

## Die Kraft unserer Inspirationsmuskulatur.

Von

Dr. **Robert Stigler**,

Assistent am physiologischen Institut der Universität Wien.

---

(Mit 7 Textfiguren.)

---

Donders<sup>1)</sup> hat die Kraft der Atemmuskulatur aus den Grenzen des positiven und negativen Atmungsdruckes unter Berücksichtigung der den Atembewegungen jeweils entgegenwirkenden oder förderlichen Kräfte berechnet. Die hierzu nötige Bestimmung des maximalen In- und Expirationsdruckes nennt man **Pneumatometrie**.

Diese wurde von mehreren Autoren auf verschiedene Art durchgeführt, wobei auch verschiedene Zahlenwerte erhalten wurden.

G. Valentin<sup>2)</sup>, welcher als einer der ersten pneumatometrische Messungen anstellte, verwendete zu denselben sein „Pneumatometer“, ein einfaches Quecksilbermanometer mit einem geeigneten Ansatzstück, das sich gut an die Lippen der Versuchsperson schloss; er erhielt schwankende Werte, je nach der untersuchten Persönlichkeit. Ein 21jähriger Schwächling brachte es nur auf 22 mm Hg für das Ein- und 38 mm Hg für das Ausatmen. Zwei sehr kräftige junge Leute desselben Alters leisteten ungefähr das Zehnfache: ihre Einatmung ergab einen Druck von 220 und 232, ihre Ausatmung von 256 mm Hg.

Im Mittel fand Valentin für die maximale Einatmung 102,2, für maximale Ausatmung 108,2 mm Hg-Druck. Valentin's Werte fielen aber, wie Donders<sup>3)</sup> behauptet, zu gross aus, weil bei seinen Versuchen auch die Saugkraft der Mundmuskulatur mitwirkte.

Donders hat deshalb ein Manometer in ein Nasenloch gesteckt, das andere Nasenloch zugehalten und dann den maximalen

---

1) Physiologie des Menschen. Deutsche Übersetzung von Theile Bd. 1 S. 404. 1856.

2) Lehrbuch der Physiologie des Menschen, 2. Aufl., Bd. 1 S. 529 ff. 1847.

3) l. c. S. 401.

Inspirationsdruck gemessen. Die auf diese Art erhaltenen Werte fielen niedriger aus; der stärkste Inspirationsdruck betrug 36—74, im Mittel 57 mm Hg, der stärkste Expirationsdruck 82—100, im Mittel 87 mm Hg<sup>1)</sup>.

Mit gleicher Methode fand Hutchinson<sup>2)</sup> bei seinen zahlreichen Versuchen in Übereinstimmung mit den von Donders erhaltenen Werten als Maximum des Inspirationsdruckes 76,2 mm Hg.

Die folgenden Angaben noch anderer Autoren über den maximalen Inspirations- und Expirationsdruck bringt H. Vierordt<sup>3)</sup> in seinen Tabellen: Eichhorst fand bei forcierter Atmung einen Inspirationsdruck von 70, einen Expirationsdruck von 80 mm Hg, Waldenburg beobachtete an einem Hg-Manometer, das er vermittelt eines in zwei Oliven auslaufenden Doppelschlauches mit beiden Nasenlöchern verband, einen maximalen Inspirationsdruck von 80—100 mm Hg bei Männern, von 60—80 bei Weibern und einen Expirationsdruck von 100—130 bei Männern und von 70 bis 110 mm Hg bei Weibern.

E: Rollet gibt für forcierte Atmung an (mm Hg):

	Stehen:	Sitzen:	Liegen:
Inspirationszug . . . . .	140	140	120
Expirationsdruck . . . . .	200	200	160

Der Expirationsdruck wurde von Hutchinson<sup>4)</sup> im Durchschnitt um ein Drittel grösser gefunden als der Inspirationsdruck derselben Person. Trotzdem kommt aber, wie Donders<sup>5)</sup> klarlegt, den Inspirationsmuskeln die grössere Kraftleistung zu; denn bei der inspiratorischen Erweiterung des Thorax müssen sie nebst dem Ansaugen der Luft auch noch 1. den Thorax heben, 2. die Rippenknorpel ein wenig biegen, 3. den der Abflachung des Zwerchfelles entgegenwirkenden Widerstand überwinden, d. h. die Organe der Bauchhöhle etwas verschieben und sie, soweit sie lufthaltig, also kompressibel sind, komprimieren und die Spannung der Bauchmuskulatur überwinden, welche der Herabschiebung der Abdominal-

1) l. c. S. 399.

2) Zit. nach Donders, l. c. S. 402.

3) Anatomische, physiologische und physikalische Daten und Tabellen, III. Aufl., S. 263. 1906.

4) Zit. nach Donders, l. c. S. 401.

5) l. c. S. 399.

organe entgegenwirkt, endlich 4. gegen den Widerstand des elastischen Lungengewebes aufkommen.

Letzterer beträgt nach Donders<sup>1)</sup> am Ende einer gewöhnlichen Expiration 7,5 mm Hg (bei der Leiche wegen des Fehlens des Tonus der Inspirationsmuskeln nur 6 mm), am Ende einer gewöhnlichen Inspiration 9, nach einer möglichst tiefen Inspiration 30—40 mm Hg.

Addiert man die Kräfte, welche zur Leistung dieser vier Arbeiten nötig sind, zur maximalen Inspirationskraft, so ergibt sich tatsächlich eine Überlegenheit der Kraft der Inspirationsmuskulatur gegenüber der Expirationsmuskulatur, deren Kraft man erfährt, wenn man von der am Manometer abgelesenen maximalen Expirationskraft die bei der Inspiration angeführten vier Gegenkräfte subtrahiert, da diese der Expirationsmuskulatur als Hilfskräfte beistehen und sie demgemäss um ihren eigenen Betrag entlasten.

An der Hand der so gewonnenen Daten hat Donders die Kraft der Inspirationsmuskeln in folgender Weise berechnet:

Die Inspirationsmuskeln haben folgende Kräfte zu überwinden:  
 1. Den negativen Luftdruck in den Lungen während der maximalen Inspiration = 57 mm (Mittel aus Donders' Angaben). 2. Die Elastizität der mässig ausgedehnten Lunge = 15 mm; der zu überwindende Druck auf der äusseren Brustwand ist somit = 72 mm. Am Zwerchfell kommt noch der zu überwindende interabdominale Druck dazu, welchen Donders zu 10 mm veranschlagt; auf dem Zwerchfell lastet somit ein Druck von 82 mm. Donders nimmt die Oberfläche der Brust eines kräftigen Mannes zu 20 qdem, die Oberfläche des Zwerchfelles zu 3,5 qdem an. Somit beträgt die bei maximalem Einatmen entwickelte Kraft  $(20 \times 0,72 + 3,5 \times 0,82)$  cdem Hg = 17,27 cdem Hg = 233,1 kg.

