der Krümmungsradius φ , welcher diese Grenze bestimmt, nach den Aussagen der Tabelle V zwar zumeist negatives Vorzeichen besitzt (entsprechend Textfig. 21 a und b) jedoch auch ein positives Vorzeichen gewinnen kann. In diesem Falle wendet die Grenzlinie ihre konkave Seite dem Innern des Schädelraumes zu (Textfig. 21 c).

Diese Anschauung über den Aufbau der hohen Juga findet eine weitere Bestätigung durch den Umstand, daß an der Grenze zwischen Impressio und Jugum nicht selten positive Krümmungsradien gefunden werden, die noch kleiner sind als die positiven Krümmungsradien der Innenfläche am Boden der Impressionen. Man kann sich dann vorstellen, daß infolge hoher akzessorischer Spannungen mehrere Schichten von Knochengewebe auf das Gebiet aufgesetzt sind, welches von den durch den Druck des Schädelinhaltes erzeugten Materialspannungen beansprucht wird (Textfig. 21 b, c). Bei der Bestimmung der Krümmungsradien der Schädelinnenfläche aber wird man in solchen Fällen auf Formen aufmerksam, wie sie in etwas verstärktem Maße in Textfig. 22 schematisch gezeichnet sind. Zu beiden Seiten des Jugum liegen Impressionen, deren Innenfläche auf dem Durchschnitt in gewisser Ausdehnung — auf Textfig. 22 beiderseits zwischen a und b — durch Kreisbögen begrenzt wird. Gegen das Jugum hin setzen sich sodann diese Kreisbögen in Spiralen fort, deren Krümmungsradius zwar positiv bleibt, jedoch um

so kleiner wird, je mehr sie sich der Höhe des Jugum nähern. Auf Textfig. 22 reichen diese Spiralen beiderseits von b bis c. Dann gehen sie in durchaus kontinuierlicher Weise in den Bogen über, welcher den Kamm des Jugum bildet. Ich bin der Ansicht, daß diese Besonderheit sich am einfachsten in der oben gegebenen Weise erklärt. Sie steht jedoch außerdem in direkter Beziehung zu der Formgestaltung der Ränder der Hirnwindungen. Auf diese will ich bei einer anderen Gelegenheit eingehen.

Ausgeprägter werden diese Formen an den Cristae und Spinae der Innen- und Außenfläche des Schädels, an welchen die Falx, das Tentorium, Faszien und Sehnen Zugwirkungen ausüben. Hier sind es selbstverständlich die Zugwirkungen dieser Weichteile, welche die Schädeloberfläche nach innen oder nach außen emporheben, indem diese Weichteile zugleich in derjenigen Ausdehnung verknöchern, in welcher ihre Spannungen die Normalspannung s_1 des Knochengewebes erreichen. Eine ausführlichere Analyse dieser Erscheinungen verlangt jedoch weitere Untersuchungen.

Die flachen Juga erscheinen frei von akzessorischen Spannungen. Sie sind, wie bei der Beschreibung der Schädel II bis IV entwickelt wurde, ausschließ-

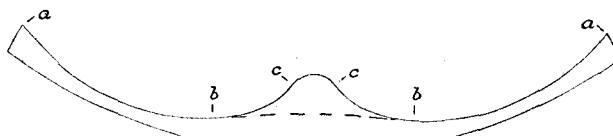


Fig. 22. Schema eines hohen Jugum. Die gestrichelte Linie soll das Gebiet abgrenzen, welches von den durch den Druck des Schädelinhaltes erzeugten Materialspannungen beansprucht wird.

lich Folge des Umstandes, daß der Druck, welchen der Schädelinhalt auf die Schädelwand ausübt, von Stelle zu Stelle wechselt und über den Hirnwindungen ein anderer ist als über den Hirnfurchen, wo nur der Druck des Liquor cerebrospinalis wirksam wird. Da aber von allen diesen Druckwirkungen nur der intrakranielle Flüssigkeitsdruck direkt gemessen werden kann, sind es gerade die flachen Juga, welche sich zu einer Bestimmung der normalen Materialspannung der Schädelwand eignen.

