Das Volumen und spezifische Gewicht des menschlichen Körpers, insoweit er aus festen und flüssigen Stoffen besteht, also unter Ausschluss der variablen Körperluft.

Von

Dr. **Josef Wengler.**

(Mit 1 Textfigur.)

Bisher ist, soviel mir bekannt, von Physiologen zur Feststellung von Änderungen des Körpervolumens als Medium die Luft benutzt worden (Schenck, Aron).

Der Körper befand sich in einer abgeschlossenen, an allen Schwankungen des Körpervolumens teilnehmenden Luftsäule, deren mechanische Verschiebungen man zu bestimmen versuchte.

Meines Erachtens ist es ungemein schwierig, auf diesem Wege zu einigermaßen genauen Resultaten zu kommen, da Luftvolumina nicht allein die mechanische Verschiebung, sondern auch die leiseste Änderung im Gasdruck, in der Temperatur, in der Dampfspannung mit bedeutendem Ausschlag anzeigen.

Ich verwende daher bei meinen Versuchen der Bestimmung des Körpervolumens als Untersuchungsmedium das Wasser, welches ausserdem in dieser Richtung vor der Luft noch den grossen Vorzug besitzt, dass Volumenverschiebungen direkt abgelesen werden können. Nach vielen Vorversuchen mit anderen Apparaten habe ich mir folgenden für einen erwachsenen Menschen bestimmten Wasservolumenometer konstruiert:

Die Aufgabe war, die mittelst einer AtmungsVorrichtung atmende Versuchsperson in ein vollständig gefülltes Wassergefäss einzuschliessen, welches oben in eine graduierte Glasröhre von wenigen Zentimetern Durchmesser auslief. Die Grösse der aufgesetzten Glasröhre war jedoch so zu bemessen, dass das entsprechend der Atmung eintretende Steigen und Sinken des Wasserspiegels im Bereich ihrer Graduierung geschah, was einen Kubikinhalt der Glasröhre von an-

nähernd 1000 ccm, also bei einem Halbmesser von 3 cm eine Höhe von ca. 30 cm, voraussetzte.

Um die Gefahr des Ertrinkens auszuschliessen, musste der luftdicht schliessende Deckel des Gefässes, in welchem die Glasröhre eingesetzt war, von der im Gefäss befindlichen Person selbsttätig, ohne äussere Hilfe, jederzeit rasch und sicher gehoben werden können. Die Anwendung von Haken und Schrauben zur Befestigung des Deckels verbot sich also von selbst. Ich half mir mit einem Quecksilberverschluss.

Den oberen Rand des Volumenometergefässes bildete eine Quecksilberrinne, in welche der Deckel mit seinem senkrecht umgebogenen Rand eingesetzt wurde. Die Tiefe der Rinne berechnete sich nach der Höhe der dem Deckel aufgesetzten Glasröhre. Da die Quecksilbersäule einer Wassersäule von ca. 30 cm Höhe das Gleichgewicht zu halten hatte, so musste (das spezifische Gewicht des Quecksilbers zu 13,6 angenommen) die Rinne eine Tiefe von ca. 3 cm haben.

Es galt nun noch den Auftrieb des Wassers zu kompensieren.

War das Volumenometergefäss bis zum oberen Rand der graduierten Glasröhre mit Wasser gefüllt, so wurde der Deckel mit einer Kraft aufwärts getrieben, welche dem Gewicht einer Wassersäule von dem Durchmesser des Volumenometergefässes und der Höhe der den Deckel überragenden Glasröhre entsprach. Hatte das Gefäss bei zylindrischer Gestalt den für die freie Beweglichkeit der Versuchsperson notwendigen Halbdurchmesser von ca. 28 cm, so war also die Kraft des Auftriebes gleich einem Gewicht von $28^2 \pi \times 30$ — (30 cm beträgt die Höhe der Glasröhre) — also gleich 74 kg.

