

Luftfahrt und Wissenschaft

In freier Folge herausgegeben

von

Joseph Sticker

Schriftleitung und Verwaltung der Stiftungen:

Professor **A. Berson**, Dipl.-Ing. **C. Eberhardt**,
Gerichtsassessor **J. Sticker**, Professor **Dr. R. Süring**,
Wirkl. Geh. Oberbaurat **Dr. H. Zimmermann**

Heft 3

Zur Physiologie und Hygiene der Luftfahrt

Von

N. Zuntz



Berlin

Verlag von Julius Springer

1912

Zur Physiologie und Hygiene der Luftfahrt

Von

Dr. med. N. Zuntz

Professor der Physiologie an der Landwirtschaftlichen Hochschule zu Berlin

Mit 11 Textfiguren



Berlin

Verlag von Julius Springer

1912

ISBN 978-3-7091-5975-0 ISBN 978-3-7091-6009-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-7091-6009-1

Stiftung des
Magdeburger Vereins für Luftschiffahrt, Magdeburg.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Der Arbeitsaufwand beim Fliegen	1
II. Allgemeines und Umgrenzung der Aufgabe	5
III. Die Sinnesorgane in ihrer Beziehung zur Luftfahrt	9
A. Der Haut- und Muskelsinn	10
B. Der Gesichtssinn	13
C. Die mit dem Hörorgan assoziierten Lageempfindungen. Der statische Sinn	13
IV. Bedeutung der Ballongase für die Gesundheit des Luftfahrers	30
V. Einwirkung größerer Höhen auf Kreislauf und Atmung	35
VI. Erscheinungen des Sauerstoffmangels in geringen Höhen	55
VII. Sauerstoffatmung als Mittel zur Erreichung größerer Höhen	57
VIII. Berechnung der höchsten erreichbaren Höhen	60

Wie die ältesten Versuche des Menschen, sich in die Luft zu erheben, den Flug des Vogels zum Muster nahmen, so liegt es auch nahe, zur Ergründung der Einwirkungen des Aufenthalts in der freien Atmosphäre auf unseren Organismus und zur bewußten Anpassung unseres Körpers an diesen Aufenthalt die Organisation des Vogelkörpers zu studieren und uns zu fragen, ob wir daraus Lehren für unser Verhalten in der Luft ziehen können. — Bis jetzt hat uns das Studium des Vogelfluges wesentlich gefördert bei der Konstruktion der Flugzeuge, welche durch mechanische Hilfsmittel die Wirkung der Schwere überwinden, also durch ähnliche Kräfte, wie sie der Vogel entfaltet, den Aufenthalt und die Fortbewegung in der Luft ermöglichen. — Auf diese mechanischen Hilfsmittel des Fliegens beziehen sich aber auch fast alle Unterschiede im Körperbau, welche den Vogel von den Landtieren unterscheiden. Die Besonderheiten seiner Atmung, seines Blutkreislaufs stehen nicht sowohl mit dem Aufenthalt in der Luft an sich als vielmehr mit dem sehr großen Aufwand an Muskelkraft, welchen derselbe nötig macht, und mit den mechanischen Anordnungen, welche diese konzentriert auf die Flügel wirken lassen, in Beziehung. Diese mechanischen Leistungen, für welche unsere Muskulatur weitaus zu schwach wäre, haben wir ja ganz und gar auf die Kraftmaschinen abgeschoben, welche unsere Flugzeuge treiben.

I. Der Arbeitsaufwand beim Fliegen.

Über die zum Fliegen nötige Arbeit ist es schwer, eine exakte Vorstellung zu gewinnen. In den Abhandlungen, welche sich mit dem Arbeitsaufwande des fliegenden Vogels beschäftigen, stoßen wir auf viele Unsicherheiten und Widersprüche. Wer sich mit dieser Frage eingehender beschäftigen will, sei auf die interessante Abhandlung von Prechtel aus dem Jahre 1846 verwiesen: „Untersuchungen über den Flug der Vögel“. Hier finden sich schöne morphologische Studien über den anatomischen Bau des Vogelkörpers und eingehende mechanische Studien über Luftwiderstand und die aus ihm einerseits, dem Bau und der Bewegung der Flügel andererseits sich ableitende Mechanik des Fluges bei verschiedenen Vogelarten. — Eine Fülle wertvollen Materials enthält die im Jahre 1890 erschienene große Monographie von E. J. Marey: „Le vol des oiseaux“. Hier kommt die Momentphotographie in Form von gut ausmeßbaren Serien zu ausgiebiger Verwendung. Bis zu 50 sukzessive Aufnahmen in einer Sekunde liefern das Material, welches in einem Schlußkapitel von Labouret einer eingehenderen mathematischen Analyse unterzogen wird. — Parseval: „Die Mechanik des Vogelfluges“ (Wiesbaden 1889), verwendet schon einen Teil des von Marey in kurzen Mitteilungen veröffentlichten

Materials; er behandelt den Vogelflug mit stetem Ausblick auf die Konstruktion von Flugmaschinen.

Ahlborn: „Zur Mechanik des Vogelfluges“ (Hamburg 1896), hat besonders den Segelflug der Vögel und seine mechanischen Bedingungen untersucht. Er erörtert genau, unter welchen Bedingungen der Vogel durch alleinige Benutzung der Energie des Windes emporsteigen kann. — Die Möglichkeit, fast ganz ohne eigene mechanische Kraft bei geschickter Benutzung des Windes zu fliegen, zeigt, wie schwer es ist, den Energieaufwand des Vogels und in Parallele damit die nötige Kraft der Maschine des Flugzeugs zu berechnen. Der Grenzfall nach oben ist bei unbewegter Luft offenbar dadurch gegeben, daß allein durch die mechanische Verdrängung der unter den Flugflächen befindlichen Luft die Schwere überwunden wird. Die Muskulatur müßte dann in jeder Sekunde eine Arbeit leisten entsprechend der Hebung des Vogelkörpers um 4,9 m, mit anderen Worten, es müßten für jedes Kilogramm Körpergewicht in der Sekunde 4,9 mkg Arbeit aufgewendet werden, um den Körper in der Luft schwebend zu halten. Babinet, der diesen Fall als allgemein gültig für die Berechnung der Flugarbeit ansieht, begegnet mit Recht dem scharfen Widerspruch von Marey (a. a. O. S. 328) und vielen anderen Forschern. Je nach der Stärke des Windes und der Geschicklichkeit, seine Energie zur Hebung des Körpers zu benutzen, wird der Arbeitsaufwand zwischen 0 und 4,9 mkg pro Sekunde schwanken; im Momente des Abfluges vom Boden wird er sicher diesen letzteren Wert noch übersteigen, und das gleiche gilt für den Kampf gegen abwärts gerichtete Luftströmungen.

Aus dieser Betrachtung geht hervor, daß ein Mensch von 70 kg Gewicht, wenn er sich ohne Hilfe des Windes in die Luft erheben will, mindestens eine Sekundenarbeit von $70 \times 4,9 = 343$ mkg = 4,57 Pferdekraften aufwenden müßte. Entsprechend ein Flugzeug, das mit aller Belastung 400 kg wiege, 1960 mkg = 26 PS. Diese Schätzung des minimalen Kraftbedarfs eines Flugzeugs dürfte mit den jetzt zahlreich genug vorliegenden praktischen Erfahrungen leidlich harmonieren. Hiermit ist aber schon die Unmöglichkeit, daß der Mensch mit eigenen Muskelkräften fliege, gegeben. Ich habe vor Jahren die maximale Arbeit, welche ein Mensch durch rasches Bergauflaufen leisten kann, bestimmt; sie beträgt etwa 2 Pferdekraften = 150 mkg; solche Arbeit kann aber nur etwa $\frac{1}{2}$ Min. lang geleistet werden; da 1 mkg 1,3 ccm Sauerstoff erfordert, bedingt sie innerhalb dieser Zeit einen Verbrauch von $1,3 \times 150 \times 30 = 5850$ ccm Sauerstoff, d. h. 48 mal soviel als der Mensch in absoluter Ruhe verbraucht. Unser Atemapparat kann eine solche Sauerstoffmenge nicht herbeischaffen. Wir sind deshalb nicht einmal für ganz kurze Zeit imstande so viel Muskelarbeit aufzuwenden, wie nötig wäre, um uns mit Hilfe eines idealen Flügelapparates in die Luft zu erheben. Dazu kommt, daß unsere Muskeln für die Aufgabe, einen Flügelmechanismus zu betätigen, äußerst ungünstig angeordnet sind, im Gegensatze zum Vogel, bei dem der mächtige, den Schlag des Flügels bewirkende Brustmuskel an dem unbeweglich mit der Wirbelsäule verbundenen Brustbeinkamm eine starre Ursprungsfläche hat und mit seiner ganzen Zugkraft auf den Oberarm, den beweglichen Träger des Flügels, wirkt. Dabei wiegt dieser eine Muskel z. B. beim Rebhuhn 14 Proz., mit seinem Antagonisten, dem Flügelheber, zusammen gar 19 Proz. des Körpergewichts, d. h. die Hälfte des Gewichts der ganzen Muskulatur. — Aus allen vorliegenden Untersuchungen

geht hervor, daß beim Vorhandensein hinreichend großer und gut geformter Flugflächen die zum Fliegen nötige Arbeit proportional der Körpermasse, wahrscheinlich sogar in geringerem Verhältnis als diese wächst. Hiernach würde es kaum eine Grenze der Größe der Vögel geben, wenn die Leistungsfähigkeit der Muskulatur ihrem Gewicht und damit auch dem Gewichte des ganzen Tieres proportional wäre. Dies ist aber nicht der Fall. Im ganzen Tierreich, bei Kaltblütern, wie bei Warmblütern, kann man nachweisen, daß die Intensität der krafterzeugenden Oxydationsprozesse mit der Größe der Organismen abnimmt. Ein Pferd produziert freilich mehr Energie als eine Maus, aber 1 kg Maus bedeutend mehr als 1 kg Pferd. Schon in der Ruhe zersetzen kleinere Organismen auf gleiches Körpergewicht eine viel größere Nährstoffmenge. Der Verbrauch an Nährstoffen, oder, was damit gleichwertig ist, der Verbrauch an Sauerstoff und die Produktion von Wärme resp. äquivalenten Energieformen ist bei verschiedenen Lebewesen dem Quadrat der dritten Wurzel ihres Gewichts proportional. Es gilt also für 2 Tiere, deren Gewichte P und p und deren Sauerstoffverbrauch S und s beträgt, die Proportion

$$S : s = P^{2/3} : p^{2/3}$$

Für den Verbrauch pro 1 kg Körpergewicht aber folgt daraus:

$$\begin{aligned} \frac{S}{P} : \frac{s}{p} &= \frac{P^{2/3}}{P} : \frac{p^{2/3}}{p} \\ &= P^{-1/3} : p^{-1/3} \end{aligned}$$

Es beträgt nun der Verbrauch des 70 000 g wiegenden Menschen pro kg und Stunde = 210 ccm Sauerstoff in absoluter Ruhe; hieraus berechnet sich der eines 20 g wiegenden Finken nach der Proportion:

$$210 : x = 70\,000^{-1/3} : 20^{-1/3}$$

$$x = 3\,188 \text{ ccm Sauerstoff pro 1 kg und 1 Stunde,}$$

d. h. der Finke wird in der Ruhe etwa 3188 ccm O pro Kilogramm aufnehmen, während der Mensch 210 ccm verbraucht. Wir sahen, daß zum Emporsteigen in die Luft 4,9 mkg pro kg und Sekunde oder 17 640 mkg pro Stunde zur Verfügung sein müssen. Nun erfordert nach meinen Untersuchungen, die an Menschen, Pferden, Rindern und Hunden angestellt sind, 1 mkg Arbeit rund 1,3 ccm Sauerstoff. Wir dürfen annehmen daß dies beim Vogel nicht anders ist. Eine stündliche Arbeit von 17 640 mkg würde demnach rund 23 l Sauerstoff erfordern, das ist das 100 fache der Sauerstoffmenge, welche der ruhende Mensch, das 5½ fache von der welche der ruhende Finke verbraucht. Ein Mensch, der sich in lebhaftem Spiel oder beim Bergansteigen nach Behagen tummelt, braucht etwa 5 mal soviel wie in der Ruhe; ein Pferd bei bequemer Arbeit ebenso, bei sehr angestrenzter bis zum 18 fachen. Ein Sperling, der in einem geräumigen Käfig seinem Behagen überlassen ist, braucht nach Regnaults und Reisetts direkten Bestimmungen etwa 7000—10000 ccm O pro kg und Stunde (im Durchschnitt von 24 Stunden, worin die Zeit des Schlafens einbegriffen ist) d. h. sein Verbrauch beim Umherhüpfen im Käfig braucht nicht einmal verdoppelt zu werden, damit er ohne Hilfe des Windes fliegen kann.