Es fragt sich daher, ob man eine scharfe Grenze zwischen den flachen und den hohen Juga ziehen kann. Ich glaube, daß dies praktisch sehr schwer durchführbar ist. In Tabelle V wurden 6 Juga als flache betrachtet und aus ihnen eine mittlere Materialspannung von 3,472 g berechnet, welche den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt wurden. Es geschah dies, weil die Spannung zwischen Punkt 13 und 20 sowie zwischen Punkt 16 und Punkt 11 sprungweise erhebliche Unterschiede aufweist. Indessen muß man, nachdem die Mechanik der hohen Juga klargelegt ist, wohl erwarten, daß die von der Gravitation und dem Muskelzuge erzeugten akzessorischen Spannungen von dem auf dem Atlas ruhenden Grundbeine, von dem Centre de résistance von Félix aus, durch Vermittlung der größeren Knochenleisten schließlich auf die meisten Juga ausstrahlen. Man

wird daher nur in ganz flachen Juga die Bedingungen verwirklicht finden, welche eine genauere Bestimmung der Materialspannung gestatten. Es bleiben dann zu diesem Zwecke auf Tabelle V nur die zwei Punkte 20 und 2 übrig, und aus diesen ergibt sich eine mittlere Materialspannung von 3,05 g für den Quadratmillimeter.

Dieser Wert steht zugleich in vortrefflicher Übereinstimmung mit der Materialspannung, welche für $i = 0,2034$ g (qmm) bei dem zwölfjährigen Mädchen gefunden und in Tabelle IV verzeichnet wurde. Die Zahl der verwendbaren Beobachtungen war dort eine größere, weil eine größere Zahl flacher Juga und anderer geeigneter Stellen gegeben war. Wenn man sodann nach den damaligen Erörterungen annimmt, daß der intrakranielle Flüssigkeitsdruck für elf- und zwölfjährige Kinder nur ± 13 mm Hg oder 0,176 g (qmm) beträgt, so ermäßigt sich auch hier die mittlere Materialspannung auf 2,64 g für den Quadratmillimeter.

Proportionale Herabsetzungen erfahren unter diesen Voraussetzungen auch die Druckwerte P , welche das Gehirn im Gebiete der *Impressionen* auf die Schädelwand ausübt. Diese erreichten auf Tabelle V ihren höchsten Wert bei Punkt 10 mit 0,837 g (qmm), welcher Wert annähernd einem Drucke von 62 mm Hg entspricht. Es kann fraglich sein, ob ein solcher Druck mit den Funktionen des Gehirns vereinbar ist. Setzt man indessen die Materialspannung gleich 3,05 g (qmm), so wird der Druck P für diesen Punkt 10 der Tabelle V auf 0,7353 g (qmm) gleich 54 mm Hg erniedrigt, der keine Gefahren mehr bieten dürfte. Mit voller Sicherheit aber wird man dies erst behaupten dürfen, wenn der intrakranielle Flüssigkeitsdruck obigen Ausführungen entsprechend auf 0,176 g (qmm) und damit die mittlere Materialspannung auf 2,64 g herabgesetzt wird. Dann ergibt sich als höchster für den Druck P des Hirns auf die Schädelwand in Betracht kommender Wert auf Grund der Messungen an Punkt 10 nur noch $P = 0,6364$ g (qmm), was dem Drucke einer Quecksilbersäule von 47 mm Höhe gleichkommt und sicher der Hirnfunktion keine Gefahr bietet. Ich darf also den Schluß ziehen, daß die mechanische Untersuchung der Schädelwand auch hier, wo verhältnismäßig schwierigere Aufgaben zu lösen waren, an keiner Stelle zu unwahrscheinlichen Konsequenzen führt.