Der Deckel musste also mit Gewichten von im ganzen über 74 kg Schwere belastet werden. Zu diesem Zwecke wurden am Rand des Deckels 16 vorspringende Haken angebracht, deren jeder ein Gewicht von 5 kg Schwere trug. Hingen wir nun noch den belasteten Deckel an eine Rolle oder an einen Flaschenzug, mit dessen Hilfe er leicht

Das Volumenometergefäss im Durchschnitt. (Schematische Zeichnung.)

in die Rinne gesenkt und wieder herausgehoben werden konnte, so war der Apparat gebrauchsfertig. Die Praxis hat gezeigt, dass ein im Gefäss befindlicher Erwachsener von mässiger Muskelkraft den belasteten Deckel einseitig heben konnte, was ja völlig genügt, um der Versuchsperson momentan Luft zu verschaffen, wenn die Atmungs-
vorrichtung einmal versagen sollte. Die Höhe des Gefässes war nämlich gerade so bemessen, dass die Versuchsperson beim Aufstehen mit dem Kopf über den oberen Rand emporreichte.

Als Atmungs-
vorrichtung benutzte ich ein Mundstück, dessen freies Ende mittelst eines nicht kompressiblen, aber doch biegsamen Schlauches¹⁾ mit einer im Deckel befindlichen Öffnung in Verbindung stand. Das Mundstück bildete ein Blechrohr von der Form eines verkürzten Lampenzylinders. Die Basis des Blechrohrs, welche einen Durchmesser von 4 cm hatte, war von einem dicken Meier'schen Gummiring, von 4 cm innerem und 7 cm äusserem Durchmesser, umschlossen. Der Ring war so über den Anfangsteil der Blechröhre gestülpt, dass der scharfe Blechrand nicht hervorsah.

Bei Anwendung der Atmungs-
vorrichtung kam der Gummiring in den vor den Zähnen gelegenen Teil der Mundhöhle zu liegen und war von den gespannten Wangen und Lippen so umschlossen, dass man ihn von aussen kaum sah. Auf diese Weise verbanden sich die Mundhöhle und der Blechzylinder infolge des elastischen Anschliessens der Haut und Schleimhaut um den Gummiring herum zu einem luftdicht abgeschlossenen Kanale, der sich mittelst des Gummischlauches bis zu der Öffnung des Deckels des Volummessers fortsetzte. Beim Atmen unter Wasser hielt sich die Versuchsperson selbst die Nase zu.

Da das Niveau des Wasserspiegels in der graduierten Glasröhre und des Quecksilberspiegels in der Rinne genau horizontal sein musste, wurde das Volumenometergefäss auf einen Nivelliersockel mit drei Füssen, von denen zwei in der Höhe verstellbar waren, gestellt.

Die Volumenmessung vollzog sich folgendermassen:

Das Gefäss war zu $\frac{2}{3}$ mit Wasser von einer bestimmten Temperatur gefüllt, der Deckel in die Höhe gezogen. Die Versuchs-

1) Einen solchen nicht kompressiblen, nicht knickbaren, dabei äusserst biegsamen Schlauch schuf ich mir dadurch, dass ich in eine weite, weiche Gummiröhre eine Drahtspirale einschloss.

person begab sich nun in das Gefäß und führte das Mundstück der Atmungsvorrichtung in den Mund ein. Nunmehr wurde der Deckel heruntergelassen. Dabei tauchte die Versuchsperson unter Zuhaltung der Nase unter und begann durch die Atmungsvorrichtung zu atmen. Nachdem die Versuchsperson einige Zeit ruhig geatmet hatte, während welcher Zeit das Gefäß bis nahe an den oberen Rand der graduirten Glasröhre aufgefüllt wurde, hielt sie im Stadium der gewöhnlichen Ausatmung den Atem an. Nach Beruhigung des Wasserspiegels in der graduirten Glasröhre notierte man das Niveau und liess dann so viel Wasser ab, dass die Versuchsperson ohne Wasserverlust durch Überfließen aus dem Gefäß heraussteigen konnte. Das abgelassene Wasser wurde nach dem Heraussteigen in das Volumenometergefäß zurückgeschüttet, so dass sich also nachher wieder dieselbe Wassermenge darin befand, wie zur Zeit, als man den Wasserspiegel in der graduirten Glasröhre notierte. Dann wurde das Volumenometergefäß mittelst gemessener Wassermengen bis zu dem abgelesenen Niveau aufgefüllt. Die Summe der eingeschütteten gemessenen Wassermenge entsprach dem Volumen der Versuchsperson in dem zur Zeit der Ablesung herrschenden Atmungsstadium.