Zu dieser Kraft von 233,1 kg ist noch diejenige zu rechnen, welche zur Hebung des Thorax und zur Torsion der Rippenknorpel erforderlich ist. Ein Versuch Hutchinson's<sup>2)</sup>, die letztere durch Lufteinblasung an der Leiche (ohne dass die Rippen gehoben wurden) zu bestimmen, führte nach Donders zu keinem brauchbaren Ergebnisse.

Die Expirationskraft berechnete Donders in folgender Weise: Der mittlere stärkste Expirationsdruck beträgt 87 mm Hg; den

1) Donders, l. c. S. 399.

2) Donders, l. c. S. 404.

Expirationsmuskeln kommt aber die elastische Kraft der Lunge zu Hilfe, welche Donders zu 20 mm annimmt. Es bleibt somit ein Muskeldruck von 67 mm übrig, welcher bei der maximalen Expiration auf der inneren Brustwand und dem Zwerchfell lastet, was eine gesamte Expirationskraft von 212,56 kg ergibt; davon ist aber noch das Gewicht des Thorax und die Spannung der Rippenknorpel abzuziehen.

Nach Donders' Berechnung ist somit die maximale In- und Expirationskraft ungefähr gleich.

Die bei gewöhnlicher Inspiration angewendete Kraft berechnet Donders, indem er dabei den Widerstand der elastischen Substanz zu 10 mm, den negativen Luftdruck in der Lunge zu 2 mm, somit den auf der Brustwand lastenden Druck zu 12 mm, den auf dem Zwerchfell lastenden Druck zu 22 mm schätzt, in analoger Weise mit 42,8 kg, abgesehen vom Gewichte des Thorax und der Torsion der Rippenknorpel. Zur gewöhnlichen Expiration ist bekanntlich überhaupt höchstens eine mässige aktive Muskelwirkung nötig.

Selbstverständlicherweise haften diesen Berechnungen verschiedene Willkürlichkeiten an. Besonders scheint mir die Angabe der Brustoberfläche zu 20 qdm sehr hoch gegriffen. Auch R. du Bois-Reymond<sup>1)</sup> schätzt den beweglichen Teil der Thoraxwandung bloss zu 625 qcm. In H. Vierordt's Tabellen findet sich leider keine Angabe der Grösse der Brustoberfläche selbst, wohl aber ein Vermerk [von Funke<sup>2)</sup>], dass die Oberfläche von Brust, Bauch und Hals eines Erwachsenen, dessen gesamte Körperoberfläche 16517 qcm betrug, 1238 qcm ausmachte. Diese niedrige Zahl stimmt mit der von R. du Bois-Reymond angenommenen gut überein. Aus der gesamten Körperoberfläche des von Funke untersuchten Erwachsenen ist aber zu schliessen, dass dies ein recht schwächlicher Mann gewesen sein muss. Denn die gesamte Körperoberfläche eines kräftigen, 26<sup>1/2</sup>jährigen, 162 cm grossen und 62,25 kg schweren, also mittelgrossen Mannes betrug nach Meeh<sup>3)</sup> ungefähr 19000 qcm.

Von äusseren Längsdimensionen des Brustkorbes in Ruhelage gibt Vierordt<sup>4)</sup> an:

---

1) Zur Physiologie des Schwimmens. Arch. f. Physiol. 1905 S. 258.

2) Vierordt's Tabellen S. 51 und 52.

3) Vierordt's Tabellen S. 51 und 52.

4) Vierordt's Tabellen S. 94.

Vorderwand . . . . .	16—19 cm,
Seitenwand . . . . .	32 „
hintere Wand . . . . .	27—30 „
Brustumfang <sup>1)</sup> . . . . .	82—89 „

Als erweiterungsfähig dürfte wohl der vordere halbe Brustumfang zu betrachten sein, und demnach würde sich die Oberfläche dieses Teiles berechnen zu: 24 (Mittel aus der Länge der Vorder- und Seitenwand)  $\times$  43 = 1032 qcm.

Ich habe die Oberfläche des bei der Inspiration bewegten Teiles meiner eigenen Brustwand ermittelt, indem ich die Vorderfläche meiner Brust nach abwärts bis zum Rippenbogen, die beiden Seitenflächen nach rückwärts bis zum Rande des *M. latissimus dorsi* mit weichem Papier belegte, welches ich so zerschnitt, dass es sich an den Thorax möglichst eng anpasste. Aus diesem Papier stellte ich ein Rechteck her; dessen Flächeninhalt beträgt fast genau 1000 qcm. Des Vergleiches halber füge ich hinzu: Ich bin 32 Jahre alt, 161 cm gross, 63 kg schwer.

Ausserdem scheint auch der intraabdominale Druck von Donders mit 10 mm Hg zu hoch veranschlagt zu sein. An Hunden fand ihn Haven Emerson<sup>2)</sup> zu 2—45 mm H<sub>2</sub>O, je nach dem Tonus der Bauchmuskulatur, jedoch stets positiv, im Maximum gleich 5 mm Hg. Setzt man aber in Donders' Berechnungen für die exkursionsfähige Brustfläche statt 20 bloss 10 qdem und für den interabdominalen Druck statt 10 bloss 5 mm Hg ein, so bleibt als maximale Inspirationskraft bloss  $(10 \times 0,72 + 3,5 \times 0,77)$  cdem Hg = 9,895 cdem Hg = 135 kg, also um fast 100 kg weniger als Donders berechnet hatte; doch beruht auch diese Berechnung auf willkürlichen Annahmen.

Daher scheint mir die Angabe der Kraft der Atemmuskulatur pro Quadratcentimeter der von ihr gegen den äusseren Druck bewegten Fläche zweckdienlicher als der Versuch einer Berechnung der Kraft der gesamten Inspirations- bzw. Exspirationsmuskulatur zu sein.

Das Prinzip aller bisherigen Untersuchungen über die Kraft der Inspirationsmuskulatur besteht darin, dass die Grösse des negativen Druckes bestimmt wird, welchen die Inspirationsmuskulatur bei

1) Vierordt's Tabellen S. 96.

2) Zentralbl. f. Physiol. Bd. 21. S. 166. 1908.

äusserster Anstrengung innerhalb des nach aussen zu abgeschlossenen Thorax zu erzielen vermag. Wenn Donders den mittleren maximalen Inspirationszug der Atemmuskeln annähernd zu 60 mm Hg angibt, so heisst dies, dass seine Versuchsperson imstande ist, mit Hilfe ihrer Inspirationsmuskulatur den allseitig geschlossenen Thorax aus seiner Ruhestellung um soviel zu erweitern, dass der intrapulmonale Druck um 60 mm kleiner ist als der äussere Luftdruck. Beträgt letzterer 760 mm, so wurde der intrapulmonale Druck durch die Kraft der Atemmuskulatur im Verhältnisse  $700 : 760 = 35 : 38$  verringert. Wäre das Nasenloch der Versuchsperson statt mit einem gewöhnlichen Hg-Manometer mit einem Barometer verbunden worden, so wäre letzteres während der Inspiration von 760 auf 700 mm gesunken. Man kann die Kraft der Inspirationsmuskeln auch unter Beibehaltung des normalen intrapulmonalen Druckes ermitteln, indem man die Inspirationsmuskulatur statt mit einem negativen Druck von innen her mit einem positiven Druck von aussen her so lange belastet, bis sie nicht mehr imstande ist, den in Expirationsstellung befindlichen Thorax zu erweitern, d. h. bis keine Inspiration mehr möglich ist. Unerlässliche Bedingung dazu ist, dass der Thorax von allen Seiten her gleichmässig belastet werde, dass also auch auf dem Zwerchfell der gleiche Überdruck laste wie auf der äusseren Thoraxwand.