Eine weitere Erörterung der auf Tabelle V verzeichneten Impressionen scheint nach den früheren Auseinandersetzungen nicht erforderlich zu sein. Im allgemeinen gewinne ich jedoch den Eindruck, daß die große Tiefe der Impressionen und die starke Ausbildung der Juga, welche diesen Schädel V auszeichnet, auf einen etwas höheren Wachstumsdruck des Gehirns hinweist. Dem entspricht auch die Tatsache, daß diese Besonderheit gerade in der Mitte der Wachstumsperiode bei Schädel IV und V so auffällig wurde, zu einer Zeit, in welcher der Schädel bereits eine relativ große Festigkeit gewonnen hat, während das Gehirn noch in lebhaftem Wachstum begriffen ist. Demgemäß wäre es auch sehr interessant, an einem größeren Materiale festzustellen, ob solche tiefe Impressionen, die beim Neugeborenen völlig fehlen, das zweite Lebensdezennium bevorzugen, um in späteren

Lebensperioden, wie es nach diesen Beobachtungen den Anschein hat, wieder zu verschwinden. Ein solches Verhalten kann als durchaus wahrscheinlich gelten und ist auf Grund der vorliegenden Erfahrungen zu erwarten, weil im höheren Lebensalter jedenfalls der von seiten des Gehirns ausgehende Druckzuwachs fehlt, welcher das Schädelwachstum auslöst. Es fragt sich jedoch, wie hoch dieser Druckzuwachs zu bemessen ist. Ist er erheblich, so muß auch eine Ermäßigung des auf die Impressionen wirkenden Druckes diese flacher werden lassen.

Nach diesen Erörterungen bedarf die Untersuchung des Schädels VI, welche in Tabelle VI enthalten ist, nur noch einer kurzen Besprechung.

Tabelle VI.

Schädel VI (Alkoholhartung). Mädchen, 2 Jahre alt.

d Dicke der Knochensubstanz. α Dicke der äußeren Knochenschichten in Bruchteilen von *d*. *R'* annähernd sagittale Hauptkrümmungsradien der Schädelwand. *R''* annähernd frontale Hauptkrümmungsradien derselben. *s* Materialspannung, welche der intrakranielle Flüssigkeitsdruck $i = 0,122$ Gramm (qmm) erzeugt. *P* Druck, welcher die mittlere Materialspannung von 2,00 Gramm (qmm) erzeugt.

Punkt der Fig. 23	Ort	<i>d</i> mm	α	<i>R'</i> sagittal		<i>R''</i> frontal		Spannung <i>s</i> Gramm pro qmm	Druck <i>P</i> Gramm pro qmm	Bemerkungen
				Außenfläche mm	Innenfläche mm	Außenfläche mm	Innenfläche mm			
3	Os front. dext.	2,17	0,5	89	166	68	44	2,05	—	
4	Os front. sin.	2,36	0,5	131	106	61	58	2,04	—	
5	Os front. dext.	2,04	0,5	153	103	50	47	2,08	—	
6	Os front. sin.	2,37	0,46	65	— 205	62	39	2,00	—	
9	Os pariet. d.	2,00	0,47	183	46	61	58	1,97	—	
11	Os pariet. d.	1,87	0,5	101	74	66	46	2,16	—	
12	Os pariet. sin.	1,78	0,45	100	75	66	43	2,19	—	
13	Os pariet. d.	2,46	0,5	67	— 37	23	37	1,70	—	Jugum.
16	Os pariet. sin.	2,12	0,46	76	— 66	84	18	1,72	—	
20	Os pariet. sin.	1,83	0,5	124	94	66	33	2,08	—	
Mittelwert der Materialspannung <i>s</i>								2,00		
Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers der einzelnen Beobachtung								0,11	= 5,6 %.	
Wahrscheinlicher Wert des variablen Fehlers des Mittelwertes								0,035	= 1,8 %.	

Impressiones.