Ich hatte so das Volumen der Versuchsperson im ganzen „ V “ bestimmt, d. h. das Volumen der festflüssigen Körpersubstanz und der Körperluft zusammen.

Um das Volumen nur der festflüssigen Körpersubstanz zu finden, galt es, eine Methode zu ersinnen für die Bestimmung der Körperluft.

Das Volumen von Luftmengen, die man nicht direkt messen kann, bestimmt man durch Feststellung ihrer Volumenänderungen bei verschiedenem Druck. Es sei d die gefundene Volumenänderung, p und p_1 die verschiedenen Druckhöhen, x das gesuchte Volumen bei Druckhöhe p , dann ist:

$$x \cdot p = (x - d) p_1; \quad x = \frac{d p_1}{p_1 - p}.$$

Es galt also zunächst von einem Atmungsstadium auszugehen, in welchem die gesamte Körperluft, also Lungenluft und Darmluft, unter einem Druck stehen. Dieses Atmungsstadium haben wir bei ruhiger Ausatmung und geöffneter Stimmritze. Es herrscht in diesem Atmungsstadium in Lungen- und Darmluft im wesentlichen Atmosphärendruck. Die zweite Aufgabe war, das Volumen der Körperluft

einer Druckänderung zu unterwerfen, und zwar so, dass auf der erreichten Druckhöhe wiederum die beiden Teile der Körperluft, die Lungenluft und die Darmluft, unter demselben Druck standen. Ich erreichte dies dadurch, dass ich die Körperluft unter Aufhebung der Kommunikation mit der Umgebungsluft durch Anspannung der Expirationsmuskeln auf den erreichbar höchsten Druck brachte. Im Stadium der grössten willkürlich hervorgerufenen Verdichtung zeigen Lungen- und Darmluft wiederum im wesentlichen den gleichen Druck. Kleinere Druckunterschiede von Bruchteilen eines Millimeters Quecksilber kommen bei einer Bestimmung kaum in Betracht, bei welcher eine Druckdifferenz von 50 mm Quecksilber und mehr massgebend ist.

Den Beweis für meine Behauptung bezüglich des gleichen Drucks in Lunge und Darm bei höchster willkürlicher Druckerhöhung werde ich in einer demnächst erscheinenden Arbeit bringen. Vorläufig mag man es als erwiesen ansehen, dass die Körperluft sowohl im Stadium der ruhigen Ausatmung als auch bei äusserster willkürlicher Verdichtung in ihren beiden Teilen, der Lungenluft und der Darmluft, den gleichen Druck zeigt.

Wollte ich also das Volumen der Körperluft bestimmen, dann brauchte ich meinen oben beschriebenen Versuch nur noch dahin zu erweitern, dass ich die untergetauchte Versuchsperson nach Feststellung des Wasserspiegels im Stadium ruhiger Ausatmung ihre Körperluft aufs äusserste verdichten liess und dann den erreichten Manometerdruck der Körperluft und die Verkleinerung des Körpervolumens, welche identisch ist mit der Volumenverminderung der Körperluft, an der graduierten Messröhre des Wasservolumenometers ablas.

Ist, wie oben gesagt, d die gefundene Volumenverkleinerung, p der Atmosphärendruck, zugleich Druck der Körperluft im Stadium der Ausatmung, p_1 der erzielte erhöhte Druck, dann ist x (Volum der Körperluft im Stadium der Ausatmung) = $\frac{d p_1}{p_1 - p}$.