Dies kann experimentell in der Weise erreicht werden, dass man die Versuchsperson, welche gleichzeitig Luft von atmosphärischem Drucke ein- und in solche ausatmet, so tief unter Wasser bringt, bis infolge des vom Wasser gelieferten Überdruckes keine Inspiration mehr möglich ist. Dabei kann man auch die Abnahme der Atmungsgrösse mit der Zunahme des auf der Thoraxwand lastenden Überdruckes prüfen.

#### Versuchsordnung.

Solche Versuche habe ich im Sommer 1910 in dem  $3\frac{1}{2}$  m tiefen Becken der k. k. Militärschwimmschule in Wien ausgeführt. Ich bin dem Leiter derselben, Herrn k. u. k. Major Hans Ledl, für die Überlassung der Schwimmschule zu meinen Versuchen und für die überaus freundliche Unterstützung der letzteren durch Zuweisung von Hilfskräften und Depoträumen zur Aufbewahrung meiner Apparate zu grossem Danke verpflichtet.

Die Versuchsperson wurde entweder in horizontaler oder in vertikaler Lage bis zu einer bestimmten Tiefe passiv unter Wasser

gebracht und atmete dabei mit Hilfe eines Respirationsventiles durch zwei Schläuche unter atmosphärischem Druck aus und ein. Würde die Versuchsperson durch ein und denselben Schlauch aus- und einzuatmen versuchen, so würde sie ihre eigene verdorbene Expirationsluft wieder einatmen und fast ebenso rasch ersticken, als ob sie gar nicht atmete. Deshalb ist die Trennung der Expirations- und Inspirationsluft nötig.

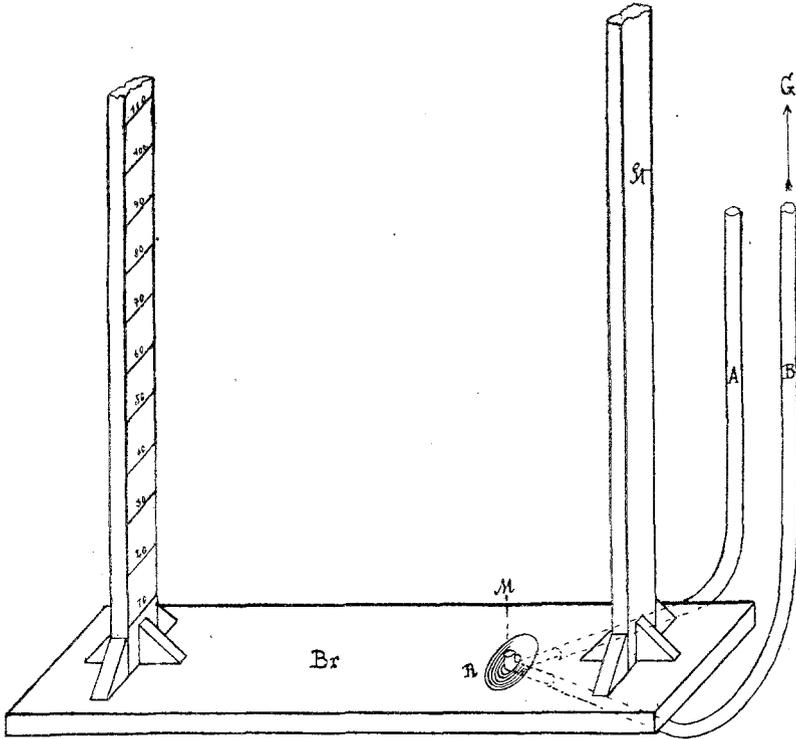


Fig. 1.

Die Versuchsanordnung für die horizontale Lagerung der Versuchsperson zeigt Fig. 1, für deren vertikale Lagerung Fig. 2 (I von vorne, II von der Seite). Die beiden Schläuche A und B stehen in Verbindung mit einem Mundstücke (Fig. 1 und 2 M und Fig. 3), welches zur Verhinderung des Rostens aus Alpaca verfertigt und aus drei einzölligen Röhren zusammengesetzt ist. Zwei derselben (Fig. 3  $R_1$  und  $R_2$ ) stossen unter einem spitzen Winkel zusammen; diese sind einerseits zur Verbindung mit den Schläuchen, andererseits zur Aufnahme der Ventile bestimmt. Das dritte Rohr ( $R_3$ )

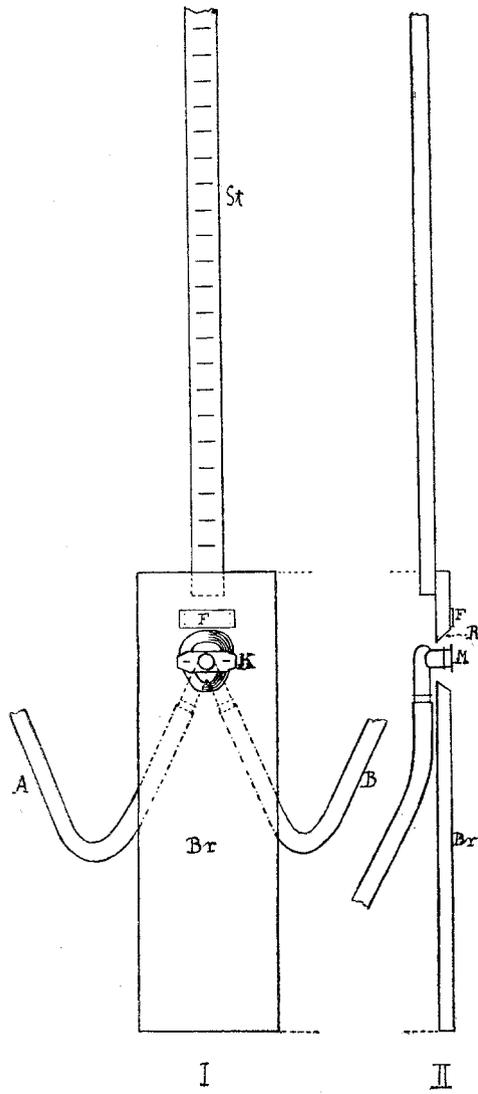


Fig. 2.