Das eben dargelegte Gesetz, wonach die Intensität der kraftliefernden Oxydationsprozesse dem Quadrat der dritten Wurzel des Körpergewichts proportional

ist, bedeutet mit anderen Worten, daß sie der Körperoberfläche proportional ist. Bei geometrisch ähnlichen Figuren, und das sind die verschiedenen Tiere, wenigstens in gewisser Annäherung, ist ja die Oberfläche dem Quadrate, die Masse dem Cubus einer linearen Dimension, etwa der Körperlänge, proportional. Wenn wir Tiere mit sehr gedrungenem Körperbau und kleinen Extremitäten mit langgestreckten, deren Extremitäten und sonstige Anhänge (z. B. die Ohren beim Kaninchen) besonders stark entwickelt sind, vergleichen, fällt freilich der Faktor, mit welchem wir das Quadrat der dritten Wurzel des Gewichts multiplizieren müssen, um die wirkliche Oberfläche zu finden, ziemlich verschieden aus, aber diese Differenzen kommen wenig in Betracht, wenn es sich um sehr kleine und sehr große Tiere handelt. Es ist übrigens noch nicht sicher entschieden, ob die Größe des Stoffwechsels mehr durch die wirkliche Körperoberfläche bestimmt wird oder durch andere Momente, welche dem Ausdruck $P^{2/3}$ proportional sind. Ursprünglich glaubte man, das „Oberflächengesetz“ gelte nur für Warmblüter und es sei bedingt durch den der Körperoberfläche proportionalen Wärmeverlust der Tiere (Bergmann, Rubner, Richet). Man sagte sich, ein Tier, das eine konstante, die Temperatur der Umgebung erheblich übertreffende Eigenwärme hat, kann diese nur erhalten, wenn seine Wärmeerzeugung dem Verluste, d. h. der ausstrahlenden Oberfläche, entspricht. Dies wäre richtig, wenn nicht die Größe der Ausstrahlung je nach der äußeren Temperatur und der Beschaffenheit der Haut (Fettschichten, Haar-, Federkleid) ganz außerordentlich variierte. Der entscheidende Beweis gegen die ausschlaggebende Bedeutung des Wärmeverlustes für die Größe des Minimalstoffwechsels (Erhaltungsumsatzes) der Tiere ist aber die Tatsache, daß das Oberflächengesetz den Stoffwechsel der Kaltblüter (Amphibien, Reptilien, Fische) ebenso wie den der Warmblüter bestimmt. Es müssen also tiefer liegende Ursachen für dieses Gesetz bestehen. v. Hösslin hat eine ganze Reihe solcher nachgewiesen. Von ihnen sei erwähnt die Zunahme des für die Lokomotion mit bestimmter Geschwindigkeit nötigen relativen Energieaufwandes bei kleineren Tieren. Man kann durch die mechanische Analyse der Bewegungen der Extremitäten beim Laufen nachweisen, daß die zur Bewegung der Körpermasse mit bestimmter Geschwindigkeit erforderliche Arbeit nicht proportional dieser Masse, sondern proportional dem Quadrat der Länge der Gliedmaßen wächst, d. h. wieder proportional dem Quadrat der dritten Wurzel des Körpergewichts. Die tatsächliche Richtigkeit dieser Beziehung hat Slowtzoff unter meiner Leitung durch Messung des Sauerstoffverbrauchs laufender Hunde von 4 bis zu 40 kg Gewicht nachgewiesen. — Für die Bewegung der Fische im Wasser hat v. Hösslin die Gültigkeit des Gesetzes abgeleitet, und sicher besteht sie auch beim fliegenden Vogel. Es gibt noch eine ganze Reihe anderer Gründe, welche mitwirken, daß die Leistungen proportional der Oberfläche wachsen. Dazu kommt, daß die Versorgung des Körpers mit Nährmaterial auch um so schwieriger wird, je mehr die Masse des Körpers wächst; die Aufsaugung der Nahrung hängt von der Oberfläche, nicht von der Masse des Darmkanals ab; das zirkulierende Blut hat um so weitere Wege zurückzulegen, ehe es die Kapillaren der Organe erreicht, von denen aus es die Zellen ernährt, je größer das Tier ist. Da nun die Geschwindigkeit des Blutstromes eine gewisse Grenze nicht überschreiten darf, wenn die Arbeit des Herzens nicht ins ungebührliche wachsen soll, braucht der

Blutstrom vom Herzen zu den Kapillaren und von diesen durch die Venen zurück zum Herzen um so mehr Zeit, je größer das Tier ist. Die Zeit eines Blutumlaufs ist, wie Vierordt durch exakte Messungen zuerst nachgewiesen hat, dem Quadrat der dritten Wurzel des Körpergewichts proportional. Da nun die Blutmenge bei allen Warmblütern ungefähr dieselbe ist ($\frac{1}{13}$ — $\frac{1}{22}$ des Tiergewichts), ist die Versorgung der Organe mit Blut, also auch mit Nährstoffen und mit Sauerstoff um so reichlicher, je kleiner das Tier ist. Damit ist aber gegeben, daß große Tiere über den Arbeitsaufwand, der beim Fliegen unter Umständen nötig ist, nicht verfügen. — Die Größe der fliegenden Tiere mußte eine beschränkte bleiben, auch wenn das größere Tier dieselbe Masse etwas leichter in der Luft schwebend erhalten könnte als das kleinere. — Fliegende Tiere von der Größe und dem Gewicht des Menschen kann es gemäß den Beziehungen, welche zwischen Körpergewicht und Arbeitsleistungen bestehen, nicht geben. Wenn man auf Grund der gefundenen Knochenreste annimmt, daß in früheren Erdepochen sehr große fliegende Saurier existiert haben, so bleiben doch alle Hypothesen über die Art ihrer Fortbewegung in der Luft äußerst unsicher. Vielleicht haben sie ihren Flugapparat nur benutzt, um sich aus der Höhe schräg abwärts auf die Beute zu stürzen. Ein sich Erheben in die Luft unter entsprechender Benutzung des Windes erscheint auch für solche Riesenorganismen möglich, nicht aber ein von Wind und Wetter ganz unabhängiges Fliegen.

Da wir bei unseren Flugversuchen die eigene Muskelkraft ganz ausgeschaltet haben und uns wenigstens heute noch ausschließlich der Explosionsmotore bedienen, welche auf 1 kg Gewicht etwa so viel Arbeit ohne Ermüdung leisten, wie 60 kg Mensch nur kurze Zeit aufbringen können, dürfen wir den fliegenden Menschen nicht mit dem ganzen Vogel vergleichen. Er entspricht in der Flugmaschine nur dem Hirn oder vielmehr dem gesamten Nervensystem des Vogels mit Einschluß seiner Sinnesorgane, das auf komplizierte Weise die Arbeit der Muskulatur regelt und sie in eminent zweckmäßiger Weise den in der Luft von Moment zu Moment wechselnden äußeren Bedingungen anpaßt.

II. Allgemeines und Umgrenzung der Aufgabe.

Der Schwerpunkt der besonderen Leistungen, welche die Aviatik von uns fordert, liegt auf psychischem Gebiete in weitestem Umfange. Sie erfordert Besonderheiten in der Leistung unserer Sinne und in der Verwertung der Sinnesindrücke; nur bei Hochfahrten kommen auch die durch die Luftverdünnung bedingten Störungen des Stoffwechsels in Betracht.

Wir teilen daher zweckmäßig unsere Aufgabe in die Behandlung der beiden Hauptkapitel

Sinnesorgane und Reaktion auf deren Erregung.

Atmung in großen Höhen und bei raschem Höhenwechsel.

Für die Handhabung der Flugzeuge kommt besonders das erste Kapitel in Betracht, weil wir hier unter ganz ungewohnten Verhältnissen unsere Sinne gebrauchen und auf deren Eindrücke zweckmäßig reagieren müssen. Die Atmung

spielt hauptsächlich wegen ihrer indirekten Einwirkungen auf die Hirntätigkeiten bei jenen Höhenflügen, welche die Grenze von 2000 m übersteigen, eine Rolle; ausschlaggebend ist aber die Leistungsfähigkeit unseres Atemapparates für die Höhengrenzen, welche der Mensch im Freiballon erreichen kann.

Leider ist es nur ein sehr beschränktes Maß von aëronautischen Erfahrungen, welches mir persönlich zur Erörterung der in Frage stehenden Verhältnisse zu Gebote stehen; im Freiballon habe ich nur eine Höhe von 5000 m erreicht; zur Fahrt in Zeppelins „Schwaben“ bot sich mir im vergangenen Jahr einmal Gelegenheit, für die ich der Leitung der Deutschen Luftschiffahrts-Gesellschaft zu besonderem Dank verpflichtet bin. Immerhin förderte diese eine Fahrt meinen Einblick in die Einwirkungen der Motorluftschiffahrt auf unseren Organismus wesentlich, weil sie bei stark böigem Wetter erfolgte und infolge dessen die Einwirkungen der dadurch bedingten Schwankungen des Luftschiffes, jäher Änderungen der Höhenlage und des scharfen Windes bei starkem Angehen des Schiffes gegen den Wind, besonders gut beobachtet werden konnten.

Gegenüber der feierlichen Ruhe im Freiballon, die ja, wenn nicht ganz exzeptionelle Unregelmäßigkeiten des Windes herrschen, vielleicht den erschütterungsfreiesten Zustand darstellt, in dem sich der Mensch überhaupt befinden kann, fühlt man im Motorschiff auf alle Fälle das Ankämpfen gegen den Luftwiderstand. Die dadurch bewirkten Vibrationen der Gondel waren bei meiner Fahrt am 29. Oktober 1911 besonders stark wegen der das Luftschiff zeitweise von der Seite treffenden Windstöße und der den frischen WNW-Wind von 10—11 m/sec. begleitenden heftigen vertikalen Böen. Die Stetigkeit der Fahrt litt auch noch unter dem Umstande, daß das Schiff nur mit zwei Motoren fuhr. Das achterliche Backbordgetriebe war abmontiert. Immerhin blieben die Erschütterungen so gering, daß man leicht in der Gondel schreiben konnte, wenn auch die Schrift zittrig und unruhig wurde, sobald man das Papier auf den Bord oder Tisch auflegte. Unter normalen Verhältnissen soll selbst dies nicht der Fall sein.

Der Intensität nach gleichen die von mir beobachteten Erschütterungen denen, welche wir in einem sehr gut federnden Eisenbahnwaggon empfinden; sie sind aber doch von wesentlich anderem Charakter. — An Stelle der durch die Schienenzwischenräume bedingten Erschütterungen treten Schwingungen der Metallteile des Luftschiffes, welche sich auf die an ihnen mit metallenen Trägern befestigte Kabine übertragen und welche ihren Ursprung wohl im wesentlichen in der Arbeit der Motoren haben. — Die dem Stampfen eines Schiffes vergleichbaren Hebungen und Senkungen der Spitze des Luftschiffs waren bei der Fahrt, an welcher ich teilnahm, ungewöhnlich starke und machten sich auch in der annähernd in der Mitte des ganzen Schiffskörpers angehängten Passagierkabine kräftig geltend. — Überraschend war mir und anderen Teilnehmern der Fahrt, welche bei Seefahrten starke Disposition zur Seekrankheit gezeigt hatten, daß hier sich nicht die leisesten an diese erinnernden Symptome bemerkbar machten. Es muß wohl an der großen Langsamkeit und Regelmäßigkeit, mit der die stampfenden Bewegungen des Luftschiffs erfolgten, liegen, daß dieselben absolut keine unangenehmen Sensationen erzeugten und daß jedes Symptom von Übelkeit oder Schwindel ausblieb. — In bezug auf das Fehlen des Schwindelgefühls

beim Hinabschauen aus der Gondel auf die Erde verhält sich der Aufenthalt in der Kabine des Luftschiffs genau so wie der in der Gondel des Freiballons. Menschen, welche auf hohem Balkon eines Hauses von Schwindel befallen werden, sehen aus der so viel steileren Höhe im Ballon ohne jede ängstliche Empfindung auf die Erde herab¹⁾. — Entsprechend diesem Fehlen jeglicher unbehaglicher Empfindung konnte ich auch bei keinem der Mitfahrenden etwas von jenen Störungen in der Herz-tätigkeit und der Zirkulation des Blutes beobachten, welche bei Seefahrten aufzutreten pflegen. Weder irgendwelche jähe Schwankungen der Pulsfrequenz noch Verengerungen und Erweiterungen der peripheren Arterien, wie sie sich im Erblassen und Erröten des Gesichts kundgeben, waren bei einem der Teilnehmer wahrnehmbar. Dies ist um so bemerkenswerter als die Mehrzahl der Fahrgäste und speziell die mitfahrenden Damen sich niemals vorher in einem Luftballon befunden hatten. Man erkennt hieraus, wie groß das Gefühl der Gefahrlosigkeit und Sicherheit bei den Teilnehmern einer derartigen Fahrt ist. In der Tat muß auch der Ängstlichste, wenn er die Sicherheit der Manövrierung des riesigen Luftschiffs beobachtet, wenn er sieht, wie durch das Zusammenarbeiten der Propeller und Steuer des Schiffes und der dasselbe haltenden Mannschaften die Landung, die Fortbewegung über der Erdoberfläche und die Unterbringung in die Halle mit der Sicherheit der Rangierung eines Eisenbahnzuges erfolgt, jeden Gedanken an Gefahr verlieren. — Wenn man dem Freiballon, der jedem Luftstrom, in dem er sich befindet, willenlos folgen muß, im Momente der Abfahrt ein hoffendes und leise fürchtendes „Glück ab“ mit Recht zuruft, so schwindet solche Sorge, wenn man den Zeppelinkreuzer scharf in der gewollten Richtung gegen den Wind ankämpfen sieht, wenn man erkennt, mit welcher Sicherheit sein Lenker aufwärts und abwärts, nach rechts und links das Fahrzeug steuert. Über die Empfindungen bei der Fahrt mit den anderen bewährten Luftschiffsystemen kann ich leider aus eigener Erfahrung Nichts aussagen.

Erst während ich mit Ausarbeitung der folgenden Darlegungen beschäftigt war, bot sich mir Gelegenheit, wenn auch nur auf einer kurzen Passagierfahrt die Empfindungen kennen zu lernen, welche den eigentlichen Flug begleiten. Herr Hirth, der Sieger der Dauerfahrt München—Berlin, der inzwischen auch die oberrheinischen Zuverlässigkeitsflüge und den Flug Berlin—Wien siegreich bestritten hat, hatte die Güte, mit mir bei einigermaßen böigem Wetter einige Runden um den Johannisthaler Flugplatz zu fliegen²⁾. Mit Staunen

¹⁾ Während der Korrektur finde ich in der Naturw. Wochenschrift vom 26. Mai d. Js. S. 326 eine Beobachtung über sehr heftige Schwindelgefühle im Freiballon von einem Manne, der sich selbst als Neurastheniker und leicht zu Schwindel neigend charakterisiert. Nachdem er die allgemeine Auffassung, „daß im Korb nie über Schwindel geklagt wird“, erörtert hat, sagt er: „Schon kurz nach dem Aufstiege war es mir unmöglich mit Ruhe über den Korbrand hinabzusehen. Ein Blick, dann überkam mich ein lähmendes Gefühl, eine Schwäche in der unteren Körperhälfte, so daß ich mich wieder nach dem Innern des Korbes wenden mußte. Dieses niederträchtige Gefühl steigerte sich mit zunehmender Erhebung über der Erdoberfläche. Ja, wie ich jetzt hinabsah, war es mir, als müßte ich über den Korbrand hinauspringen.“ — Jedenfalls handelt es sich hier um eine seltene Ausnahme.