Ich brauche jetzt nur noch von dem gefundenen Körpervolumen „ V “ das zuletzt ermittelte Volumen der Körperluft abzuziehen, und ich erhalte das Volumen der festflüssigen Körpersubstanz „ v “

$$v = V - \frac{d p_1}{p_1 - p}.$$

Ich betone, dass ich keineswegs glaube, das Volumen der Körperluft unter normalen Verhältnissen gefunden zu haben. X ist das

Volumen der Körperluft unter den keineswegs normalen Verhältnissen des Versuchs in dem Augenblick der Feststellung des Körpervolumens. Die nur für den betreffenden Moment gültige Körperluftbestimmung diente mir einfach dazu, das Volumen der festflüssigen Körpersubstanz zu ermitteln. Das ermittelte Volumen der festflüssigen Körpersubstanz war dann freilich auch für die Zeit vor und nach dem Versuch gültig, da ja die abnormen Verhältnisse des Versuchs wohl einen Einfluss auf die Menge der Körperluft haben können, nie aber auf die relativ inkompressible festflüssige Körpersubstanz.

Als Tageszeit für den Versuch wurde der Vormittag gewählt, nachdem Blasen- und Mastdarmentleerung eingetreten war. Vor und nach dem Versuch wurde das absolute Körpergewicht der Versuchsperson und die Temperatur der Badeflüssigkeit bestimmt.

Die Versuchsperson stieg direkt aus einem Vollbade, verbunden mit Kopftusche, ohne vorheriges Abtrocknen, in das Volumenometergefäß. In der für das Auffangen des Wassers bestimmten Schüssel sowie in ihrem zum Volumenometergefäß führenden Verbindungsschlauch stand bis zur Verwendung Wasser. Die Entleerung erfolgte kurz vor der Verwendung. So wurde erreicht, dass die Körperoberfläche und die Wandungen der Schüssel vor und nach dem Versuch die gleiche Feuchtigkeitsschicht bedeckte.

Plan des Versuchs in seinen einzelnen Phasen:

- I. Die Versuchsperson wird gewogen.
- II. Die Temperatur des Wassers im Volumenometergefäß wird gemessen.
- III. Der Deckel wird angehängt und unbelastet in die Höhe gezogen.
- IV. Die Versuchsperson steigt in das zu $\frac{2}{3}$ gefüllte Gefäß. (Notierung der Zeit.)
- V. Das Gefäß wird aufgefüllt bis nahe an den Rand und der Deckel mit Gewichten belastet.
- VI. Die Versuchsperson nimmt die Atmungs Vorrichtung in den Mund, hält sich die Nase zu, atmet durch die Atmungs Vorrichtung und taucht unter, dabei wird der belastete Deckel herabgelassen.
- VII. Die Versuchsperson probiert, den belasteten Deckel emporzuheben.
- VIII. Das Gefäß wird so weit aufgefüllt, dass bei der Ausatmung der Versuchsperson das Wasser ungefähr in der Hälfte der gra-

duierten Glasröhre steht. (Wenn bei der Einatmung das Wasser überfließt, muss vom Assistenten etwas nachgegossen werden.)

IX. Die Versuchsperson hält im Stadium der gewöhnlichen Ausatmung den Atem an und gibt ein Zeichen, dass der Wasserstand abgelesen werden soll.

X. Wenn der Beobachter den Wasserspiegel abgelesen hat, gibt er der Versuchsperson ein Zeichen und bringt die Luftzuführungsöffnung im Deckel in Verbindung mit dem Manometer.

XI. Die Versuchsperson verdichtet nun ihre Lungenluft und sucht den Manometerdruck so hoch als möglich zu steigern. Der Beobachter liest den Druck am Manometer und die Volumenabnahme an der graduierten Röhre des Deckels ab.

XII. Wenn alles abgelesen ist, öffnet man den Luftzuführungskanal und lässt zugleich Wasser aus dem Volumenometergefäß ablaufen. Zu gleicher Zeit gibt man der Versuchsperson ein Zeichen, dass sie wieder atmen darf.

XIII. Ist genügend Wasser abgelassen, dann zieht man den belasteten Deckel in die Höhe. Die Versuchsperson taucht empor.

XIV. Die Gewichte werden abgenommen; die Versuchsperson verlässt das Gefäß. (Notierung der Zeit.)

XV. Das abgelassene und in der Schüssel aufgefangene Wasser wird wieder in das Gefäß zurückgegossen, der Deckel nach Verschluss des Mundstücks herabgelassen und die Gewichte wieder angehängt.