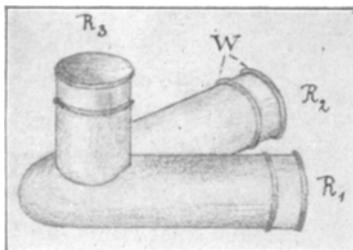


Fig. 3.

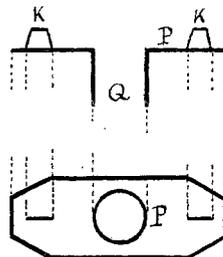


Fig. 4.

steht senkrecht zur Ebene der beiden anderen und dient zur Verbindung mit einem Kautschukmundstück. Diese drei Röhren, deren jede 5 cm lang ist, sind hart zusammengelötet und tragen Wülste (*W*) zur festeren Verbindung mit den Schläuchen. Das Kautschukmundstück ist in Fig. 4 im Aufrisse und Durchrisse dargestellt; es besteht aus einer durchbrochenen Kautschukplatte (Fig. 4 und 5 *P*) mit einem Ansatzschlauchstück (Fig. 4 und 5 *Q*). Letzteres wird, wie Fig. 5 zeigt, über das metallene Röhrenstück *R*<sub>3</sub> geschoben. Die Kautschukplatte *P* wird zwischen Wangen bzw. Lippen und Zahnreihen genommen; sie trägt zwei Kautschukansätze (Fig. 4 und 5 *K*), in die sich die Versuchsperson einbeißt, wodurch ein sicherer, wasserdichter Verschluss zustandekommt. Ähnlicher Kautschukmundstücke hat man sich in der Taucherei schon seit langer Zeit bedient.

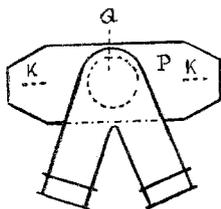


Fig. 5.

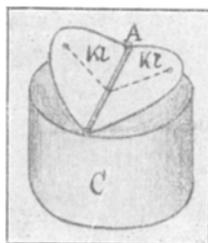


Fig. 6.

Als Ventile verwendete ich Klappen<sup>1)</sup> aus dünnstem Blech (Fig. 6 *KL*), welche um eine Achse (*A*) drehbar sind; letztere ist im Durchmesser eines kurzen Blechzylinders (*C*) befestigt, auf dessen Rande die Ventilkappen aufschlagen. Durch die Atmung werden sie in der in Fig. 6 gezeichneten Weise gehoben; sie spielen so leicht, dass man, in freier Luft durch die Ventile atmend, keinerlei Anstrengung verspürt. Für die Rückkehr der Ventile zu ihrer Ruhelage sorgt ein feiner Kautschukfaden (in Fig. 6 punktiert), welcher über die untere Seite der beiden Klappen quer über die Achse hinweg gespannt ist. Zu seiner Befestigung an den Klappen wird er durch feine Löcher derselben durchgezogen und dann an beiden Enden geknüpft. Im Inspirationsschlauch öffnen sich die Klappen natürlich nach innen, im Expirationsschlauch nach aussen.

1) Angefertigt von Herrn Universitätsmechaniker L. Castagna in Wien.

Zum Vergleiche habe ich auch noch ein anderes Ventil versucht, welches in Fig. 7 skizziert ist<sup>1)</sup>. Dieses unterscheidet sich von dem beschriebenen Metallklappenventil einerseits durch die Verwendung bischofmützenförmiger Zipfelklappen aus dünnstem Kautschuk (Fig. 7,  $V_i$  = Inspirations-,  $V_a$  = Expirationsventil), andererseits durch die Anbringung eines Speichelfängers ( $Sp$ ), welcher das Rückfliessen des Speichels und Kondenswassers bei jeder Stellung des Mundstückes, also auch dann, wenn der Speichelfänger nach aufwärts sieht, verhindert.

Die Schläuche sind einen Zoll dick und zum Schutze gegen Knickung und Eingedrücktwerden durch den Wasserdruck durch Spiralfedern und Leinwandeinlagen gestützt so wie alle Taucherschläuche. Der eine der beiden Schläuche mündet frei an der Wasseroberfläche,

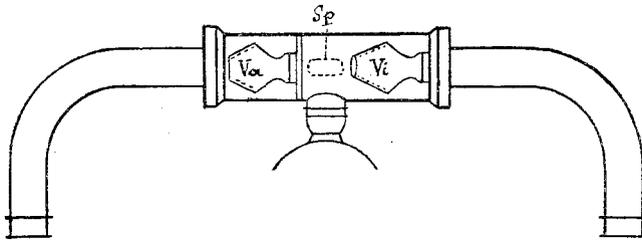


Fig. 7.

der andere steht mit einer Zuntz'schen Gasuhr<sup>2)</sup> in Verbindung, welche die jeweilige Atmungsgrösse anzeigt. So konnte einmal die Menge der inspirierten, ein anderes Mal die der expirierten Luft gemessen werden, je nach dem Schlauche, der mit der Gasuhr verbunden wurde.

Die Nase der Versuchsperson wird durch einen federnden Klemmer mit gepolsterten Quetschplatten verschlossen, so wie er in der Taucherei ebenfalls schon längst im Gebrauche ist. Erzählt doch schon v. Hesslin<sup>3)</sup>, dass sich die persischen Nackttaucher, Araber

1) Angefertigt von Firma Neupert in Wien, VIII., Bennoplatz.

2) Siehe R. Tigerstedt, Handb. d. physiol. Methodik Bd. 2 2. Abt. S. 31. 1908. Es ist dies eine trockene, transportable Experimentier-Gasuhr der Firma S. Elster in Berlin. Zuzufolge der besonderen Konstruktion des Instrumentes drehen sich die Zeiger mit äusserst geringer Reibung, und es ist daher an der abgelesenen Atmungsgrösse nur eine geringe Korrektur anzubringen, entsprechend der Lufttemperatur und -Strömungsgeschwindigkeit. Diese Gasuhr hat mir nebst anderen Behelfen Herr Professor Dr. Arnold Durig geliehen, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen Dank sage.

3) Zit. nach Heller, Mager und H. v. Schrötter, Luftdruckkrankheiten. S. 4. 1900.

und Neger, ein elastisches Hornstück auf die Nase setzten, um diese während des Tauchens geschlossen zu halten.