²⁾ Mit besonderem Dank möchte ich hier erwähnen, daß mir der Flug mit Hirth ebenso wie die vorher erwähnte Fahrt auf der „Schwaben“ durch den Herrn Herausgeber von „Luftfahrt und Wissenschaft“ ermöglicht worden ist.

sieht der Gast, wie vollkommen der gewandte Flieger sein Flugzeug in der Hand hat, mit welcher Sicherheit er enge Kurven beschreibt, wie er auf- und abschwebt, rasch zur Erde herabsinkt, ein bestimmtes Ziel präzise wie der auf seine Beute stoßende Raubvogel erreicht, um sich dann, ganz nahe über dem Erdboden dahingleitend, wieder stolz in die Luft zu erheben. — Viel mehr noch als in der Gondel des Lenkballons fühlt man mit dem Flugzeug die Luft durchschneidend, die frische Kraft des Luftwiderstandes, die nur erträglich wird, wenn fast der ganze Körper in warmes Zeug gehüllt, die Augen durch eine gut schließende Schutzbrille gegen den Anprall des Windes geschützt sind, den man mit 60 bis 120 Kilometer Stunden-geschwindigkeit durch die Luft sausend, sich selbst erzeugt. Es ist selbstver-ständiglich für unser Empfinden ganz gleichgültig, ob wir ruhig stehend vom Winde bestimmter Geschwindigkeit angeblasen werden, oder ob wir die Luft fliegend mit der gleichen Geschwindigkeit durchschneiden. — Die Nickhaut des Vogelauges, jenes durchsichtige, von der Seite vor das Auge zu schiebende dritte Lid, erkennen wir hier in seiner Bedeutung und Notwendigkeit als Schutzorgan des Auges, das während des Fluges die Fernsicht kaum hindert und momentan zur Seite geschoben wird, wenn etwa eine Beute, ein am Boden liegendes Korn scharf aus der Nähe betrachtet werden soll. Eine Vervollkommnung unserer Schutzbrillen, die rasches Entfernen und Verschieben der Gläser gestattete und die dieselben zugleich immer wieder automatisch blank putzte, von Staub und Wasserdampf reinigte, wie das beim Zurückziehen der Nickhaut mit dieser geschieht, könnte die Leistungsfähigkeit des Fliegers in gefährlichen Momenten wesentlich erhöhen, wäre ein nicht unwesentlicher Sicherheitsfaktor.

Die ruhige Sicherheit, mit welcher man unter der Obhut eines seine Maschine absolut meisternden Fliegers die Luft durchschneidet, läßt uns doch nicht verkennen, wie sehr diese Sicherheit auf der unentwegten Wachsamkeit und dem schnellen und sichern Handeln des Fliegers beruht. Von dem durch die Sonne durchwärmten Boden erheben sich ganz lokale aufsteigende Luftströmungen und Wirbel, eine dunkle unbewachsene Bodenfläche wird viel stärker erwärmt als eine grüne, und über ihr wirbelt darum die Luft empor; in der Nähe von Bäumen und Häusern erfährt der Wind eine starke Ablenkung nach oben. So verstehen wir einerseits das Streben nach technischen Vervollkommnungen, welche durch die Form der Flügel und Steuerflächen, durch zweckmäßige Disposition der Belastung die Stabilität des Flugzeuges zu erhöhen streben, andererseits die Notwendigkeit, daß der Flieger so rasch als möglich jede Gleichgewichts-störung wahrnimmt und blitzschnell, möglichst ohne daß irgend ein Überlegen notwendig ist, das Richtige zu ihrer Ausgleichung tut.

Als ich im Flugzeug die Luftströmungen wahrnahm, welche durch die Unregelmäßigkeit der Erwärmung zustande kommen, trat mir eine Beobachtung lebhaft vor Augen, welche ich vor einigen Jahren machen konnte, als ich von der Königin-Margheritahütte auf der Gnifettispitze des Monte Rosa 4560 m über dem Meere nach Italien hinabschaute. Ich sah da plötzlich im Sesiatale 3000 m unter uns und in der Luftlinie etwa 5 km entfernt eine Staubwolke aufwirbeln. Es dauerte nur wenige Minuten, bis ein Teil dieser Staubwolke bis zu uns hinaufgewirbelt war. Demgemäß muß man die Geschwindigkeit dieses aufsteigenden Luftwirbels auf

etwa 30 Sekundenmeter schätzen, das heißt auf einen Wert, der wenigstens der Eigengeschwindigkeit des schnell fahrenden Aëroplans gleichkommt. Ich mußte an diese Beobachtung denken, als ich von dem traurigen Ende des kühnen Chavez nach Überfliegung des Simplon las; sein Todessturz erfolgte kaum 30 km nordwestlich von jener Stelle, wo ich jenen gewaltigen Luftwirbel beobachtete und in einem dem oberen Sesiatale ähnlich konfigurierten engen aus dem Hochgebirge steil herabziehenden Flußtale. Wir werden dies traurige Ereignis später noch von einem anderen Gesichtspunkte aus erörtern. Es liegt nämlich nahe, daran zu denken, daß die gefährlichen Luftstöße wohl in einem Moment den Luftschiffer trafen, in welchem seine Fähigkeit, sie zu parieren, durch die klimatischen Einwirkungen stark herabgesetzt war.

III. Die Sinnesorgane in ihrer Beziehung zur Luftfahrt.

Unsere Sinne lenken unser Verhalten in doppelter Weise, einmal, indem sie bewußte Vorstellungen vermitteln, die dann unser Handeln bestimmen, und andererseits, indem auf die Sinneseindrücke unbewußt Reaktionen unseres Bewegungsapparates erfolgen, die wir als Sinnesreflexe bezeichnen. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es Übergänge, wo zwar Bewußtseinsvorgänge durch den Sinneseindruck ausgelöst werden, die Reaktion aber schon erfolgt, ehe der psychische Vorgang beendet, ehe der Eindruck bewußt verarbeitet ist. — Diese unbewußten und halbbewußten Reaktionen auf Sinneseindrücke regeln unsere normalen Bewegungen auf der Erde, das Gehen, Laufen, Springen, Reiten, Radeln, die komplizierten Verschiebungen unseres Körperschwerpunktes bei den mannigfachen Hantierungen des praktischen Lebens, bei den Kunststücken des Turners und des Akrobaten. Vier verschiedene Sinnesorgane sind es, welche hierbei zusammenwirken, der Hautsinn, der Muskelsinn, die mit dem achten Hirnnerven zusammenhängenden Apparate in unserem Ohrlabyrinth und der Gesichtssinn. — Für alle diese Apparate verschieben sich die normalen Reize und vor allen Dingen der Erfolg der gewohnten Reaktion auf diese Reize, wenn wir in der Luft schweben, statt den festen Erdboden mit unseren Füßen zu berühren.

Von höchster praktischer Bedeutung werden diese Dinge für den Flieger, der in jedem Momente des Fluges auf die feinsten Verschiebungen der Lage seines Flugzeuges reagieren muß, zum Teil so schnell reagieren muß, daß jede bewußte Überlegung ausgeschlossen ist. Hier kann es für ihn verderblich werden, wenn die angeborenen oder in frühester Jugend erlernten, durch die ständige Übung maschinenmäßig gewordenen Reaktionen der Muskulatur, welche den mechanischen Bedingungen auf festem Boden angepaßt sind, störend mit den Aktionen interferieren, welche zur Steuerung und Äquilibrierung des Flugzeuges nötig sind. Darum kann die Physiologie durch exaktes Studium der auf Gleichgewichtsstörungen erfolgenden unbewußten Bewegungen wichtige Anhaltspunkte für die Konstruktion der Aëroplane resp. ihrer Steuereinrichtungen liefern. Wir wollen nun dazu übergehen, aus der Physiologie der beteiligten Sinnesorgane das für den Flieger wichtigste zu besprechen.

A. Der Haut- und Muskelsinn.

Unser Urteil über das Gewicht sowie über die Bewegungsenergie der mit unserem Körper in Berührung kommenden Objekte wird durch das Zusammenwirken des Haut- und des Muskelsinnes bestimmt. Organ des ersteren sind Nervenendigungen, welche in den tiefsten Schichten der Oberhaut und in den obersten Partien der Lederhaut, speziell in den auf dieser sich erhebenden mikroskopischen fingerförmigen Fortsätzen, den Hautpapillen sich finden. — Zur einfachsten Prüfung seiner Leistung dienen Belastungsversuche, wie sie Ernst Heinrich Weber zuerst systematisch angestellt hat. Wenn man den Handrücken bequem auf eine feste Unterlage stützt und dann auf die Haut der Hohlhand oder eines Fingers Gewichte auflegt, so kann man leicht eine untere Grenze finden, bei der die Belastung als solche wahrgenommen wird, die „Reizschwelle“ des Drucksinns an der betreffenden Hautstelle und unter dem obwaltenden Zustande des Nervensystems der Versuchsperson. Indem man das erste Gewicht durch andere schwerere ersetzt, findet man, wie groß der Zuwachs der Belastung sein muß, damit man mit Sicherheit das zweite Gewicht als schwerer erkennen kann.

Es ergibt sich bei diesen Versuchen die fundamentale Tatsache, daß nicht ein bestimmtes Mehr an absolutem Gewicht einen erkennbaren Unterschied herbeiführt, daß vielmehr hierzu bei wachsender Belastung stets größere Zuwachsgewichte erforderlich sind. Das zur sicheren Erkennung des Unterschieds nötige Zusatzgewicht, die „Unterschiedsschwelle“, muß bei jeder Belastung denselben Bruchteil derselben darstellen. Anders ausgedrückt, die Empfindlichkeit für Unterschiede der Reizgröße nimmt ab proportional der absoluten Größe des Reizes. Dieses zuerst für Druckreize gefundene „Webersche Gesetz“ hat sich für alle Sinnesreize als gültig erwiesen. Bei der Temperaturempfindung muß der Unterschied um so größer sein, damit er wahrnehmbar werde, je weiter die wirkende Temperatur von der Wärme der Haut, welche hier den Nullpunkt bedeutet, abweicht. Das gleiche Gesetz macht sich bei der Vergleichung von Schallstärken, von Gesichtseindrücken geltend.

Wie eingangs erwähnt, dient uns neben dem Hautsinn der Muskelsinn zur Prüfung der Schwere von Objekten. Er spielt die wesentliche Rolle, wenn wir einen Gegenstand mit der Hand „abwägen“; wenn wir das zu prüfende Gewicht in die Hand nehmen oder es mit einem Faden an dieselbe anhängen und es durch abwechselnde Zusammenziehung und Erschlaffung der Armmuskeln heben und senken. Bei diesem Verfahren können wir Gewichtsunterschiede viel feiner erkennen als mit Hilfe des Drucksinns der Haut. Der Sitz dieser Empfindungen sind Nervenendigungen in den Sehnen, speziell in dem an die Muskelfasern angrenzenden Teile derselben, ferner solche zwischen den Muskelfasern selbst und in den einander berührenden Gelenkenden der Knochen. Aus den Eindrücken, welche diese verschiedenen Empfindungsnerven dem Hirne zuleiten, setzt sich die Vorstellung von der Größe des Zuges, welcher die Muskeln und Sehnen dehnt und auf die Gelenkenden drückt oder an ihnen zerrt, zusammen. Es kommt aber noch ein zweiter zerebraler Faktor hinzu, das ist die Kenntnis von der Stärke der Bewegungsimpulse, die wir unseren Muskeln zuschicken müssen, damit sie durch ihre Zusammenziehung die Last eben heben, ihr das Gleichgewicht halten oder sie langsam sinken lassen.

Bedeutungsvoll für die Beurteilung des Drucks und der Schwere ist der Umstand, daß gleichzeitige Erregung anderer Hautsinne die Druckempfindung ändert und dadurch das Urteil fälschen kann. Beispielsweise wird ein Gewicht schwerer geschätzt, wenn es kalt ist. Ähnliche Erscheinungen beobachtet man bei anderen Sinnen; man schätzt die Süße einer Zuckerlösung stärker, wenn eine geringe für sich nicht schmeckbare Menge Salz zugefügt wird; aber auch die entgegengesetzte Beeinflussung, die Minderung eines Sinneseindrucks durch einen zweiten gleichzeitigen wird vielfach beobachtet.

Die eben charakterisierten Sinnesempfindungen der Haut und der Muskeln spielen nun ständig eine große Rolle für die Erhaltung des Gleichgewichts beim Stehen, Gehen und allen Bewegungen des Menschen. Unser Stehen ist ein labiles, die einzelnen Gelenke unserer unteren Extremitäten würden durch ganz geringe Verlagerungen der auf ihnen ruhenden Last zusammenknicken; der ganze Körper würde, wenn keine Gegenwirkungen der Muskulatur stattfänden, durch geringe Verschiebung der Lage seines Schwerpunktes, wie sie etwa beim Bewegen eines Armes erfolgt, zum Umfallen gebracht werden. Man kann leicht nachweisen, daß ein ruhig stehender Mensch niemals wirklich unbeweglich steht, daß vielmehr ständig eine leichte Neigung des Körpers bald nach der einen und bald nach der anderen Seite, nach vorn und nach hinten, stattfindet. Der stehende Körper bewegt sich ähnlich wie etwa ein langer Stab, den wir auf einem Finger senkrecht balancieren. Hier gleichen wir den Beginn des Falles dadurch aus, daß wir unsere Hand in derselben Richtung bewegen, nach der sich die Spitze des Stabes senkt und dadurch bewirken, daß die Schwere nunmehr auf das obere Ende in einer Richtung wirkt, welche derjenigen, nach welcher der Stab zu fallen drohte, entgegengesetzt ist. Je früher die korrigierende Handbewegung einsetzt und je weniger sie über die Lage hinausgreift, in welcher der Stab senkrecht steht, desto geringer ist die für die Äquilibrierung nötige Handbewegung. Die Größe der Muskelarbeit hängt also von der Feinheit ab, mit welcher das Auge den Beginn der Senkung der Spitze nach einer Seite erfaßt und von der Schnelligkeit und Sicherheit, mit der die Muskeln der Hand die korrespondierenden Bewegungen ausführen. Ganz so wie mit der Arbeit unseres Armes bei der Äquilibrierung des Stabes, verhält es sich mit der Arbeit, welche unsere Rumpf- und Beinmuskeln ständig auszuführen haben, um den Körper in aufrechter Stellung zu erhalten. Die Art, wie beim stehenden Menschen die Schwerpunktsverschiebungen erfolgen, läßt sich nach einer von Generalarzt Leitensdorfer angegebenen Methode graphisch darstellen. — Man setzt einem ruhig stehenden Soldaten einen Helm auf und befestigt an dessen Spitze einen Stift, welcher auf ein darüber horizontal schwebendes berußtes Papier seine Bewegung aufzeichnet. Die sich aus den Aufzeichnungen ergebenden Schwankungen des Schädels der Versuchsperson sind um so erheblicher, je weniger geübt sie im Ruhigstehen ist. Sie nehmen ferner erheblich zu bei geschlossenen Augen, ein Beweis, daß das Sehen bei der Regulation des Stehens beteiligt ist. Die Schwankungen wachsen ferner, wenn die Haut der Fußsohle stark abgekühlt wird, wodurch die Feinheit ihres Tastsinnes leidet. Helles Licht auf die in Frage stehenden Mechanismen werfen die Beobachtungen, welche man bei der populär als Rückenmarksdarre bezeichneten Krankheit, der *Tabes dorsalis*, macht. Bei dieser Krankheit ergibt die

anatomische Untersuchung eine mehr oder weniger hochgradige Entartung gewisser Nervenbahnen des Rückenmarks, speziell der als Hinterstränge bezeichneten Faserzüge, welche die in das Mark eintretenden Empfindungsnerven mit jenen höher gelegenen Zentren verbinden, von welchen die Impulse zu den koordinierten Bewegungen des Körpers ausgehen. — Der hierdurch bedingte Ausfall an Empfindungen in bezug auf die Lage der Glieder, den Spannungsgrad der Muskeln, spricht sich in höchst charakteristischen Bewegungsstörungen aus. Die Kraft der Bewegungen ist durchaus erhalten, aber man vermißt deren genaue zweckmäßige Regelung. Wenn wir den im Bette liegenden Patienten bei geschlossenen Augen auffordern, ein Bein ein wenig zu heben, passiert es zuweilen, daß die Hebung nicht ausgeführt wird, weil der den Muskeln zugesandte Willensimpuls zu schwach ausgefallen ist, dann wieder wird das Bein mit gewaltigem Ruck emporgeschleudert, weit über die gewollte Hebung hinaus. Ähnliche Störungen beobachten wir beim Gehen. Zu jedem Schritt wird das Bein krampfhaft vorgeschleudert; statt gerade nach vorn wird es in einem auswärts gerichteten Bogen vorwärts bewegt und dergl. (ataktischer Gang). Besonders charakteristisch ist, daß die Gehstörungen im Dunkeln oder bei verschlossenen Augen erheblich zunehmen, bei einigermaßen vorgeschrittenem Leiden ist das Gehen im Dunkeln unmöglich, der Patient fällt beim ersten oder zweiten Schritt zu Boden. Das gleiche beobachten wir beim freien Stehen. Jene leichten, ständig durch entsprechendes Muskelspiel korrigierten Schwankungen des stehenden Körpers, welche uns die Helmspitzenkurven erkennen lassen, sind beim Tabiker so gesteigert, daß das Hin- und Herwackeln des Körpers ohne weiteres in die Augen fällt. Bei verschlossenen Augen steigert sich die Unsicherheit des Stehens viel mehr als dies beim Gesunden der Fall ist; meist ist ohne Kontrolle durch den Gesichtssinn das Stehen unmöglich, der Patient muß gehalten werden, damit er nicht zu Boden falle, sobald er die Augen schließt.