XVI. Die Versuchsperson wird nun wieder gewogen.

XVII. Die Temperatur des Wassers im Volumenometergefäß gemessen.

XVIII. Es werden gemessene Wassermengen von derselben Temperatur so weit eingefüllt, bis der Wasserspiegel wieder auf demselben Niveau steht, auf dem er im Stadium IX stand.

XIX. Die Summe der eingeschütteten, gemessenen Wassermengen wird bestimmt. Sie ist gleich dem Volumen der Versuchsperson in dem sub. IX beschriebenen Atmungsstadium.

Bevor es zu dem in allen Punkten geglückten Versuch am 5. September 1906 kam, gingen verschiedene Versuche voraus, bei welchen infolge der mangelhaften Übung der Versuchsperson und der Unvollkommenheit des Apparates eine in allen Teilen genaue Feststellung nicht erreicht wurde.

Der erste Vorbereitungsversuch wurde bereits vor einem Jahre in Berlin, dem Herstellungsort der Apparate, unter der Assistenz der Herren Prof. Dr. Lazarus und Privatdozent Dr. Aron ausgeführt.

Versuch

am 5. September 1906 in Alsfeld.

Versuchsperson (Verfasser selbst). Anwesend: Dr. Weber, Dr. Gleim und Primaner Heinrich Fuhrmann.

Apparate.

Das Volumenometergefäß: Das Volumenometergefäß, aus stärkstem Zinklech gearbeitet, auf seine Dichtigkeit geprüft, hat eine Höhe von 140 cm und einen Durchmesser von 55 cm. Es ist auf dem Nivelliersockel äquilibriert und bis reichlich zwei Drittel mit warmem Wasser gefüllt.

Die Quecksilberrinne am oberen Rande hat eine Tiefe von 3 cm und eine Breite von 1,75 cm. Sie ist bis zur Höhe von 1,5 cm mit Quecksilber gefüllt. Alle Teile des Apparats, die mit Quecksilber in Berührung kommen, sind mit einer Lackschicht überzogen. Ringsherum am Boden stehen die 16 Gewichte, bereit zum Aufhängen. Am Gefäß hängt der Quecksilbermanometer, welcher durch Gummischlauch und Glasröhre mit dem zum Verschluss der Atmungsöffnung im Deckel bestimmten Gummistopfen in Verbindung steht.

Der Deckel. In der Mitte des Deckels ist eine 30 cm hohe graduierte Glasröhre von 6 cm Durchmesser aufgesetzt. Auf der einen Seite des Deckels befindet sich die Öffnung, an welcher die Atmungsvorrichtung herabhängt. Der rechtwinklig abgebogene Rand des Deckels hat eine Höhe von 2,8 cm.

Messgefäße. Zur Messung dienen drei Messflaschen mit engem Halse, deren am Halse befindlicher Markierungsstrich den Inhalt von 10 Liter, von 1 Liter und von $\frac{1}{2}$ Liter anzeigt. Ausserdem ist noch ein graduiertes Messgläschen für 100 ccm Inhalt vorhanden. Das zum Auffüllen bestimmte, mit dem Volumenometerwasser gleichtemperierte Wasser befindet sich in einem Zinkkessel von 200 Liter Inhalt.

Es wird nach dem oben gegebenen Plane des Versuchs verfahren. Dabei ergibt sich:

1. Absolutes Gewicht der Versuchsperson vor dem Einsteigen (I). 75,5 kg
2. Temperatur der Flüssigkeit vor dem Einsteigen (II) . . . 34° C.
3. Wasserstand beim Atemanhalten (IX). 14 cm
4. Wasserstand bei der Luftverdichtung (XI) 6,5 cm
5. Manometerdruck bei der Luftverdichtung (XI) 81 mm
6. Absolutes Gewicht der Versuchsperson nach dem Aussteigen (XVI) 75,5 kg
7. Temperatur der Flüssigkeit nach dem Aussteigen (XVII) . 32° C.
8. Menge des gemessenen, eingeschütteten Wassers (XIX) . 74,9 Liter.