14	Os pariet. sin.	1,74	0,5	60	31	65	38	1,54	0,158	Impressio
15	Os pariet. dext.	2,02	0,5	92	46	57	40	1,61	0,152	Impressio
1	Tuber front. d.	2,06	0,45	140	40	33	30	1,21	0,202	Druckpol
2	Tuber front.sin.	2,11	0,5	65	30	25	20	0,835	0,292	Druckpol
7	Tuber par. d.	1,93	0,6	50	40	30	30	1,15	0,213	Druckpol
8	Tub. par. sin.	1,84	0,5	57	55	35	26	1,29	0,189	Druckpol

H o h e J u g a .

10	Os pariet. sin.	2,28	0,5	68	— 200	80	120	3,51	—	$\varphi = +56$ mm
18	Os pariet. sin.	2,26	0,5	75	100	68	— 24	— 29,7	—	$\varphi = +63$ mm

Das Schädeldach VI stammt von einem zweijährigen Mädchen und zeigt sich im allgemeinen als normal, wenn auch im Gebiete der verknöcherten Stirnnaht eine leichte, kielförmige Vortreibung der Nahtrregion besteht,

¹⁾ Mit φ sind auch hier die Krümmungsradien bezeichnet, welche, an Stelle der negativen Krümmungsradien eingesetzt, die Materialspannung $s = 2,00$ herbeiführen.

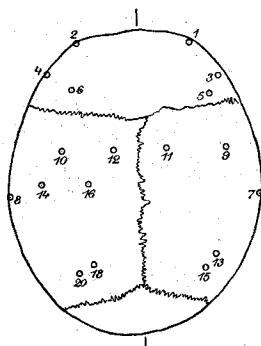


Fig. 23. Schädeldach VI eines zweijährigen Mädchens, von oben betrachtet. Verkleinert 4:1. Die numerierten Kreise umgeben die auf Tabelle VI genannten Punkte. Die freihändig eingetragenen Nahtlinien sind etwas unge nau. Todesursache: Narbige Oesophagusstenose nach Lungenätzung. Perforation. Pleuritis. Sepsis. Tod 6 Monate nach Unfall.

welche in Textfig. 23 vielleicht etwas zu deutlich hervortritt. Die Schädelinnenfläche zeigt, wie für dieses Lebensalter normal ist, nur flache Impressionen, jedoch außer flachen Juga bereits auch zwei Juga, welche als hohe bezeichnet werden müssen. Dabei ist zu bemerken, daß nicht alle Juga der Messung unterzogen wurden. Die Messungsresultate aber scheinen in allen Beziehungen, klar und verständlich. Es genügt daher, anzuführen, daß unter Voraussetzung eines intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes von 9 mm Hg = 0,122 g (qmm), wie er sich aus den Messungen der Physiologen und Kliniker für jüngere Kinder ergibt, die mittleren Materialspannungen in der Schädelwand gleich 2,00 g (qmm) gefunden werden. Auch diese Zahl gibt zu keinen Bedenken Veranlassung, da es begreiflich erscheint, daß die weichen, kalkarmen Knochen des Kindes normalerweise geringeren Mittelspannungen unterliegen als die harten Knochen der Erwachsenen.

Wenn man einen Rückblick auf die hier gewonnenen Ergebnisse wirft, so macht sich zunächst die Tatsache bemerklich, daß die relativ geringen Druckwirkungen, welche der Schädelinhalt auf die Schädelwand ausübt, in letzterer relativ sehr hohe Materialspannungen hervorrufen. Diese Materialspannungen, die zugehörigen Werte des intrakraniellen Flüssigkeitsdruckes und die höchsten Werte, welche der Druck des Hirns an einzelnen Stellen der Schädelwand erreicht, ergeben in übersichtlicher Zusammenstellung folgende Werte:

Schädel Nr.	Alter	Intrakranieller Flüssigkeitsdruck		Material- spannung des Knochenge- webes Gramm pro qmm	Höchste Druck- wirkung des Gehirns	
		mm Hg	Gramm pro qmm		Gramm pro qmm	mm Hg
I	Erwachsen	15	0,2034	3,01	0,479	35
II	28 Jahre	15	0,2034	2,82	0,450	33
III	19 ,,,	15	0,2034	2,75	0,505	37
IV	12 ,,,	13	0,1760	2,68	0,620	46
V	11 ,,,	13	0,1760	2,64	0,636	47
VI	2 ,,,	9	0,1220	2,00	0,292	22