Einen weiteren Einblick in den das Stehen und Gehen vermittelnden Komplex von Empfindungen vermittelt ein zuerst von den Neurologen Westphal und Erb studiertes Phänomen. Man lege ein Bein so über das andere, daß der Oberschenkel dicht über dem Knie gestützt ist, der Unterschenkel mit dem Fuße, also in starker Beugung, schlaff herabhängt. Wenn man jetzt einen kurzen, mäßig starken Schlag mit der Innenkante einer Hand oder mit einem gepolsterten Hämmerchen (Perkussionshammer) auf die Strecksehne des Unterschenkels, dicht unter der Kniescheibe ausübt, wird der Unterschenkel durch eine kräftige Zuckung des Streckmuskels emporgeschleudert. Je nach der Erregbarkeit des Nervensystems ist das „Kniephänomen“ mehr oder weniger stark, beim Tabiker fehlt es vollständig. Durch das genauere Studium des Phänomens ist sichergestellt, daß es sich nicht etwa um eine direkte Reizung der Muskelfasern durch die von der Sehne her geübte Zerrung handelt, daß vielmehr die mechanische Erregung der Nervenendigungen in der Sehne nach dem Rückenmark fortgeleitet wird und hier durch Vermittlung bestimmter Ganglienzellen auf die motorischen Fasern übergeführt wird, welche dem Muskel den Impuls zur Kontraktion übermitteln. Es handelt sich also um einen richtigen Reflexvorgang, wie er etwa uns entgegentritt in dem Zurückziehen des Fußes, wenn wir die Sohle kitzeln, in dem Verschuß der Augenlider, wenn ein Gegenstand dem Auge genähert wird oder die Zilien am Lidrande berührt. — Wir

bezeichnen deshalb das Kniephänomen auch als „Sehnenreflex“ im Gegensatz zu „Hautreflex“, „Lichtreflex“ in den eben geschilderten Beispielen. Ähnliche Sehnenreflexe wie am Knie bestehen am Fußgelenk, Ellenbogengelenk usw. Wie der Schlag, so bewirkt auch jeder Zug an der Sehne in der Längsrichtung den Reflex. Wir müssen daher in ihm einen Teil des Mechanismus suchen, welcher bei jeder die Sehne anspannenden Gleichgewichtsstörung des Körpers durch sofortige reflektorische Spannung des Muskels den Fall hemmt und die normale senkrechte Stellung des Körpers wieder herstellt.

B. Der Gesichtssinn.

Während die Sehnenreflexe ebenso wie die von der Hautoberfläche ausgelösten auf beschränkte Muskelgruppen wirken, beeinflußt das Auge die gesamte Muskulatur des Körpers im Sinne der Erhaltung des Gleichgewichts einerseits, der Bewegung auf ein bestimmtes Ziel hin andererseits. Die vom Auge regulierten Bewegungen sind ganz besonders geeignet, uns die Schwierigkeiten klar zu machen, welche dem Flieger daraus erwachsen, daß seine Sinne nicht an die Bewegung in der Luft und an die hierfür nötigen Manipulationen an seinem Flugzeug angepaßt sind, vielmehr an das Gehen und andere Bewegungen, bei denen wir uns auf den festen Boden stützen. Entsprechend der Einwirkung auf das Zusammenwirken der gesamten Muskulatur des Körpers spielen sich die vom Sehorgan ausgelösten Reflexe viel mehr als die bisher betrachteten im Bereiche des Bewußtseins ab oder werden wenigstens bewußt kontrolliert event. gehemmt. Es spielen hier auch erlernte, durch Übung allmählich immer sicherer und maschinenmäßiger gewordene Antworten der Muskulatur auf bestimmte optische Eindrücke eine große Rolle. Unbewußt ordnen sich, wenn der Blick auf ein Ziel gerichtet ist, alle Bewegungen derart, daß wir uns geradlinig auf das Ziel hinbewegen.

Jeder weiß, in welchem Maße durch plötzliche, schreckartige Empfindungen auslösende, Gesichtseindrücke unsere Körperstellung beeinflußt wird, wie wir beim Anblick eines Hindernisses automatisch den Körper zurückwerfen, um den Anprall unseres Körpers dagegen zu vermeiden. Derartige Schreckbewegungen des die Lenkstange führenden Fliegers können leicht zu gefährlichen Gleichgewichtsstörungen führen. Ähnlich kann die Reizung des Auges durch Staub und kleine Fremdkörper zu sehr bedenklichen Gleichgewichtsstörungen führen, darum ist der sichere Schutz des Auges, wie S. 8 schon erwähnt, von besonderer Bedeutung. — Durch die im Folgenden zu besprechenden Reflexe vom Ohrlabyrinth auf die Augenmuskeln kann die Orientierung in entscheidenden Momenten stark beeinträchtigt werden. Menschen, bei welchen die mit Schwindelgefühlen einhergehenden vom Ohrlabyrinth ausgelösten zuckenden Bewegungen der Augäpfel leicht auftreten, sind als Flieger besonderen Gefahren ausgesetzt.

C. Die mit dem Hörorgan assoziierten Lageempfindungen. Der statische Sinn.

Die Endigungen des achten Hirnnerven, welcher das Hören vermittelt, stehen im Inneren des Schläfenbeins des Menschen mit zwei verschiedenen Apparaten in Verbindung, der Schnecke und dem System des sogenannten Vorhofs (vestibulum).

Man unterscheidet daher 2 Endäste des 8. Hirnnerven, den Nervus cochlearis und den n. vestibularis.

Während man früher glaubte, beide Nerven seien Vermittler von Gehör-empfindungen, haben die grundlegenden Untersuchungen von Goltz und im Anschluß an sie die Arbeiten von Mach, Breuer, Cyon, Kreidl, Ewald und vielen anderen Forschern dem Vorhof eine besondere Funktion zugewiesen. Er dient der Wahrnehmung von Lageänderungen und Bewegungen des Kopfes und vermittelt Bewegungen und Muskelspannungen, welche durch diese Lageänderungen erforderlich werden. Die durch diesen Apparat ausgelösten Vorgänge sind also ähnlicher Art, wie diejenigen, welche durch die Tastempfindung, das Muskelgefühl und das Sehen vermittelt werden, unterscheiden sich aber von diesen dadurch, daß sie unbewußt ablaufen. — Am besten werden wohl die Leistungen des Vestibularapparates durch die Bezeichnung desselben als Organ des statischen Sinnes ausgedrückt. Seine vollständige Ausschaltung hebt gewisse Bewegungen, welche zur Kompensation von Lageveränderungen ausgeführt werden, auf, sie macht sich aber auch in einer verminderten Spannung, einem verringerten „Tonus“ der Muskulatur geltend. Labyrinthlose Tiere leisten deshalb jeder Verschiebung ihrer Gliedmaßen weniger Widerstand. An dem Einfluß des Labyrinths auf die Tätigkeit der Muskeln ist aber auch der Teil desselben, der die Schallwellen wahrnimmt, beteiligt, also der eigentliche Gehörapparat. Es sei nur an die halb unwillkürliche Auslösung von Bewegungen durch rythmische Musik erinnert. Marschmusik, Tanzmusik veranlaßt auch den ruhig sitzenden Menschen zu Bewegungen der Beine, der Finger, des Kopfes. — Der ermüdete Soldat wird durch die Marschmusik zu stärkerer Leistung befähigt. Ob es sich hierbei, wie Ewald annimmt, um eine Miterregung der Nervenendigungen des „Tonuslabyrinths“ durch die Schallwellen handelt oder ob auch die eigentlichen Gehörwahrnehmungen im Gehirn reflektorisch auf die Zentren der Muskelinnervation wirken, ist mit unseren heutigen Mitteln nicht zu entscheiden. Es sei aber daran erinnert, daß die Entwicklung des Gehörapparates in der Tierreihe unverkennbar auf seinen nahen Zusammenhang mit dem Organ des statischen Sinnes hinweist. Letzteres ist in ähnlicher Weise wie bei den höheren Wirbeltieren schon bei vielen niederen Organismen entwickelt, bei Organismen, die keine Spur von Gehör, d. h. keinerlei Beeinflussung durch Schallwellen erkennen lassen. Ein auf die Stellung des Körpers fein reagierendes, jede Lageänderung scharf anzeigendes Organ ist natürlich für die im Wasser und in der Luft sich bewegenden Lebewesen viel bedeutungsvoller als für diejenigen, welche sich auf den festen Erdboden stützen. Bei letzteren gibt ja stets die Tastempfindung der Haut weitgehenden Aufschluß darüber, welche Körperteile den Boden berühren und die Muskelgefühle lassen jede Schwerpunktsverschiebung schnell erkennen und veranlassen die zu ihrer Korrektur nötige Muskeltätigkeit. Am evidentesten bedarf der im Wasser äquilibrierte Organismus eines besonderen Organs, das ihn über die Orientierung seines Körpers zur Richtung der Schwere, die ja auf denselben nicht mehr wirkt, unterrichtet. Beim Schwimmen kann man denn auch die Notwendigkeit des statischen Organs für die Erkennung der Körperstellung besonders deutlich nachweisen, und selbst der Mensch ist in der Hinsicht hilflos, wenn ihm die Vestibularorgane fehlen.

In seiner einfachsten Form besteht das statische Organ aus haarförmigen Nervenendigungen, welchen ein schweres Gebilde, ein Steinchen, (Statolith) aufgelagert ist. Da der Statolith stets in der Richtung der Schwerkraft auf die Nervenendigungen drückt, muß die Druckwirkung eine andere werden, sobald das Tier seine Lage gegenüber dem Lot verändert. Diese geänderte mechanische Wirkung auf die Nervenendigungen löst dann Bewegungen aus, welche auf die richtige Einstellung des Tieres hinielen. — Besonders durchsichtig sind diese Reaktionen bei den frei im Meere schwimmenden Quallen. Engelmann und genauer noch Verworn¹⁾ wiesen nach, daß der früher mit dem Hören in Beziehung gebrachte und deshalb als Otolith bezeichnete, am aboralen Pole dieser Tiere gelegene Kalkkörper die Erhaltung des Gleichgewichts dadurch vermittelt, daß er die Bewegung der Flimmerhaare auf den sogenannten Schwimmlättchen, den flimmernden Rippen, dieser Tiere derart modifiziert, daß sie dem Körper die normale Lage mit der

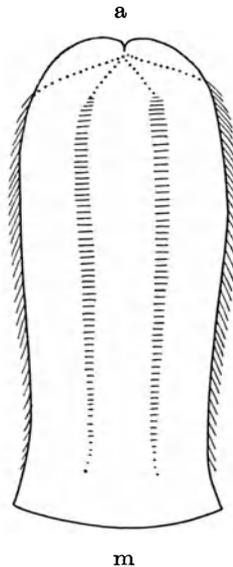


Fig. 1. *Beroë ovata*; Schema der Beziehung zwischen Statolithenapparat und flimmernden Rippen. m Mundpol; a aboraler Pol mit Statolithenapparat.

Fig. 2. Die Qualle, *Beroë ovata*, natürliche Größe.

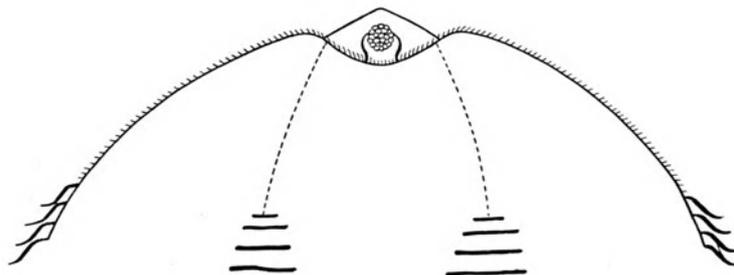


Fig. 3. Statolithenapparat der *Beroë ovata* und seine Beziehung zu den flimmernden Rippen.

Mundöffnung nach unten erteilen. Fig. 1 zeigt schematisch das Bild einer solchen Qualle, der *Beroë ovata*, Fig. 2 gibt den Anblick des Tieres am konservierten Präparat, Fig. 3 zeigt den Sinnespol mit dem von 4 Spitzen frei schwebend ge-

¹⁾ Max Verworn, Gleichgewicht und Otolithenorgan. Pflügers Arch. 50, 1891, S. 423 bis 472. Dieser Abhandlung sind auch die Figuren entnommen.

tragenen Statolithen bei starker Vergrößerung. Von jeder dieser Spitzen geht eine Leitungsbahn aus, welche die Bewegung von zwei der acht mit flimmernden Zilien besetzten Rippen, die den Körper des Tieres umspannen, reguliert. — Wird das Tier aus der Gleichgewichtslage gebracht, so drückt der Statolith stärker auf eine der vier ihn tragenden Spitzen, und das hat zur Folge, daß die zugehörigen Flimmerhaare sich lebhafter bewegen und alsbald das Tier wieder in die Gleichgewichtslage bringen. Schon ehe diese erreicht ist, beginnen auch die anderen Zilienreihen stärker zu arbeiten, offenbar weil jetzt auch die zu ihnen gehörigen Borsten einen entsprechenden Teil des Drucks des Statolithen aufnehmen.