Soll die Versuchsperson unter Wasser gebracht werden, so umklammert sie das Stützbrett (Fig. 1 und 2 *B<sub>r</sub>*) mit den Armen und nimmt das Kautschukmundstück (Fig. 2 *K*) in den Mund; das mit jetzterem zusammenhängende Metallstück (Fig. 1 und 2 *M*) ragt durch ein Loch von der hinteren Seite des Brettes nach vorne und ist ebenso wie die mit ihm verbundenen Schläuche an jenem unverschieblich befestigt. Der Rand des Loches (Fig. 1 und 2 *R*) ist kegelförmig abgeschragt, damit die Versuchsperson das Mundstück besser fassen kann. Für die Stirne ist dort, wo sie auf dem Brette aufliegt, ein dicker Filzstreifen (Fig. 2 *F*) als Polster angebracht. Bei horizontaler Lagerung der Versuchsperson (Fig. 1) werden an jedem Ende des Brettes, bei vertikaler Lagerung der Versuchsperson an einem Ende (Fig. 2) eine 4 m lange Stange (Fig. 1 und 2 *St*) befestigt, deren eine eine wasserbeständige Einteilung in Dezimetern trägt. Mit Hilfe dieser Stangen wird das Brett mit der Versuchsperson bis zur gewünschten Tiefe unter Wasser getaucht. Würden die Schläuche, ohne an der Unterseite des Brettes befestigt zu sein, direkt zum Munde der Versuchsperson führen, so hätte diese den Zug derselben bei jeder Bewegung unangenehm zu verspüren, und es würde ihr sicher das Mundstück aus dem Munde gerissen werden.

Ursprünglich wurde die Versuchsperson an das Brett angeschnallt; wegen der Gefährlichkeit der Versuche zogen wir es aber vor, uns selbst am Brette anzuhalten, um gegebenen Falles, den Apparat im Stiche lassend, schwimmend an die Oberfläche zu gelangen. Letzteres geschah aber nur ausnahmsweise, weil dabei Wasser in die Schläuche und Ventile eindrang, welches unter Zeitverlust erst wieder vollständig entleert werden musste. Die Versuchsperson hatte stets eine Notleine in der Hand, deren Zug den am Ufer stehenden Gehilfen das Zeichen gab, die Versuchsperson herauszuziehen.

Der Hergang war bei diesen Versuchen folgender: Nachdem einer der beiden Schläuche mit der Gasuhr verbunden war, legte sich die Versuchsperson auf das Brett, setzte den Kneifer auf die Nase, fasste das Kautschukmundstück und atmete nun ohne Mühe durch die Respirationsvorrichtung. Sie nahm die Notleine in die Hand und gab dann, sobald sie sich dazu bereit fühlte, ein Zeichen zum Beginne des Versuches. Darauf wurde sie von zwei Hilfspersonen,

deren jede eine Stange (Fig. 1 und 2 St) fasste, ins Wasser geschoben und auf ein vom Experimentator gegebenes Zeichen bis zur gewünschten Tiefe untergetaucht. Ein dritter Gehilfe merkte mit einer Stoppuhr die Dauer des Aufenthaltes in der bestimmten Tiefe, ein vierter hatte die wichtige Aufgabe, die Atmung der Versuchsperson an der Gasuhr zu kontrollieren und das Volumen der jedesmal ein- bzw. ausgeatmeten Luft (je nachdem Inspirations- oder Expirationsschlauch mit der Gasuhr verbunden war) einem fünften Gehilfen anzugeben, der es notierte. Der Experimentator selbst hielt das freie Ende der Notleine und überwachte das Ganze. Ausser dem Experimentator und der Versuchsperson waren somit zur richtigen Ausführung dieser Versuche noch fünf Leute nötig. Vielfache Mithilfe verdanke ich auch dem badenden Publikum, welches uns mit Ernst und Eifer unterstützte.

Es kam mir bei diesen Versuchen hauptsächlich auf die Beobachtung der Respiration an; bezüglich der Zirkulation musste ich mich damit begnügen, den Puls der Versuchsperson nach dem Auftauchen zu tasten. Ich habe es wohl oft versucht, das Herz derselben unmittelbar nach dem Auftauchen zu auskultieren und zu perkutieren, es war aber begreiflicherweise in der Schwimmschule dazu viel zu viel Lärm. Sehr wichtig wäre es gewesen, den Puls der Versuchsperson während ihres Aufenthaltes unter Wasser zu kontrollieren. Dies hätte aber die Beschaffung einer richtigen Taucherausrüstung für einen mit der Versuchsperson unter Wasser zu sendenden Arzt nötig gemacht und musste daher unterbleiben.

Eine besondere Erschwerung der Versuche brachte angesichts des Umstandes, dass die Versuchsperson stets mehrere Minuten bis zu einer Viertelstunde nackt und ganz unbeweglich im Wasser oder am windigen Ufer liegen musste, die Kälte des Sommers 1910 mit sich.

Die ersten Vorversuche zur annäherungsweise Orientierung über die Kraft unserer Inspirationsmuskulatur stellte ich im Juni 1910 an. Die Versuchsperson wurde an ein hölzernes, mit Gewichten hinlänglich belastetes Kreuz gebunden und, durch die Respirationsschläuche atmend, in aufrechter Körperlage vorsichtig so tief ins Wasser versenkt, wie sie es vertrug.

Erste Versuchsperson war Herr stud. med. D. Danetschek. Er gab sofort das Zeichen mit der Notleine, da es ihm, wie er

später angab, gleich anfangs, als er kaum unter Wasser gebracht worden war, unmöglich erschien, zu atmen. Nachdem er sich aber mit grosser Energie darin geübt hatte, konnte man ihn für wenige Sekunden bis zu einer solchen Tiefe versenken, dass sich sein unterer Rippenbogen etwa  $1\frac{1}{2}$  m unter Wasser befand.

Nahezu ebenso erging es der zweiten Versuchsperson, Herrn Veterinärmediziner Prochaska, einem ausgezeichneten Schwimmer und Taucher, der sich mit grosser Zuversicht, an das Tauchen in ein paar Meter Tiefe gewöhnt, ins Wasser versenken liess. Auch er gab, als wir ihn rascher sinken liessen, sofort das Zeichen mit der Notleine und kam sehr erschöpft an die Oberfläche.

Nachdem ich mich selber von der ausserordentlichen Schwierigkeit, unter den gegebenen Bedingungen in ganz geringer Tiefe zu atmen, und von der Unmöglichkeit, dies in grösserer Tiefe zu tun, überzeugt hatte, ging ich daran, die Atemgrösse der Versuchsperson zu ermitteln, wenn sie allmählich in immer grössere Tiefen gebracht wurde, sowie die Abhängigkeit der Atemgrösse von der Dauer des Aufenthaltes in einer gewissen Tiefe zu bestimmen, und zwar sollte dazu die Versuchsperson einmal horizontal, ein andermal vertikal im Wasser schweben, und zwar in letzterem Falle das eine Mal mit dem Kopfe nach aufwärts, das andere Mal mit dem Kopfe nach abwärts.

Für die Versuche in horizontaler Lage wählte ich die in Fig. 1, für die Versuche in vertikaler Lage die in Fig. 2 gezeichnete Anordnung. Letztere wurde aus der in Fig. 1 dargestellten zusammengesetzt.

Für die Bestimmung des von der Versuchsperson beim Atmen zu überwindenden Wasserdruckes sind die Gesetze der Hydromechanik maassgebend.