Die hier verzeichneten Materialspannungen des Knochengewebes des Schädeldaches übersteigen in der Tat die Höhe des mittleren Blutdruckes. Denn ein Druck von 3g auf den Quadratmillimeter entspricht annähernd dem Drucke einer Quecksilbersäule von 221 mm Höhe. Und ein Druck von 2 g auf den Quadratmillimeter ist gleichwertig dem Drucke einer Quecksilbersäule von 148 mm Höhe,

welcher bei zweijährigen Kindern als Mittelwert des Blutdruckes schwerlich erreicht werden dürfte. Ich glaube, daß dieses Ergebnis ohne genaue Rechnung nicht erwartet werden konnte. Es ist jedoch, wie sich in den folgenden Mitteilungen zeigen wird, von großer Bedeutung nicht nur für die Wachstumsstörungen des Schädels, sondern auch für die Lehre von der Druckresorption des Knochengewebes.

Sodann ist es von einem Interesse, zu bemerken, daß die Materialspannungen des Knochengewebes sich in den verschiedenen Lebensaltern in ähnlicher, wenn auch nicht in genau proportionaler Weise ändern wie der intrakranielle Flüssigkeitsdruck. Und einige Bedeutung für das Wachstum des Schädels und des Gehirns gewinnt schließlich auch die Tatsache, daß die Druckwirkungen, welche einzelne Stellen des Gehirns auf die Schädelwand ausüben, ihren höchsten Wert im Anfange des zweiten Lebensdezenniums zu erreichen scheinen. Es ist dies eine Zeit, in welcher das Wachstum des Gehirns bereits auf einen relativ festen Schädel trifft. In den späteren Wachstumsperioden ist offenbar das Wachstum des Gehirns ein langsameres und in früheren Wachstumsperioden der Wachstumsdruck des Gehirns in dem relativ weichen Schädel ein geringerer.

Beweisend für die Gesamtheit der hier vertretenen Vorstellungen ist aber nicht nur die Tatsache, daß die Materialspannungen an allen Teilen der Schädelwand, welche ausschließlich unter dem Drucke der intrakraniellen Flüssigkeit stehen, sowohl am Schäeldach wie an der Sella turcica, am Sulcus opticus und an andern Stellen des Schädelgrundes bei gleichem Lebensalter gleich groß gefunden wurden. Solche Beobachtungen gestatten bereits sehr zuverlässige Schlußfolgerungen. Letztere aber werden meines Erachtens sehr wesentlich gekräftigt dadurch, daß es gelang, die Unregelmäßigkeiten der Gestaltung der Schädelinnenfläche, welche man als Juga und Impressionen bezeichnet, ebenso wie die gleichmäßige und glatte Gestaltung der Schädelaußenfläche durch die vorgetragenen histomechanischen Auffassungen in allen Einzelheiten vollständig zu erklären. Die Impressionen und Juga entstehen, weil die auf die Schädelinnenfläche treffenden Druckwirkungen der Hirnwindungen und des zwischen den Hirnwindungen befindlichen Liquor cerebrospinalis verschiedene Größe besitzen. Die Ungleichheiten dieser Druckwirkungen werden durch den wellenförmigen Verlauf der inneren Glastafel zum großen Teile ausgeglichen, so daß die äußere Glastafel unter gleichmäßigeren Druckwirkungen steht und demgemäß einfachere, glatte Formen darbietet. Zugleich zeigte es sich, daß die höheren Juga außer den vom Drucke des Schädelinhaltes erzeugten Spannungen noch andere Spannungen enthalten, welche von dem Muskelzuge und der Gravitation herrühren. Diese strahlen aus von dem Centre de résistance von Félix et, der auf dem Atlas ruhenden Schädelbasis, und werden verstärkt durch die nie völlig fehlenden Biegungsspannungen der Schädelwand.