Nach Entfernung des Statolithen, die bei manchen Arten durch Absaugen mit einem feinen Glasröhrchen bewirkt werden kann, resp. Zerstörung der den Druck aufnehmenden empfindlichen Spitzen mit Hilfe eines glühenden Drahtes hat die Qualle das Einstellungsvermögen verloren; die einzelnen Zilienreihen schlagen oft in verschiedenem Tempo, das Tier nimmt, aus der Gleichgewichtslage gebracht, diese entweder überhaupt nicht wieder an, oder nur ganz träge unter dem Einfluß der Schwere. Die ältere Annahme, daß der geschilderte Apparat mit dem Hören

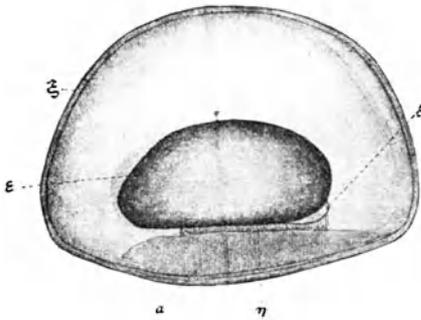


Fig. 4. Statolith auf büstenartigen Zellausläufern.

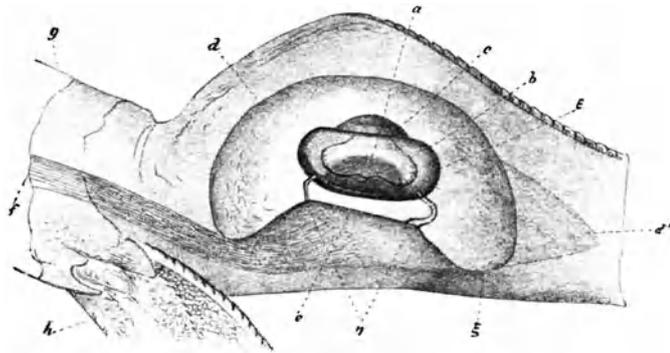


Fig. 5. Statolith auf federnden Trägern.

in Beziehung stehe, war dadurch entstanden, daß ähnliche mit Nervenendigungen in Berührung stehende Steinchen sich im Gehörorgane des Menschen und der Wirbeltiere finden. Dort brachte man sie begrifflicherweise, aber wie wir noch erörtern werden, zu Unrecht mit dem Hören in Beziehung; sie dienen auch der Erhaltung des Körpergleichgewichts, der „geotropischen“ Einstellung des Körpers. — Zur Illustrierung der subtilen Anordnungen durch welche die Bewegungen der Statolithen auf die Empfindungsnerven übertragen werden, mögen noch die Abbildungen Fig. 4 und 5 dienen. Die erstere zeigt, wie der Statolith auf die büstenartig angeordneten haarförmigen Ausläufer der Nervenendzellen wirkt, in anderen Fällen (Fig. 5) ruht der Statolith auf elastischen Füßchen, die durch jede Verschiebung, die er unter der Einwirkung der Schwere erleidet, verbogen werden. Für viele niedere Organismen, welche ein Statolithenorgan besitzen, ist mit Sicherheit nachgewiesen, daß sie überhaupt nicht auf akustische Reize, auf Schallwellen irgendwelcher Art reagieren. Für die Quallen hat Verworn diesen Beweis ge-

liefert. Andere Forscher¹⁾ zeigten dasselbe und zugleich die Bedeutung dieser Organe für die Erhaltung des Gleichgewichts an im Wasser lebenden Mollusken und Arthropoden, Jacques Loeb an Haifischen. Daß die Fische, welche alle einen sehr ausgebildeten Statocystenapparat haben, durchaus nicht hören, wurde entgegen verbreiteten älteren Anschauungen in jüngster Zeit von Kreidl²⁾ durch sorgfältige Versuche festgestellt (vgl. übrigens S. 24). Auch der Umstand, daß Fische ebenso wie fast alle im Wasser lebenden Wirbellosen keinerlei Geräusche hervorbringen, macht es in hohem Maße unwahrscheinlich, daß sie hören. Die meisten Angaben über Hören dieser Tiere beruhen auf ungenauen Beobachtungen, indem entweder Gesichtseindrücke nicht sicher ausgeschaltet waren, oder mechanische Erschütterungen, etwa durch das Gehen von Menschen am Ufer, auf die Tiere wirkten. Die Tiere haben vielfach äußerst feine Berührungsempfindlichkeit und reagieren daher auf leichte Wellenbewegungen des Wassers. Bei den Fischen sind es besonders die Nervenendigungen der sogen. Seitenlinie, welche diese Reaktionen auf Erschütterung vermitteln. Daß die Grenzen zwischen diesen Empfindungen und dem eigentlichen Hören nicht scharf zu ziehen sind, liegt auf der Hand. Darum wird man auch die Entstehung des Gehörorgans in der Tierreihe phylogenetisch aus allmählicher Vervollkommnung der einfachen Empfindungsnerven und der statischen Organe ableiten können.

Kreidl verdanken wir auch sehr originelle und beweisende Versuche über die Einwirkung der Statolithen auf die Richtungsbewegung der Krebse. In ähnlich präziser Weise wie bei den Quallen kann man auch die Bedeutung des früher als Gehörorgane angesprochenen Statolithenapparates bei verschiedenen Krebsarten demonstrieren. Es sind besonders diejenigen Krebse, welche frei im Wasser umherschwimmen, bei denen die Bedeutung dieses Apparates ersichtlich ist. Er liegt hier an sehr verschiedenen Stellen des Körpers, bald in einem oder dem anderen Fußpaar, bald in den vom Kopf ausgehenden Antennen, von denen ein andres Paar die Augen trägt. Auch insofern kommen hier bei verschiedenen Arten weitgehende Unterschiede vor, als die Statolithen bald vollkommen eingeschlossen in der Tiefe des Gewebes liegen, bald sehr oberflächlich in einer Einsenkung des Chitinnantels der Tiere. Im letzteren Falle werden sie bei jeder Häutung abgeworfen und neu ersetzt dadurch, daß die Tiere durch einen Willkürakt feinen Sand in die betreffenden Öffnungen hineinstopfen. Während der Zeit des Fehlens der Statolithen sind die Tiere sehr wenig zu Bewegungen geneigt, und dasselbe beobachten wir, wenn man ihnen zu irgend einer Zeit die Statolithen raubt, oder wo dies nicht möglich ist, das betreffende Glied abschneidet. Insbesondere findet man, daß die Tiere ohne Statolithen auch in abnormen Lagen schwimmen, und daß außerdem dabei ihre Bewegungen weniger kraftvoll sind als bei Vorhandensein dieser Organe. Die Bedeutung der Statolithen für die Kraft der Muskelbewegungen werden wir nachher

1) Yves Delage, Sur une fonction nouvelle des Otocystes comme organes d'orientation locomotrice. Arch. de Zoologie expér. et génér. II. Sér. t. 5, 1887. — Th. Beer, Über den angeblichen Gehörsinn und das angebliche Gehörorgan der Crustaceen. Pflügers Arch. 73, 1898, S. 1.

2) Kreidl, Über die Schallperception der Fische. Pflügers Arch. 61, 1895.

noch genauer erörtern. Hier möchte ich zunächst einen entscheidenden Beweis für den Einfluß dieser Organe auf die Körperbewegungen anführen, welcher Kreidl an solchen Krebsen gelungen ist, die sich die Statolithen nach jeder Häutung erneuern. Er setzte solche Krebse in Wasser, auf dessen Boden als einzige für die Krebse erreichbare sandartige Masse feiner Eisenfeilstaub sich befand. Sie verwandten dann diesen feinen Eisenstaub zum Ersatz der bei der Häutung verlorenen Statolithen. Hierauf erwiesen sich die Tiere in sehr merkwürdiger Weise in ihren Bewegungen beeinflusbar durch starke Magnete, die man in ihre Nähe brachte. Es erfolgten bei Annäherung des Magneten stets Bewegungen derart, als ob das Tier von dem Magneten angezogen würde. Von einer wirklichen Anziehung kann natürlich nicht die Rede sein, da die Eisenteilchen kaum ein Gewicht von wenigen Milligramm hatten, es also undenkbar ist, daß durch ihre Vermittlung das ganze schwere Tier in der Richtung des Magneten gezogen würde. Die Sache ist nur so verständlich, daß das Tier durch die vom Magneten bewirkte Bewegung der kleinen Statolithen in einer bestimmten Richtung veranlaßt wird, seine Muskeln derart zu innervieren, daß es in der gleichen Richtung sich bewegt. Damit kommen wir zu einer Erklärung der normalen Funktionen der Statolithen. Als träge Masse müssen dieselben ein wenig zurückbleiben, wenn das Tier rasch nach einer bestimmten Richtung geschoben wird, und dieses Zurückbleiben bedeutet dann einen Druck auf die Nervenendigungen in einer zur Bewegung des Tieres entgegengesetzten Richtung. Auf eine Verschiebung nach rechts aber wird das Tier im allgemeinen durch eine Eigenbewegung nach links antworten, um sich eben in seiner Lage zu behaupten. Es hat also die Anziehung der magnetischen Statolithen nach einer Seite denselben Effekt auf die Nervenendigungen wie eine rasche Verschiebung des ganzen Tierkörpers in der entgegengesetzten Richtung. Im Prinzip ist also die Regulation der Bewegung des Krebses durch die Statolithen ganz analog derjenigen, welche wir vorher bei den Quallen kennen gelernt haben.

Während die im Wasser lebenden Crustaceen ebenso wie die Fische und alle Vögel einen den beschriebenen Einrichtungen analogen Statolithenapparat haben, fehlt derselbe bei schwimmenden sowohl wie bei den meisten fliegenden Insekten. Dies dürfte damit zusammenhängen, daß die ersteren ausschließlich an der Oberfläche des Wassers schwimmen, und daß sie durch den Luftvorrat, den sie in ihren Tracheen und vor allen Dingen unter den Flügeldecken ständig beherbergen, in der normalen Stellung mechanisch erhalten werden. Es bedarf bei ihnen keinerlei Tätigkeit der muskulösen Apparate, um diese Stellung zu erhalten, weil infolge der Luftvorräte der Schwerpunkt des Körpers so tief liegt, daß ein Umkippen ganz unmöglich ist. Schwerer verständlich ist das Fehlen derartiger Apparate bei den fliegenden Insekten. Für sie müssen wir uns der Tatsache erinnern, daß die Tiere ja noch eine andere, sehr wirksame Kontrolle ihrer Körperlage in den Augen besitzen, und die Augen sind bekanntlich bei den Insekten in hoher Vollkommenheit ausgebildet. Wie sehr diese Tierklasse in ihren Bewegungen durch optische Eindrücke reguliert wird, zeigt uns ja die bekannte Anlockung der Insekten, speziell der in der Dämmerung fliegenden, durch das Licht, ihr Phototropismus. Im Gegensatz hierzu ist der Statolithenapparat bei den Vögeln sehr vollkommen entwickelt, und wir sehen ihn auch in ähnlicher Vollkommenheit bei den abwechselnd auf dem Lande

und im Wasser lebenden Amphibien. Gerade bei letzteren ist wegen des Lebens in zwei Medien die Aufgabe der Erhaltung des Körpergleichgewichts eine besonders komplizierte, und darum sehen wir auch hier alle ihr dienenden Apparate in hoher Ausbildung. Wenn wir die Anordnung der Statolithen mit ihren Funktionen in dieselbe Beziehung bringen wie sie bei den Krebsen experimentell dargetan ist, kommen wir zu der Erkenntnis, daß bei den höheren Wirbeltieren und beim Menschen einerseits die Richtung von vorn nach hinten und andererseits die von oben nach unten, also im Sinne der Schwerkraft durch Statolithen kontrolliert wird. Im sogenannten Sacculus und Utriculus des Ohrlabyrinths des Menschen haben wir zwei mit Nervenendfasern versehene Zellgruppen, welche in der Wand eines mit Flüssigkeit erfüllten Hohlraums liegen und in diesen Hohlraum lange, wimperartige Fortsätze hineinsenden. Auf diesen Fortsätzen ruhen die Statolithen, und zwar der eine so, daß er bei der Vorwärtsbewegung des Tieres gegen die Haare angedrückt, bei der Rückwärtsbewegung von ihnen entfernt wird, während der andere so angeordnet ist, daß er beim Emporsteigen des Körpers gegen die Haare gedrückt, beim Niedersinken desselben abgehoben wird. Wir werden entsprechend dieser Anordnung dem Statolithenorgan des Menschen eine Reaktion auf die Verschiebungen des Körpers in der horizontalen Richtung einerseits, in der perpendikulären andererseits zuschreiben. Daß die Muskulatur auf derartige Bewegungen automatisch reagiert, indem wir etwa beim plötzlichen Abwärtssinken die Arme emporstrecken, um einen Halt zu suchen, beim plötzlichen Emporgehobenwerden entgegengesetzte Schutzbewegungen machen, kann jeder auf einem schnell sich bewegenden Fahrstuhl beobachten und zwar speziell in Momenten, wo sich derselbe in Bewegung setzt oder zum Stillstand kommt. Die gleichmäßig andauernde fallende oder steigende Bewegung wird von uns nicht empfunden und kann ja auch nach der eben entwickelten Mechanik des Statolithenapparates nicht empfunden werden. Ähnlich steht es um die Bewegung vor- und rückwärts in horizontaler Richtung. Auch hier empfinden wir den Eintritt der Bewegung und ihren Stillstand sowie rasche Beschleunigung oder Verlangsamung, nicht aber gleichmäßig andauernde schnelle Bewegung. Das kann man im Eisenbahnzug bei geschlossenen Augen leicht beobachten. Bei der Beurteilung des Bewegtwerdens und beim Zustandekommen der dadurch bedingten Muskelreflexe spielt nun aber, wie wir vorher schon erörterten, auch das Auge eine große Rolle. Davon kann man sich besonders deutlich überzeugen bei jenen auf Jahrmärkten öfters vorgeführten Einrichtungen, bei denen die Gegenstände um den ruhig sitzenden Menschen gedreht werden. Der Anblick dieser Bewegung erweckt die Vorstellung, daß wir selbst in Bewegung seien. Dabei entsteht ein Konflikt zwischen den durch den Statolithenapparat bewirkten Eindrücken, welche ja dem ruhenden Zustande unseres eigenen Körpers entsprechen, und den durch das Auge übermittelten Empfindungen, welche uns das Vorhandensein einer Bewegung kund geben. Aus diesem Konflikt der sonst unter normalen Verhältnissen harmonischen Eindrücke, resultieren jene unbehaglichen Empfindungen, jene Muskelschwäche und Unfähigkeit zu Bewegungen, welche wir als Schwindelerscheinungen kennen. Ähnliche Eindrücke kommen zustande, wenn wir uns etwa in einem Eisenbahnzuge befinden und ein danebenstehender Zug sich plötzlich zu bewegen beginnt. Auch dann erweckt der optische Eindruck die Vorstellung, als würden wir bewegt und zwar in entgegen-

gesetzter Richtung von der, in der der beobachtete Zug fährt, während der Statolithenapparat keinen konformen Eindruck vermittelt. Auch hieraus resultiert das unbehagliche Gefühl der disharmonischen Empfindungen, welches wir nicht haben, wenn der Zug, in welchem wir sitzen, wirklich in Bewegung gerät.