Der auf der Thoraxwand lastende Druck ist nach dem Stevin-Pascal'schen Gesetze gleich dem Gewichte einer Wassersäule, deren Grundfläche gleich ist der Oberfläche des im Wasser befindlichen Teiles des Körpers, und deren Höhe gleich ist dem Abstände des Schwerpunktes der gedrückten Fläche vom Niveau des Wassers. Es ist nicht möglich, den jeweiligen Schwerpunkt der unter Wasser befindlichen Thoraxoberfläche (inkl. Zwerchfell) mathematisch zu bestimmen; derselbe wechselt überdies mit der Körperlage auch seine Lage im Raume.

Eine annäherungsweise Ermittlung des Abstandes des Schwerpunktes der vom Wasser gedrückten Thoraxwand vom Wasserspiegel

gestatten aber die modernen Taucherapparate, die Skaphander und die Apparate nach Rouquayrol-Denayrouze. Erstere Apparate werden gegenwärtig in der englischen, letztere in der Marine der übrigen Staaten Europas verwendet. Der Apparat von Rouquayrol und Denayrouze ist durch einen Luftdruckregulator gekennzeichnet, der die Gestalt eines eisernen Tornisters hat und vom Taucher am Rücken getragen wird. Dieser Regulator enthält ein Reservoir mit komprimierter Luft, aus welchem der Taucher atmet; und zwar erhält er bei jeder Inspiration Luft von einem Drucke, welcher gleich dem Wasserdrucke auf der durch eine Kautschukplatte verschlossenen oberen Wand des Regulators ist. Liegt daher diese höher als der Schwerpunkt der gesamten Thoraxoberfläche (soweit sie unter Wasser ist), so erhält der Taucher eine Luft von zu geringem Drucke: er atmet schwer ein. Liegt die Kautschukplatte tiefer als der Schwerpunkt der vom Wasser gedrückten Thoraxwand, so atmet der Taucher Luft von einem Drucke, welcher grösser als der auf seinen Thorax wirkende Wasserdruck ist: er atmet auffallend leicht ein. Sobald die Kautschukplatte in der Höhe des Schwerpunktes der Thoraxwand liegt, atmet der Taucher normal.

Der Unterschied zwischen den drei erwähnten Fällen ist, wie ich mich gelegentlich meiner Studien in der Taucherschule unserer Kriegsmarine zu Pola selbst überzeugt habe, ein sehr auffallender.

Am Skaphander-Apparate wird der Druck der Respirationsluft durch ein Luftauslassventil reguliert, das sich am Taucherhelm in der Höhe des Ohres des Tauchers befindet. Der Druck der Respirationsluft wäre daher gleich dem Wasserdruck in der Höhe des Ohres des Tauchers. Das wäre ein viel zu niedriger Druck; deshalb kann das Luftauslassventil durch eine vom Taucher eigenhändig einstellbare Spiralfeder fester verschlossen werden, so dass es sich nur dann öffnet, wenn der Druck der Luft im Helm grösser ist als der Wasserdruck in der Höhe des Luftauslassventils. Um die Druckhöhe der Luft im Taucheranzug genau zu bestimmen, hat J. S. Haldane<sup>1)</sup> das Luftauslassventil nicht direkt am Taucherhelm, sondern an einem mit diesem verbundenen Schlauche befestigt, so dass er den Druck seiner Respirationsluft statt durch Anziehen der Feder des Ventils durch verschiedene Höhenlage des letzteren

---

1) Siehe: Mitteilungen aus dem Gebiete des Seewesens Bd. 37 Nr. 10, 11, 12. 1909.

regulieren konnte. So kann man auch mit dem Skaphander die Lage des Schwerpunktes der Thoraxwand annähernd ermitteln, indem man diejenige Lage des Ventiles sucht, bei der man normal atmet. Auf diese Art findet man, dass der Schwerpunkt der Thoraxoberfläche etwas über den Brustwarzen liegt. Für die Bestimmung des auf dem Thorax lastenden Wasserdruckes ist daher bei aufrechter Stellung der ganz unter Wasser befindlichen Versuchsperson die Distanz der Brustwarzen vom Niveau maassgebend. Zu der an der Teilstange abgelesenen Distanz des oberen Stirnrandes vom Niveau sind somit zur Angabe des auf dem Thorax lastenden Druckes noch ca. 40 cm zu addieren.

Bei horizontaler Lage der Versuchsperson liegt der Schwerpunkt der Thoraxoberfläche bezüglich des Körpers natürlich an derselben Stelle. Da er in der Mitte des sagittalen Brustdurchmessers liegt, welcher nach H. Vierordt's Tabellen<sup>1)</sup> durchschnittlich 16—18,5 cm beträgt, so ist der auf dem Thorax lastende Wasserdruck gleich der Thoraxoberfläche (inkl. Zwerchfell) mal (dem Abstände der Unterfläche des Körpers minus  $8\frac{1}{2}$  cm).

Von meinen Versuchspersonen war mir zur systematischen Fortsetzung meiner Versuche nur Herr stud. phil. Franz Härtl geblieben, ein gesunder zwanzigjähriger Jüngling von 164 cm Körperlänge und 67,5 kg Gewicht, der sich mit Selbstaufopferung und unermüdlich im Ertragen der vielen mit diesen Versuchen verbundenen Unannehmlichkeiten übte. Und diese Übung erwies sich deshalb als notwendig, weil die ausserordentlich peinlichen Gefühle, welche der Aufenthalt unter Wasser unter den gegebenen Umständen mit sich brachte, auch auf die Energie, mit der die Inspirationsmuskeln innerviert wurden, lähmend wirkten. Wir nahmen die Versuche meist abwechselnd vor, indem einmal Härtl, dann wieder ich untertauchten. Die Zwischenpausen zwischen den einzelnen Versuchen wurden zur Aufzeichnung der Versuchsergebnisse und zur Instruktion unserer vielfach wechselnden Gehilfen verwendet. Damit ging der grösste Teil unserer Versuchszeit verloren.

Der maximale Wasserdruck, welchen die Inspirationsmuskulatur noch zu überwinden vermochte, ergab sich aus der Bestimmung der grössten Tiefe, in welcher die Versuchsperson atmen konnte. Letztere

---

1) H. Vierordt's anatomische, physiologische und physikalische Daten und Tabellen, 3. Aufl., S. 98. 1906.

wechselte aber nicht nur an verschiedenen, sondern sogar am gleichen Versuchstage beträchtlich. Härtl's Inspirationskraft erwies sich am grössten, wenn sich dieser zuerst an das Atmen in geringer Tiefe gewöhnte und dann nach entsprechenden Erholungspausen allmählich tiefer tauchte. Während er unter Wasser war, wurde seine Atmung ununterbrochen an der Gasuhr kontrolliert, und er wurde, auch ohne ein Zeichen mit der Nodeline gegeben zu haben, herausgezogen, sobald die Atmung zu stocken schien. Die grösste Tiefe, in der Härtl bei horizontaler Lage überhaupt noch zu atmen imstande war, betrug 192 cm.

Die zweite Frage, die ich mir stellte, war die, wie sich die Atmungsgrösse während des Aufenthaltes in einer bestimmten Wassertiefe ändere.