Ergebnis des Versuches.

Das Volumen („ V “ = 74,9 Liter) der Versuchsperson, deren absolutes Körpergewicht „ g “ 75,5 kg betrug, war bei Verdichtung ihrer Körperluft um den Druck p_2 (81 mm) um 7,5 cm der graduierten Glasröhre gesunken. Da die graduierte Glasröhre einen Halbdurchmesser von 3 cm hat, bedeutet dieses Sinken eine Volumenabnahme von 212 ccm. — Das Sinken des Wasserstandes in der graduierten Glasröhre des Deckels ist aber nicht die einzige Flüssigkeitsverschiebung, hervorgerufen durch die willkürliche Verkleinerung des Körpervolumens der Versuchsperson.

Auch das Quecksilber in der durch den rechtwinklig abgebogenen Deckelrand geschaffenen inneren Halbrinne des ringförmigen Quecksilberbeckens am oberen Rande des Volumenometergefässes folgt dem Ausgleichstreben. Proportional dem Sinken des Wasserstandes steigt das Niveau in der inneren Quecksilberhalbrinne. Sinkt der Wasserstand, wie hier, um 7,5 cm, so steigt das Quecksilberniveau der inneren Halbrinne dem spezifischen Gewicht des Quecksilbers gemäss um ein Dreizehntel von 7,5 cm, genau um den Bruchteil $\frac{7,5}{13,6}$. Das

Volumen des entsprechenden Teiles der inneren Quecksilberhalbrinne muss also mit hinzugerechnet werden, wenn man die wahre Grösse der willkürlichen Volumenverkleinerung finden will.

Das Volumen des entsprechenden Teiles der inneren Quecksilberhalbrinne beträgt aber $(r^2 - q^2) h \pi$, wobei h die Steighöhe des Quecksilberniveaus in der inneren Halbrinne bedeutet und r und q die Halbdurchmesser der beiden Wände der inneren Halbrinne sind, und zwar r der Halbdurchmesser des rechtwinklig abgebogenen Deckelrandes und q der Halbdurchmesser des inneren Randes des ringförmigen Quecksilberbeckens.

h ist, wie oben gezeigt, gleich $\frac{7,5}{13,6} = 0,55$ cm, r gleich 26,75 cm und q gleich 25,75 cm, $(r^2 - q^2) h \pi$ ist also in unserm Fall gleich 91 ccm. Die Verkleinerung des Körpervolumens der Versuchsperson infolge der bei dem Versuch eingetretenen willkürlichen Verdichtung der Körperluft um 81 mm Quecksilber beträgt also 212 ccm + 91 ccm, zusammen 303 ccm.

Bezeichnen wir das Volumen der Körperluft unmittelbar vor ihrer Verdichtung, also im Stadium IX, mit x , so ist, da der Druck

der Körperluft durch ihre Verdichtung um p_2 , also vom Atmosphärendruck p auf den Druck $p_1 = p + p_2$, gestiegen ist, wie wir oben gesehen haben

$$x = \frac{d p_1}{p_1 - p}$$

oder

$$x = \frac{d(p + p_2)}{p + p_2 - p} = \frac{d(p + p_2)}{p_2}.$$

Es ist nun in unserm Versuch $d = 303$ ccm, $p = 760$ mm, $p_2 = 81$ mm; also $x = 3145$ ccm. Das Volumen der Körperluft in unserm Versuch bei Atmosphärendruck beträgt also 3145 ccm.

Das Volumen der festflüssigen Körpersubstanz „ v “ ist aber gleich dem Körpervolumen „ V “ vermindert um das Volumen der Körperluft x .

$$v = V - x = 71,76 \text{ Liter.}$$

Das spezifische Gewicht der festflüssigen Körpersubstanz ist dann gleich ihrem absoluten Gewicht g geteilt durch ihr Volumen „ v “.

$$s = \frac{g}{v} = 1,05.$$

Der Versuch ist bisher von mir nicht wiederholt worden, weil er in meinem kleinen Haushalt sehr viel Störung hervorruft und nur unter besonders günstigen Verhältnissen zur Ausführung kommen kann.