Es gibt aber noch eine zweite Art Schwindel, die uns viel geläufiger ist, das ist derjenige, welcher durch Rotation des Körpers eintritt. Aus dem Bau des Statolithen-

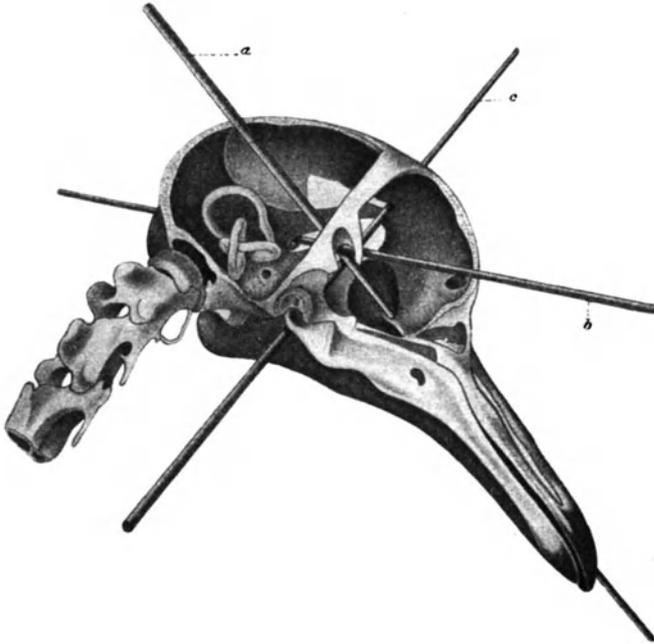


Fig. 6. Bogengänge der Taube, in ihrer Lage im Schädel freipräpariert. Die Stäbe a, b, c markieren die drei Hauptachsen des Schädels. (Aus Ewald, *Physiolog. Unters.*)

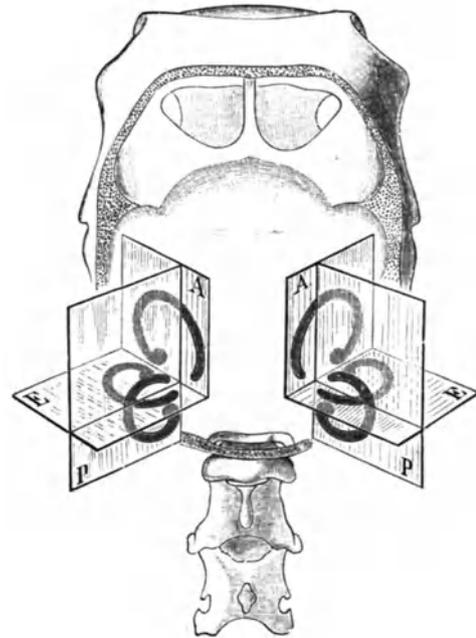


Fig. 7. Zur Veranschaulichung der Ebenen, nach welchen die halbzyklischen Kanäle orientiert sind. (Aus Ewald.)

apparates ergibt sich ohne weiteres, daß derselbe hierbei keine Rolle spielen kann. Alle Wirbeltiere besitzen aber im Innern des Schläfenbeins neben dem Statocystenapparat noch eine zweite sehr merkwürdige Einrichtung, bei deren Anblick man ohne weiteres auf die Idee kommen muß, daß dieselbe etwas mit den Rotationen des Kopfes zu tun haben müsse. Das sind die halbzyklischen Kanäle. Fig. 6 nach Ewald gibt eine vergrößerte Abbildung ihrer Lage im Schädel der Taube, bei der sie, wie bei allen Vögeln, besonders gut ausgebildet und relativ groß sind. Es handelt sich um drei etwas mehr als einen Halbkreisbogen beschreibende Kanäle, daher der Name: „halbzyklische Kanäle“. Diese Kanäle sind in drei aufeinander senkrechten Ebenen angeordnet. Die Anordnung zeigt halbschematisch Fig. 7. Der eine E, als horizontaler Kanal oder *Canalis externus* bezeichnet, liegt in der Querebene des Kopfes, der zweite als oberer vorderer A bezeichnet, in der Stirnebene, der dritte oder der obere hintere P in der Ebene der Pfeilnaht, d. h. in der vom Gesicht zum Hinterhaupt sich erstreckenden Richtung. Früher, als man den ganzen Statolithenapparat ebenso wie die halbzyklischen Kanäle noch als Teile des Gehörorgans ansah,

brachte man diese merkwürdige Lagerung der Kanäle mit der Fähigkeit, die Richtung, von der der Schall kommt, zu erkennen, in Beziehung. Diese Annahme erweist sich aber bei genauerer Analyse der Verhältnisse als unmöglich. Die Schallwellen werden, wie wir mit Sicherheit dartun können, vom Trommelfell aufgenommen und durch den Apparat der Gehörknöchelchen auf die Membran des sogenannten ovalen Fensters, welches die Paukenhöhle vom innern Ohr trennt, übertragen. Für diese Übertragung ist es ganz gleichgültig, aus welcher Richtung die Luftwelle stammt, welche zum Ohr gelangt. Denn diese Luftwellen können nie auf andere Weise Schallempfindungen erzeugen als dadurch, daß sie das Trommelfell in Schwingungen versetzen. Demgemäß können nur die äußeren Teile des Ohrs, die Ohrmuscheln und die Anfänge des äußeren Gehörganges mit ihren Empfindungsnerve durch die Richtung des Schalles beeinflußt werden. Sie allein sind es in der Tat, welche uns über die Richtung, aus der die Schallwellen unser Ohr treffen, einigen, und beim Menschen wenigstens, keinen sehr vollkommenen Aufschluß geben. Wesentlich gefördert wird die Orientierung durch die Beweglichkeit des Ohrtrichters, wie wir sie z. B. in exquisiter Weise beim Pferde beobachten. Hier muß natürlich bei der Bewegung des Trichters der Schall lauter gehört werden, in dem Maße, wie die Öffnung des Trichters der Richtung zugewendet ist, von welcher der Schall kommt. Von der enormen Wirkung dieser Einstellung des Trichters nach der Schallrichtung kann man sich sehr leicht durch Verwendung eines einfachen Schalltrichters aus zusammengerolltem Papier selbst überzeugen.

Da wir uns also eine Beziehung der halbzirkelförmigen Kanäle zum Hören nicht vorstellen können, werden wir uns nach einer anderen Bedeutung derselben umsehen müssen, und da liegt es nahe, sie mit irgend welchen Bewegungsempfindungen resp. mit der Orientierung in den drei Dimensionen des Raumes in Beziehung zu bringen. Ihr anatomischer Bau entspricht durchaus dieser Auffassung. Sie sind mit einer wässrigen Flüssigkeit gefüllt und haben an einem Ende eine Gruppe von mit Haaren versehenen Nervenendzellen, von denen wir wohl annehmen können, daß sie auf feine Bewegung der Flüssigkeit oder auch schon auf Druckänderungen in derselben reagieren. Denken wir uns einen Menschen oder auch nur seinen Kopf rasch von rechts nach links oder umgekehrt bewegt, so wird in dem horizontal liegenden Kanal die Flüssigkeit vermöge ihrer Trägheit ein wenig hinter dieser Bewegung zurückbleiben, woraus ein mechanischer Effekt auf die in der Flüssigkeit schwimmenden Nervenendhaare resultiert. Das würde ein Mittel zur Wahrnehmung der Drehbewegung sein. Wie der horizontale Kanal eine Bewegung um die Längsachse des stehenden Körpers wahrnehmen muß, so der vordere senkrechte eine solche um die Querachse des Kopfes, also eine Nickbewegung, und der hintere senkrechte eine solche um die Sagittalachse des Kopfes. Wir müßten demgemäß erwarten, daß die als Reaktion auf derartige Verschiebungen des Kopfes ausgeführten Bewegungen von den halbzirkelförmigen Kanälen ausgelöst werden. Diese Annahme ist einer experimentellen Prüfung zugänglich. Man hat zunächst durch verhältnismäßig rohe Versuche feststellen können, daß der Apparat der halbzirkelförmigen Kanäle Einfluß auf die Bewegungen hat. Wenn man bei einem Tier das innere Ohr freilegt und die halbzirkelförmigen Kanäle verletzt, treten alsbald sehr komplizierte und gewaltsame Bewegungen des Kopfes und

zum Teil auch des übrigen Tierkörpers ein. Diese Bewegungen halten oft längere Zeit nach der Verletzung an. Auch wenn man das Ohrlabyrinth einer Seite, etwa bei einer Taube, gänzlich zerstört, sieht man das Tier stunden- und tagelang in verdrehten Haltungen des Kopfes verharren. Es ist aber der experimentellen Geschicklichkeit von Professor Ewald in Straßburg gelungen, über diese rohen Andeutungen der Beziehungen der halbzirkelförmigen Kanäle zur Kopfhaltung und zur Bewegung des Tierkörpers wesentlich hinaus zu gelangen. Er hat beispielsweise an einem der halbzirkelförmigen Kanäle nach seiner Bloßlegung eine feine Vorrichtung angelagert, welche er als pneumatischen Hammer bezeichnet. Es handelt sich um einen feinen hohlen Stahlzylinder von etwas über 1 mm Durchmesser, welcher in einer Messingplatte befestigt ist und mit dieser derart auf den Schädel einer Taube, deren Labyrinth bloßgelegt ist, befestigt wird, daß der im Zylinder bewegliche Stahldraht, wenn er vorgestoßen wird, gerade auf einen der halbzirkelförmigen Kanäle drückt. Ein solcher Stoß muß natürlich eine starke, plötzliche Erschütterung der Innenflüssigkeit und damit Reizung der Nervenendigungen zur Folge haben. Damit man die Reaktionen ganz unbeeinflusst beobachten kann, wird die Taube, nachdem der pneumatische Hammer an einen ihrer Bogengänge befestigt ist, frei unter einen Drahtkäfig gestellt. Von dem Hammer führt ein langer, dünner Kautschukschlauch zu einer kleinen Druckkapsel, welche der Experimentator in der Hand hält, und mit deren Hilfe er den Hammer gegen den Bogengang anschlagen lassen kann. Wir beschreiben nun einen der Versuche mit Ewalds eigenen Worten: „Der pneumatische Hammer befindet sich über dem rechten Canalis externus, zwischen ihm und dem glatten Ende des Kanals ist eine Plombe eingesetzt.“ (Diese Plombe bewirkt, daß die Flüssigkeit nicht mehr nach dem nervenlosen Ende ausweichen kann, vielmehr der Druck des Hammers auf den häutigen Kanal nur eine in der Richtung nach dem Nervenende hinziehende Druckwelle erzeugt.) „Läßt man nun den Hammer anschlagen, ohne ihm eine Rückbewegung zu gestatten, so erfolgt eine starke bis 90 % betragende Drehung des Kopfes nach links genau in der Ebene des horizontalen Kanals. Zu dieser Drehung gesellt sich niemals irgend eine andere Bewegung des Kopfes hinzu, auch habe ich nicht ein einziges Mal gesehen, daß die Bewegung in umgekehrter Richtung erfolgt wäre. Gewöhnlich geht nach dieser Bewegung der Kopf unmittelbar darauf in die Normalstellung zurück. Wir ziehen dann den Hammer zurück und erhalten nun eine Kopfdrehung nach rechts, welche ebenfalls genau in der Ebene des Kanals abläuft, aber ungleich schwächer als die erste Bewegung ist. Wir drücken nach beliebiger Zeit wieder und erhalten die starke Bewegung nach links, wir lassen den Ballon nach beliebiger Pause wieder los und beobachten die schwache Drehung nach rechts, kurz immer mit größter Präzision das gleiche Resultat¹⁾.“

Die volle Bedeutung des Labyrinths für die Bewegungen und die Gleichgewichtserhaltung können wir aber doch nur würdigen, wenn wir noch einige weitere Beobachtungen anreihen.

Beim Menschen entstehen bei Entzündungen im Bereiche des Ohrlabyrinths die heftigsten Störungen der Körperhaltung, verbunden mit starkem Schwindel,

¹⁾ Richard Ewald, Physiologische Untersuchungen über das Endorgan des Nervus octavus, Wiesbaden 1892.

Erscheinungen, welche den Ohrenärzten als „Menièresche Krankheit“ geläufig sind. Dieselben Erscheinungen treten bei Tieren auf, welchen man die Ohrlabyrinth mechanisch verletzt oder gänzlich zerstört. Im letzteren Falle ist es die Wundreizung der Nervenstümpfe des die Labyrinthempfindungen zum Hirn leitenden achten Hirnnerven, welche dieselben Empfindungen erzeugt, wie sie normal bei rasch wechselnden anormalen Körperstellungen entstehen. Diese Empfindungen lösen dann gewaltsame Körperbewegungen und forcierte Stellungen des Kopfes und der Extremitäten aus, wie sie zur Wieder- gewinnung der richtigen Körperhaltung dienlich wären, wenn die nur empfundenen Verlagerungen des Kopfes und des übrigen Körpers in Wirklichkeit beständen. Die anormalen Haltungen des Kopfes, welche längere Zeit nach der Operation aufhören können, treten wesentlich stärker auf, wenn die Augen verschlossen sind, so daß ihre Kontrolle über die Haltung verloren geht. Fig. 8, dem Buche Ewalds S. 12 entnommen, zeigt die Kopfhaltung einer Taube, die durch eine übergezogene Kappe am Sehen verhindert wird. Sehend zeigte das Tier keine merkbaren Abweichungen der Kopfhaltung.



Fig. 8. Kopfhaltung einer labyrinthlosen Taube, wenn die Orientierung durch das Auge ausgeschlossen ist.