Die Beantwortung dieser Frage wurde dadurch erschwert, dass die Atmungsgrösse schon in ganz geringer Tiefe ununterbrochen schwankte: nach einigen tiefen Atemzügen folgten wieder ein paar seichte rasch hintereinander, dann wieder ein tiefer und so fort. Schliesslich aber wurde als Zeichen der Ermüdung die Atmung im ganzen frequenter und seichter, und dann beehrte die Versuchsperson auch bald heraufgezogen zu werden. Es erwies sich mit Rücksicht auf die Unregelmässigkeit der Atmung unter Wasser als vorteilhafter, die Menge der während der ganzen Dauer des Aufenthaltes unter Wasser geatmeten Luft und die Zahl der Atemzüge anzugeben, woraus sich ein Mittel für die Atemgrösse in einer bestimmten Tiefe finden lässt. Die Atmung war nämlich in grösserer Tiefe so frequent geworden, dass man die Grösse der einzelnen Atemzüge an der Gasuhr nicht mehr ablesen konnte.

Die folgende Tabelle, eine genaue Abschrift des Versuchsprotokolles, enthält das Ergebnis desjenigen Versuchstages, an welchem Härtl seine maximale Leistung aufwies. Von dem abgelesenen Abstände des Brettes vom Wasserspiegel sind, wie oben auseinandergesetzt, bei der Berechnung des überwundenen Wasserdruckes 8,5 cm abzuziehen.

In geringer Tiefe waren einzelne Atemzüge noch von normalem Umfange, die Aufzeichnung derselben fehlt in meinem Protokolle.

Die Tabelle (S. 250) lehrt, dass der auf der äusseren Thoraxwand lastende Überdruck eine sehr beträchtliche Verminderung der Tiefe der einzelnen Atemzüge unter gleichzeitiger Steigerung ihrer Frequenz zur Folge

Tabelle I.

Versuchsperson: stud. phil. F. Härtl. 20. Juli 1910. Versuchsperson in horizontaler Lage.

Abstand des Brettes vom Wasserspiegel cm	Dauer des Aufenthaltes in der angegebenen Tiefe	Zahl der Atemzüge	Gesamtvolumen der dabei geatmeten Luft l	Zahl der auf die Minute entfallenden Atemzüge	Durchschnittliche Grösse jedes einzelnen Atemzuges
60	3 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> Min.	—	—	—	—
80	2 "	—	—	—	—
90	1 "	30	—	30	—
100	30 Sek.	—	—	—	—
110	24 "	24	—	60	—
120	12 "	15	—	75	—
130	10 "	17	0,5	102	0,03
140	10 "	14	0,4	84	0,03
150	6 "	10	0,4	100	0,04
160	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "	8	0,1	137	0,0125
170	5 "	8	0,6	96	0,075
180	4 "	6	0,3	90	0,05
190	4 "	11	0,48	165	0,044
200	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "	5	0,08	120	0,016

hat. Die durchschnittliche Atemgrösse blieb schon in geringer Tiefe unter der Grösse des von den Bronchien, der Trachea, der Mundhöhle und dem Mundstück bis zum Respirationsventil gebildeten schädlichen Raumes weit zurück; beträgt doch die Grösse des schädlichen Raumes der menschlichen Luftwege allein schon 140 ccm!<sup>1)</sup> Eine solche Atmung bleibt infolgedessen wirkungslos.

Das Auffallendste an den mitgeteilten Versuchsergebnissen ist aber, dass der Aufenthalt in einer Tiefe von mehr als 1 m nur äusserst kurz, wenige Sekunden lang, ertragen wird, wenn die Versuchsperson zugleich Luft von atmosphärischem Drucke atmet, während sie unter normalen Umständen, am Lande, den Atem mindestens eine Minute anzuhalten vermag. Die Unmöglichkeit, länger als einige Sekunden in einer Tiefe von mehr als einem Meter unter Wasser zu verweilen, wenn dabei in der Lunge atmosphärischer Luftdruck besteht, kann daher nicht auf Atemnot zurückgeführt werden. Dies geht auch daraus hervor, dass die Zeit, während welcher Härtl den

1) Tigerstedt, Lehrbuch der Physiologie, 5. Aufl., Bd. 1 S. 420. 1909.

Aufenthalt unter Wasser aushielt, um so kürzer war, je tiefer er sich unter Wasser befand. Dies ist nicht etwa durch Steigerung der Dyspnöe mit der des extrathorakalen Überdruckes zu erklären, da ja die Atmung schon in geringer Tiefe wirkungslos war, indem die einzelnen Atemzüge von 130 cm Tiefe an stets unter das Ausmaass des schädlichen Raumes sanken.

Die Versuchsperson wurde nicht nur durch Atemnot, sondern auch durch ein sehr heftiges Beklemmungsgefühl gezwungen, schon nach wenigen Sekunden das Zeichen mit der Notleine zu geben.

In vertikaler Lage, den Kopf nach abwärts, hat Härtl bloss an einem Nachmittage (23. Juli) getaucht. Das Maximum wurde dabei mit einem Tiefstande der Stirne von 160 cm unter dem Wasserspiegel erreicht, welcher Zustand drei Sekunden ausgehalten wurde. Doch empfand Härtl bereits bei einem Tiefstande der Stirne von 80 cm eine ausserordentliche Erschwerung der Atmung. Diese Versuche waren sehr erschöpfend; Härtl hatte auch noch den ganzen nächsten Tag starke Kopfschmerzen.

Auch ich habe Versuche in vertikaler Lage mit dem Kopfe nach abwärts schwieriger und weit unangenehmer als jene in horizontaler Lage gefunden.

Leichter erwiesen sich die Versuche in vertikaler Lage mit dem Kopfe nach aufwärts. Unerträgliches Beklemmungsgefühl empfand Härtl bei solchen Versuchen (am 25. Juli), sobald seine Stirne 90 cm unter Wasser war, also bei einem extrathorakalen Überdrucke von etwa 130 cm Wasser. Als Härtl einmal sehr rasch bis zu 150 cm unter Wasser getaucht wurde, sistierte seine Atmung vollständig, und er zog auch sofort die Notleine.

Hierauf wiederholte ich (am 25. Juli) die letzterwähnten Versuche; ich liess mich in vertikaler Stellung, den Kopf nach aufwärts, unter Wasser tauchen, bis die Stirne 1 m unter Wasser war, wobei also der auf dem Thorax lastende Wasserdruck etwa 140 cm betrug. Da ich in dieser Tiefe noch einige Atemzüge tun konnte, so liess ich mich das nächste Mal sogleich tiefer unter Wasser tauchen, bis meine Stirn 160 cm unter dem Wasserspiegel stand, wobei also auf dem Thorax ein Wasserdruck von 2 m lastete. Ich bemerkte, dass mir in dieser Tiefe die Inspiration allerdings nahezu unmöglich war, verweilte aber dennoch 18 Sekunden, indem ich gleichzeitig mit äusserster Anstrengung zu inspirieren versuchte, was aber nur anfangs ganz geringe Ausschläge des Zeigers der Gasuhr zur Folge hatte.