Goltz ¹⁾, welcher zuerst die Idee begründete, daß wir es in dem Ohrlabyrinth mit einem Organ zu tun haben, welches die Empfindung der Kopf- und damit der Körperstellung vermittelt, gibt auch einen sehr interessanten Versuch an, welcher zeigt, daß die Körperbewegungen auch bei erhaltenem Labyrinth nicht mehr völlig reguliert werden können, sobald die Stellung des Kopfes abnorm ist und infolgedessen die Lageveränderungen des Körpers andere Verschiebungen der Statolithen und der die halbzirkelförmigen Kanäle füllenden Flüssigkeit erzeugen als in der Norm. Goltz nähte einer Taube den Kopf genau in derselben verdrehten Stellung vor der Brust fest, welche ein anderes Tier, dessen Bogengänge teilweise zerstört waren, dauernd innehielt. Der Kopf wurde nach rechts soweit herumgedreht, bis der Scheitel dem Erdboden zugewendet war und das Hinterhaupt die Brust berührte. Seine Haut wurde mit der der Brust fest vernäht. Setzte man das Tier, an dem diese chirurgisch geringfügige Operation ausgeführt war, auf eine Stuhllehne, so fiel es sofort nach hinten herab, als man den Stuhl nur wenig neigte. Es war ganz unfähig zu fliegen; ließ man es frei in der Luft los, so stürzte es unter lebhaftem Flügelschlag senkrecht auf den Fußboden. Es werden offenbar die Flügelmuskeln nicht mehr in ihren kräftigen Bewegungen so koordiniert, und die Haltung des Rumpfes entsprechend reguliert, wie es für die Behauptung des Gleichgewichtes beim Fluge nötig ist. Die Störungen waren hier wohl deshalb

¹⁾ Fr. Goltz, Über die physiologische Bedeutung der Bogengänge des Ohrlabyrinths. Pfügers Arch. III, 172, 1870.

besonders groß, weil die abnorme Stellung des Kopfes auch den anderen Regulator der Körperhaltung, die Augen verdrehte, die Gesichtseindrücke nicht in ihrer normalen Beziehung zu den Bewegungen des Tieres zustande kommen konnten, so daß auch vom Auge her unzweckmäßige Bewegungsimpulse dem Hirn zugeleitet wurden. — So ist es auch verständlich, daß das Tier auch auf dem Erdboden keine Neigung zeigte, von selbst seinen Standort zu verlassen. Wurde das Tier durch Reize zu Bewegungen veranlaßt, so machte es einige Schritte rückwärts.

Die Bedeutung, welche die vom Labyrinth ausgehenden Empfindungen für unsere Raumvorstellungen haben, hat besonders Cyon ¹⁾ durch sehr genaue Prüfung der Raumorientierung im Dunkeln nachgewiesen. — Um die Genauigkeit mit der wir über die 3 Raumkoordinaten im Dunkeln orientiert sind, zu prüfen, ließ er die Versuchspersonen an einer senkrecht aufgestellten Tafel senkrechte und horizontale Striche ziehen; auf einer zweiten horizontalen Tafel mußten dann einander kreuzende Striche in frontaler und sagittaler Richtung, d. h. von links nach rechts und von vorn nach hinten ausgeführt werden. Diese Aufgabe wurde von den Versuchspersonen mit großer Präzision ausgeführt, so lange sie ihren Kopf in normaler Stellung hielten. Jede Neigung des Kopfes nach vorn oder hinten, nach rechts oder links, und ebenso jede Drehung des Kopfes um die Längsachse des Körpers hatte Fehler in der Zeichnung der Linien zur Folge, welche zwar individuell verschieden groß waren, aber für jede abnorme Haltung des Kopfes gesetzmäßig bei allen Personen in derselben Richtung erfolgten. Dies zeigt evident, daß das Sinnesorgan, welches uns im Dunkeln eine genaue Raumorientierung ermöglicht, im Kopfe gelegen ist und durch jede Lageänderung des Kopfes beeinflußt wird. — Sehr interessant und die nahen Beziehungen des Raumsinnes zum Hören erläuternd, ist der Befund, daß nach intensiven lange dauernden Höreindrücken, z. B. nach Hören eines Konzerts, die Fehler wesentlich vergrößert werden. — Stärker als nach Hören von Musik werden aber die Fehler nach eigenem Violinspiel des Versuchsobjektes. Hier kommt vielleicht noch ein anderes bedeutungsvolles Moment in Betracht, das ist die lange andauernde einseitige Neigung des Kopfes beim Halten der Violine. Das Labyrinth stellt sich wahrscheinlich auf diese lange eingenommene Haltung ein und macht deshalb größere Fehler als wenn die normale Stellung dauernd innegehalten wäre. Der Befund ist analog dem Verhalten der Taube mit in abnormer Lage fixiertem Kopf. Daß die andauernde Linksneigung des Kopfes beim Violinspiel in der Tat den Fehler bei der nachfolgenden Prüfung des Raumsinnes vergrößert hat, geht daraus hervor, daß der Fehler nach dem Musizieren bei Linksneigung des Kopfes 28°, bei Rechtsneigung aber 36° betrug. Hatte keine Musik eingewirkt, so betrug die Winkelabweichung gleichmäßig bei Links- und Rechtsneigung 1—2°. Die Beziehung der Schalleindrücke zum Vestibularapparat ist aber in jüngster Zeit noch durch eine eigenartige Versuchsanordnung von Piper demonstriert worden, und zwar bei Fischen, bei denen man nach den vorher (S. 17) kurz besprochenen Beobachtungen ein gänzlich fehlendes Gehöreindrücken angenommen hatte. — Piper benutzte zu seinen Studien die Tatsache, daß jeder Nerv und auch jede Sinneszelle bei der

¹⁾ E. von Cyon, Pflügers Arch. 71 S. 72, 79 S. 211, 90 S. 585, 94 S. 139, 96 S. 486, 118 S. 525.

Tätigkeit ein modifiziertes elektromotorisches Verhalten zeigt. Die tätige Zelle verhält sich negativ im Vergleich zur ruhenden, und diese Negativität dauert genau so lange wie der aktive Zustand. Wir besitzen heutzutage in dem von Einthoven ¹⁾ in die physiologische Technik eingeführten Saitengalvanometer ein ausgezeichnetes Instrument, um diese äußerst geringen und flüchtigen Potentialschwankungen zu registrieren. Das Saitengalvanometer besteht aus einem äußerst dünnen versilberten Quarzfaden von wenigen Tausendstel Millimeter Dicke, der in einem starken magnetischen Felde ausgespannt ist. Sobald der schwächste galvanische Strom diesen feinen Leiter durchfließt, wird er aus seiner Ruhelage abgelenkt und zwar nach entgegen gesetzter Seite je nach der Richtung des Stromes. Die winzigen Ablenkungen des durch eine kräftige Bogenlampe beleuchteten Fadens werden mit Hilfe einer Mikroskoplinse auf gleichmäßig vor dem punktförmigen Bilde der Fadenmitte vorbeibewegtem photographischem Papier als eine Kurve registriert. Die Empfindlichkeit des Instruments ist so groß, daß man damit nicht nur den Ablauf des Erregungsvorganges, welcher bei momentaner Reizung einer Stelle eines Nervenstamms sich über diesen mit einer Geschwindigkeit von etwa 30 m pro Sekunde fortpflanzt, genau messen kann, sondern auch die flüchtige Änderung des Potentials in der Netzhaut des Auges bei momentaner Belichtung desselben. — Mit Hilfe dieses Apparates hat Piper die Frage behandelt, ob Schall erregend auf das Ohrlabyrinth der Fische einwirkt. Er halbierte den Kopf eines Hechtes von oben nach unten, entfernte das Hirn und legte von 2 zum Saitengalvanometer führenden Elektroden die eine an den auf der Schnittfläche zutage tretenden Otolithen, die andere 1—1½ cm von dieser Stelle entfernt an einen indifferenten Punkt. So oft die von einer Membranpfeife erzeugten Schallwellen dem Kopfstück durch das Wasser zugeleitet wurden, entstand ein Strom im Sinne des Negativwerdens der Gegend des Otolithen. Der Strom trat 0,02 Sekunden nach Ertönen des Schalles auf und bestand mit allmählich abnehmender Intensität, so lange die Pfeife tönte, 0,02—0,04 Sekunden nach Abklingen des Tones hörte der Strom auf. — Mechanische Erschütterung des Wassers rief einen solchen Aktionsstrom nicht hervor. Leiser Druck auf den Otolithen oder mechanische Verschiebung desselben auf den Nervenzellen erzeugte nur unregelmäßige Aktionsströme von wechselnder Richtung. Verfasser hält durch diese Versuche die Schallerregbarkeit des Fischlabyrinths für sicher bewiesen, wenn er auch seine Bedeutung für die Raumorientierung des Tieres durchaus anerkennt. Er meint, daß die „Raumsinnfunktionen des Labyrinths in ähnlichem Sinne der Aufgabe der Schallperzeption angegliedert sind, wie im Gebiete des Gesichtsinnes sich zur prinzipiellen Aufgabe der Lichtperzeption die der optischen Orientierung fügt“. — Es muß weiterer Forschung vorbehalten bleiben, den Widerspruch zu klären zwischen diesen Befunden und dem vergeblichen Bemühen von Beer, Kreidl und anderen Forschern irgend ein sicheres Zeichen von Hören bei Fischen nachzuweisen.

Angesichts des Widerspruchs, der zwischen den Befunden Pipers, aus welchen dieser ein Hören der Fische ableitete, und den negativen Ergebnissen aller vorsichtigen Versuche, bei Fischen Reaktionen auf Schalleindrücke nachzuweisen, besteht, bleibt

¹⁾ W. Einthoven, Ein neues Galvanometer. Onderzoekingen in het Physiolog. Laboratorium te Leiden 1904, S. 168.

nach wie vor der Raumsinn die wesentlichste Leistung des sogenannten Gehörorgans der Fische. Die Beziehung des Raumsinns zum Labyrinth beim Menschen wird aber noch durch einige Versuche illustriert, welche wir bisher nicht besprochen haben. Neben Breuer, dessen Versuche wir schon oben erwähnten, hat besonders der Physiker Mach die Reaktionen, welche beim Menschen vom Ohrlabyrinth ausgehen, speziell die Erscheinungen des Schwindels bei rascher Rotation des Körpers genau studiert. Ihm, wie allen anderen Forschern auf diesem Gebiete, fielen die gesetzmäßigen Beziehungen zwischen schneller Körperrotation und abnormen zuckenden Bewegungen der Augäpfel, dem sogenannten Nystagmus auf. Diese Bewegungen kann man, so weit sie bei offenen Augen erfolgen, darauf beziehen, daß der Mensch versucht, die einmal fixierten Punkte des Raumes mit dem Blick festzuhalten, daß dies aber infolge der schnellen Rotation nicht gelingt und nun immer neue ruckweise Einstellungen auf Fixpunkte stattfinden. Der Nystagmus wird aber auch bei geschlossenen Augen beobachtet, man kann die ruckweisen Bewegungen der Augäpfel durch die geschlossenen Lider hindurch fühlen. Das beweist, daß die Bewegung der Augen noch von einer anderen Stelle des Körpers als von der eigenen Netzhaut beeinflußt wird und diese Stelle ist wiederum das Organ der Raumorientierung, das Ohrlabyrinth. Der Zusammenhang der Augenbewegungen mit Reizen, welche das Ohrlabyrinth treffen, konnte in allen Versuchen, bei welchen Operationen, Verletzungen oder Reizungen des Ohrlabyrinths ausgeführt wurden, nachgewiesen werden. Speziell in dem mehrfach zitierten Buche von Ewald finden sich zahlreiche hierher gehörige Beobachtungen und Experimente. Von besonderer Bedeutung aber zur Beurteilung dieser Erscheinungen ist das, was man bei Erkrankungen des Ohrlabyrinths beobachtet. Bei Taubstummen beruht der Verlust des Gehörs in der größeren Zahl der Fälle auf Entzündungen und Eiterungen, welche das Ohrlabyrinth in früheren Lebensjahren, meist im Anschluß an Scharlach und andere Infektionskrankheiten, betroffen haben. Die anatomische Untersuchung solcher Taubstummen ergibt in einem großen Teil der Fälle vollständige Zerstörung des Labyrinths, d. h. sowohl der Gehörschnecke, in welcher unzweifelhaft die eigentlichen Tonempfindungen zustande kommen, als auch des Otolithenapparates und der halb-zirkelförmigen Kanäle. In einer kleineren Zahl der Fälle ist nur die Schnecke zerstört, während die letztgenannten Organe noch mehr oder weniger funktionsfähig erscheinen. Diesen differenten anatomischen Befunden entspricht nun das Verhalten des Raumsinnes der Taubstummen. In einem ähnlich großen Prozentsatz derselben, wie nach den anatomischen Untersuchungen sich eine vollständige Zerstörung des Labyrinths findet, fehlt der vorher von uns erörterte Einfluß desselben auf die Augenbewegungen sowohl, wie auf die Empfindung der richtigen Lage des Körpers. Wenn ein derartiger Taubstummer auf einem Rotationsapparate in schnelle Umdrehungen versetzt wird, fallen alle nystagmusartigen Bewegungen seiner Augäpfel weg, sobald die Augen geschlossen sind. Diese Bewegungen der Augen beruhen also auf nervösen, vom Labyrinth ausgehenden Impulsen, welche die Stellung des Auges in die den Lageempfindungen des Labyrinths entsprechende Blickrichtung einzustellen streben. In der Tat ist nun bei zerstörtem Labyrinth das Auge das einzige Sinnesorgan, welches abgesehen von den Muskelempfindungen über die Lage im Raume und über passive Bewegungen des Körpers orientiert. Das tritt am eklatantesten in einer Reihe von