Dabei hatte ich wieder, so wie auch in früheren Versuchen, das Gefühl, als ob ich erdrückt würde. Ich zog daher die Notleine und wurde sofort heraufgeholt. Ich gelangte bei völligem Bewusstsein an die Oberfläche und sprach mit meiner Umgebung, empfand aber nach wenigen Sekunden unregelmässiges und sehr rasches Herzklopfen; der Puls erwies sich beim Betasten als äusserst frequent (über 200), arrhythmisch und sehr klein. Es bestand echtes Delirium cordis. Ich blieb darauf zwei Stunden am Boden liegen, ohne jedoch subjektive Beschwerden zu verspüren, und kehrte dann heim, wobei sich mein Zustand zusehends verschlechterte, weshalb ich zu Bette ging, Eisbeutel aufs Herz legte und Ärzte holen liess. Herr Privatdozent Dr. v. Jagić und Herr Dr. Förster, Assistent an der dritten medizinischen Klinik, stellten um Mitternacht eine Verbreiterung der relativen und absoluten Herzdämpfung um je einen Querfinger nach rechts und nach links fest, worauf sie ihre Diagnose: Dilatio cordis begründeten. Vorher hatte ich ja normale Dämpfungsgrenzen gehabt. Um zwei Uhr morgens begann das Herz wieder in normalem Rhythmus zu schlagen. Die Verbreiterung der Herzdämpfung war am nächsten Morgen ebenfalls verschwunden; nach fünf Tagen stand ich wieder auf und ging an die gewohnte Arbeit, was mir aber nur mit grosser Mühe möglich war, da ich sehr rasch ermüdete. Am Morgen des sechsten Tages nach dem Unfälle konstatierten meine beiden Ärzte abermals Verbreiterung der Herzdämpfung, der Puls war wieder klein und arrhythmisch. Ich musste daher wieder zu Bett gehen. Auch Herr Professor Dr. Chvostek hatte die Freundlichkeit mich zu besuchen und bestätigte die Diagnose Dilatio cordis. Darauf musste ich sieben Wochen im Bette verbleiben, und auch jetzt ist mein Herz in auffallendem Gegensatz zu meinen früheren sportlichen Leistungen labil und grösseren Anstrengungen noch nicht gewachsen.

Trotz des kühnen Anerbietens Härtl's, die Versuche fortzusetzen, schloss ich diese hiermit aus begrifflichen Gründen ab. Waren doch die Kopfschmerzen, die Härtl nach dem Tauchen mit nach abwärts gewendetem Kopfe empfunden hatte, wahrscheinlich auch schon als Anzeichen einer vorübergehenden Schädigung seines Herzens aufzufassen! Dass Härtl nicht in ebenso hohem Grade geschädigt wurde wie ich selber, ist wohl der stetigen Kontrolle seiner Atmung durch Beobachtung der Gasuhr zu danken, deren Stillstand das Zeichen zum sofortigen Heraufholen der Versuchs-

person gab, welches letzteres leider bei meinem eigenen Versuche unterlassen worden war.

Das Ergebnis der mitgeteilten Experimente ist demnach:

Die grösste Wassertiefe, in welcher unter atmosphärischem Drucke geatmet werden konnte, betrug bei einer Versuchsperson (Härtl) 192, bei der anderen (Stigler) 200 cm. Die maximale Kraft der Inspirationsmuskulatur beträgt somit für Härtl 192 cm Wasser oder 141 mm Hg, für Stigler 200 cm H<sub>2</sub>O oder 148 mm Hg. Diese Werte sind im Vergleiche zu den von Donders (36 bis 74 mm Hg), Hutchinson (76,2 mm Hg), Eichhorst (70 mm Hg), Waldenburg (80—100 mm Hg) gefundenen Werten sehr hoch; bloss E. Rollet fand ähnliche Werte (120—140 mm Hg). Allerdings fällt bei der Inspiration unter Wasser die Hebung des Gewichtes des Thorax durch die Inspirationsmuskulatur weg, da jener im Wasser nahezu schwerlos ist. Die auffallende Übereinstimmung der Maximalleistung beider Versuchspersonen ist wohl auf deren gleichmässige Einübung zurückzuführen.

Eine Berechnung der gesamten Kraft der Inspirationsmuskulatur stösst auf das Hindernis, dass wir die Grösse der bei seichten Atemzügen — und nur um solche handelt es sich bei den hier gefundenen Werten — bewegten Thoraxwand nicht kennen. Es ist ja möglich, dass dabei nur das Zwerchfell nach abwärts rückt und die übrige Thoraxwand nahezu vollständig in Ruhe bleibt.

Die durchschnittliche Tiefe der einzelnen Atemzüge sinkt schon bei einem Überdruck von 1 m Wasser unter die Grösse des schädlichen Raumes der Luftwege.

Der Aufenthalt unter Wasser in mehr als 1 m Tiefe bei gleichzeitiger Atmung unter atmosphärischem Druck, d. h. ein auf dem ganzen Körper lastender extrathorakaler Überdruck von mehr als 1 m Wasser, wird nur wenige Sekunden, also beträchtlich kürzer als vollständige Atemlosigkeit unter normalen Umständen, ertragen; und zwar ist die Dauer des erträglichen Aufenthaltes unter Wasser bei gleichzeitiger offener Verbindung der Lunge mit der Aussenluft um so kürzer, je tiefer sich die Versuchsperson unter Wasser befindet. Dies erklärt sich nicht durch Zunahme der Dyspnöe, da ja die Atmung, wie erwähnt, unter den gegebenen Umständen schon in 1 m Tiefe wirkungslos ist. Zur Erklärung dieses eigentümlichen Verhaltens trägt die Herzdehnung bei, welche Autor nach 18sekundigem Verweilen in einer Tiefe von 2 m Wasser bei gleichzeitiger Respi-

ration unter atmosphärischem Druck erlitt. Offenbar reichte die Kraft des Herzens nicht mehr hin, das Blut gegen den extrathorakalen Überdruck in den grossen Kreislauf zu treiben, so dass es sich im Thorax, in den Lungen und im Herzen selbst anstaute und letzteres dehnte.

Die Überbürdung des Herzens durch den Wasserdruck, welcher sich auf die äussere Oberfläche aller extrathorakalen Gefässe fortpflanzt, scheint mir die Hauptursache zu sein, weshalb der Aufenthalt unter Wasser in mehr als 1 m Tiefe nur wenige Sekunden ertragen wird, wenn gleichzeitig im Thorax äusserer Luftdruck herrscht.

Dies soll in meiner nächsten Arbeit eingehend erwogen werden.

Zum Schlusse spreche ich Herrn Professor A. Durig für seine freundlichen Ratschläge und die leihweise Überlassung verschiedener Apparate meinen herzlichsten Dank aus.

---