Erfahrungen über das Verhalten Taubstummer im Wasser zutage. Wenn ein normaler Mensch beim Baden taucht und seinen Körper unter Wasser in irgendwelche von der senkrechten abweichende Stellung bringt, so ist er doch in jedem Augenblick über unten und oben orientiert. Es gelingt ihm fast unbewußt, mit wenigen Schwimmstößen wieder zur Oberfläche des Wassers zu gelangen. Anders der Taubstumme, dessen Labyrinth zerstört ist. Er ist, sobald er unter Wasser aufhört zu sehen, vollkommen desorientiert und darum in höchster Gefahr zu ertrinken. Es beruht dies darauf, daß ja im Wasser der Einfluß der Schwere auf den Gesamtkörper so gut wie vollkommen aufgehoben ist, und deshalb die Richtung, in der die Schwere wirkt, d. h. die Richtung oben und unten nur noch durch einen Apparat erkannt werden kann, der auch im Wasser durch die Schwere beeinflußt wird, und das ist eben der Otolithenapparat unseres Labyrinths. Der Flieger in der Luft ist keineswegs in gleichem Maße auf den Otolithenapparat angewiesen; er hat ja, abgesehen von der Orientierung durch das Auge auch im Druckgefühl der Haut ein wesentliches Hilfsmittel, um jede Schwankung seiner Körperstellung zur Schwerlinie zu erkennen. Nicht mit Unrecht sagen erfahrene Flieger, daß sie mit Hilfe ihres Gesäßes jede Schwankung ihres Flugzeuges mit großer Sicherheit erkennen. Da ja der Drucksinn unserer Haut, wie wir schon früher sahen, auf kleine Änderungen des belastenden Druckes mit großer Feinheit reagiert, kommen von hier aus kleine Schwankungen der Körperstellung zum Bewußtsein. Es besteht aber keinesfalls eine so feine Verbindung der die Muskeln innervierenden nervösen Zentren mit der Hautsensibilität gerade der Sitzgegend, wie sie etwa mit derjenigen der Fußsohlen vorhanden ist. Die Fußsohlen werden ständig beim Gehen und bei wechselnden Stellungen des Körpers als Organe zur Beurteilung der Beziehungen des Menschen zur Unterlage, zum Boden, benutzt und darum sind die Regulationsmechanismen, welche auf jede Ungleichheit in der Belastung der Fußsohlen durch zweckmäßige kompensierende Muskelbewegungen reagieren, viel vollkommener ausgebildet als jene, welche etwa von der Haut des Gesäßes ausgehen. Da alle diese Regulationen, sowohl die von der Haut, wie die vom Ohrlabyrinth ausgehenden, mehr oder weniger unbewußt erfolgen, kann auch der Flieger, wenn er automatisch zweckmäßige Regulationsbewegungen bei Schwankungen seines Sitzes ausführt, nicht entscheiden, wieviel von diesen Bewegungen vom Ohrlabyrinth, wieviel von der Hautsensibilität her ausgelöst wird. Auf alle Fälle erscheint es in hohem Maße gewagt, wenn ein Mensch, dessen Otolithenapparat nicht normal fungiert, die Leitung eines Flugzeuges versucht. Es fehlt ihm jedenfalls ein wichtiges Hilfsmittel, welches die schnelle und halbautomatische Reaktion auf jede Schwankung seines Sitzes vermittelt. Diese Warnung gilt nicht nur gegenüber Menschen, bei denen der Otolithenapparat gänzlich zerstört ist, er gilt in viel höherem Maße gegenüber geringen Störungen dieses Apparates, wie sie bei Entzündungen des Mittelohrs, zuweilen schon bei Verschuß der Ohrtrompete auftreten und sich in leichten Schwindelerscheinungen äußern, die besonders bei Druckschwankungen im Mittelohr, also etwa beim Nießen, beim Schnauben der Nase und ähnlichen Vorgängen bemerkbar werden. Die durch derartige relativ unbedeutende Störungen verminderte Leistungsfähigkeit wird besonders da hervortreten, wo die Steuerung des Flugzeuges möglichst den normalen Kompensationsbewegungen, welche wir

instinktiv bei Lageänderung unseres Körpers ausführen, angepaßt ist, und eine solche Anpassung wird mit Recht bei allen neueren Apparaten durchgeführt. Man sieht ja noch bei manchen Flugzeugen den Steuerapparat unsymmetrisch, etwa zur rechten Hand angeordnet. Das halte ich für recht bedenklich, weil es zu Störungen der Gleichgewichtslage des Fliegers gerade in kritischen Momenten Anlaß geben kann. Die Bedeutung der möglichst automatisch, unseren gewohnten Reflexen entsprechend auszuführenden Steuerbewegungen hat J. R. Ewald in einem sehr anregenden Aufsatz in der Frankfurter Zeitung vom 19. Oktober 1909 auseinandergesetzt. — Hier finden sich auch entsprechende Hinweise auf die mit der Schwierigkeit der mechanischen Leistungen wachsende Ausbildung des Goltzschen Sinnesorgans in der Tierreihe. „Wir finden bei statisch besonders geschickten Tieren die Bogengänge größer, gleichmäßiger in ihrer Rundung und mehr zu einzelnen selbständig ausgebildeten Ringen entwickelt. Das Eichhörnchen hat in diesem Sinne besser ausgebildete Bogengänge als das Kaninchen, der Affe bessere als der Hund, der Fisch bessere als die Schlange. Die besten haben die Vögel.“ Unter diesen wieder fand Ewald das vollkommenste Organ bei den Schwalben, dann kommen Tauben und Raben, weit zurück stand das Huhn und noch mehr die Gans. — Im Hinblick auf die Bedeutung dieser Dinge für den Steuerapparat des Flugzeugs wollen wir noch einmal einen Blick auf den nervösen Regulationsmechanismus des fliegenden Vogels werfen. Wenn auch das Gehirn und die ihm ständig vom Labyrinth, vom Auge und von der gesamten empfindenden Körperoberfläche zugeleiteten Erregungen für die reguläre Ausführung des Fluges von entscheidender Bedeutung sind, so wird doch diesen höheren Zentren ein Teil ihrer Arbeit durch das verlängerte Mark und Rückenmark abgenommen. Besonders lehrreich sind in der Hinsicht die Versuche, welche W. Trendelenburg über die Bewegungsstörungen anstellte, die bei Tauben nach Durchschneidung der hinteren Rückenmarkswurzeln auftreten. — Die Bedeutung der durch die hinteren Wurzeln dem Zentrum zugeleiteten Reize (Empfindungen) für die koordinierten Bewegungen ist ja genügend bekannt aus den Störungen des Ganges des Menschen bei der Tabes dorsalis (vgl. S. 11) und aus den analogen Störungen, welche höhere und niedere Tiere nach Durchschneidung der hinteren Rückenmarkswurzeln in der Bewegung der von den zugehörigen vorderen Wurzeln versorgten Muskeln zeigen. W. Trendelenburg ¹⁾ hat die hierher gehörigen Störungen des Vogelflugs untersucht. Nach beiderseitiger Durchschneidung der Hinterwurzeln der Flügelnerven ist das Flugvermögen dauernd aufgehoben, dagegen ist es nach einseitiger Durchschneidung dieser Wurzeln so gut wie absolut intakt. Hierin besteht ein auffälliger Gegensatz zwischen Fliegen und Gehen: Letzteres ist nämlich auch bei einseitiger Störung der zugehörigen Hinterwurzeln hochgradig gestört. Die Ataxie ist zuweilen nach einseitiger Durchschneidung so stark, daß das Gehen unmöglich wird, wie es regelmäßig bei beiderseitiger Durchschneidung der Fall ist. Der Unterschied erklärt sich daraus, daß die Flügelbewegungen beider Körperseiten stets symmetrisch erfolgen, die Beinbewegungen dagegen alternierend, so daß die Bewegung jedes Beines für sich durch die Empfindungen kontrolliert werden muß. —

¹⁾ Trendelenburg, Über die Bewegung der Vögel nach Durchschneidung hinterer Rückenmarkswurzeln. Arch. f. (Anat. u.) Phys. 1906, und weitere Untersuchungen u. s. w. ebenda Suppl. S. 231. Ferner 1908, S. 201 und *Ergebn. d. Physiologie* 10, S. 454.

Trendelenburg hat auch den Mechanismus der Beeinflussung der Flug- und Gangbewegungen durch die den Muskeln zugeordneten sensiblen Nerven genauer analysiert. Er konnte zeigen, daß die Spannungen der Muskeln, Sehnen und Gelenke, bis zu einem gewissen Grade auch die Verlagerungen der Haut, welche mit einer extremen Stellung des Flügels oder des Beines beim Gehen verbunden sind, durch Vermittlung der zentripetalen Nerven die Innervation der Muskeln, welche diese Stellung herbeigeführt haben, hemmen und die Tätigkeit der Antagonisten in Gang bringen. Der Mechanismus entspricht durchaus dem, welchen wir durch Hering und Breuer schon längst für die Regulation der Atmung kennen. Hier erregt jede Ausweitung der Lungen, gleichgültig ob sie durch eine normale Weitung des Brustkastens oder durch Aufblasen der Lungen bei eröffneter Brusthöhle erfolgt, die nervösen Zentren der Ausatmung durch Vermittlung der dem zehnten Hirnnerven angehörenden Empfindungsnerven, während jede Entleerung der Lunge andere Fasern desselben Nervenstammes erregt, welche dem Zentrum Impulse zu einer Betätigung der die Brust erweiternden Einatmungsmuskeln zuleiten. Man hat diesen nervösen Mechanismus die Selbststeuerung der Atmung genannt, indem man ihn mit dem Steuermechanismus einer Dampfmaschine verglich, welcher den Eintritt des Dampfes in den Zylinder und damit die Bewegungsrichtung des Kolbens umstellt, sobald der Kolben an einer gewissen Stelle seiner Bahn angekommen ist.

So vollzieht sich also die Sukzession der Flügelschläge in richtiger Ordnung durch die Reflexbahnen des Rückenmarks allein, sobald der erste Impuls dazu vom Hirn gegeben ist. Aber diese Sukzession kann jederzeit vom Hirn her unterbrochen und in ihrem Ablauf geändert werden, ebenso wie normal der erste Impuls von ihm ausgeht. Auf diese vom Hirn ausgehenden Reize und Hemmungen haben nun die das Gleichgewicht des Körpers kontrollierenden Sinnesorgane, das Auge und das Labyrinth den entscheidenden Einfluß. Fehlt die Erregung des Auges in absoluter Dunkelheit und damit die Möglichkeit der Kontrolle von Hindernissen bei der Bewegung, so wird der Rückenmarksreflex gehemmt, seine Bahn blockiert und das gleiche gilt, wenn die Gleichgewichtsorgane im Labyrinth ausgeschaltet sind. — Ewald hat durch interessante Versuche seines Schülers Emanuel die Beziehungen der genannten höheren Zentren zu den Muskelreflexen, welche sich im Rückenmark abspielen, dargelegt. Emanuels ¹⁾ Versuchsanordnung war folgende:

Ein Frosch war in senkrechter Stellung, mit den Füßen nach unten, an ein Stativ befestigt. Beide Füße waren mit Schreibhebeln verbunden, welche jede Lageveränderung, speziell also jede zuckende Verkürzung des Beines auf eine rotierende Trommel aufschrieben. Wenn man nun plötzlich an den Hebeln angebrachte Gewichte herabfallen ließ und dadurch eine Zerrung an den Beinen ausübte, so erfolgte im Anschluß an diese eine Verkürzung der Beine, welche zum Teil elastische Rückschwingung der gedehnten Muskeln über die Gleichgewichtslage war, zum Teil aber auf einer durch die Zerrung ausgelösten, in gesetzmäßiger Weise ablaufenden Zusammenziehung der Beinmuskeln beruhte. Man konnte diese Muskeltätigkeit von der reinen elastischen Schwingung leicht dadurch trennen, daß man denselben Ver-

¹⁾ Emanuel, Über die Wirkung der Labyrinth und des Thalamus opticus auf die Zugkurve des Frosches. Pflügers Arch. Bd. 99, S. 363.

such nach Tötung des Tieres und Zerstörung seines Nervensystems ausführte. In diesem Fall kam natürlich nur die elastische Schwingung zum Ausdruck. Das Gleiche wurde beobachtet, wenn die Empfindungsnerven eines Beines durchschnitten waren, aber merkwürdigerweise auch bei intakten Empfindungsnerven der Beine, wenn die Ohrlabyrinth zerstört waren, oder die Abschnitte des Zentralnervensystems, mit welchen diese in Verbindung stehen. Da bei der Versuchsanordnung von Emanuel eine direkte Reizung des Ohrlabyrinths durch Lageveränderung ausgeschlossen war, ergibt sich aus dem Versuch die Tatsache, daß vom Ohrlabyrinth ständig Einflüsse ausgehen, welche das Verhalten der Muskeln gegenüber Empfindungsreizen, ihren Spannungszustand (Tonus) beeinflussen. Eine Tatsache, die Ewald übrigens schon aus einer ganzen Reihe Beobachtungen an labyrinthlosen Tieren gefolgert hat. Für uns ist die Erkenntnis von besonderer Wichtigkeit, daß beim Versagen der Labyrinthfunktion auch die Regulation der Muskelbewegungen von der Haut und vielleicht von den Nervenendigungen in den Sehnen und Gelenken wesentlich gestört ist, ein Grund mehr, allen Störungen der Labyrinthfunktion beim Flieger besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

IV. Bedeutung der Ballongase für die Gesundheit des Luftfahrers.

Unter den Gefahren der Luftschiffahrt spielt die giftige Wirkung der Ballongase eine gewisse Rolle. Während der Fahrt strömt ja bei starkem Aufstieg und bei Besonnung des Freiballons Gas in großen Mengen aus dem Füllansatz aus und sammelt sich in der Umgebung des Ballons, da ja dieser mit den Luftströmungen sich bewegt, eine Reinigung der Luft durch Wind also faktisch nicht stattfindet. Bei Verwendung von Leuchtgas dokumentiert sich die Ansammlung der Gase im Korb deutlich durch den Geruch. Die Frage, ob hierbei gelegentlich durch das giftige Kohlenoxyd Schädigungen der Balloninsassen zustande kommen können, ist nicht absolut zu verneinen. Namentlich wenn man sich in raschem Aufstieg der Höhe von 4000 bis 6000 m nähert, wo der Sauerstoffmangel fühlbar wird, können schon ganz geringe Mengen von Kohlenoxyd gefährlich werden. Diese Erwägung sollte namentlich von der Verwendung des wegen seiner Leichtigkeit und Billigkeit sehr verlockenden Wassergases (CO und H₂ zu annähernd gleichen Teilen) abhalten. Wenn Leuchtgas zur Erreichung der gewollten Höhe nicht ausreicht, sollte man stets reinen Wasserstoff nehmen.

Viel akuter als die Gefahr durch Ausströmen von Ballongas während der Fahrt ist eine andere, welche daraus resultiert, daß die bei der Füllung beschäftigten Personen zuweilen in die Lage kommen, das Ballongas fast rein oder in sehr hohen Konzentrationen einzuatmen. Würde es sich um reinen Wasserstoff handeln, so könnte dadurch nur eine vorübergehende Erstickung mit Ohnmacht zustande kommen, welche kaum üble Folgen hinterlassen würde, wenn der Verunglückte schnell an die frische Luft gebracht wird. Man muß aber bei der Füllung von Ballons daran denken, daß die Ohnmacht bei Atmung reinen oder mit wenig Luft gemischten Wasserstoffs

eintritt, ohne daß ein Gefühl von Atemnot oder sonstige subjektive Warnungen sich bemerkbar machen. Es sollte darum kein Arbeiter am Füllansatz beschäftigt sein, ohne durch eine in der Nähe befindliche Person ständig überwacht zu werden. Bei Füllung mit Leuchtgas ist die Gefahr größer, weil das Kohlenoxyd, das im Leuchtgas je nach seiner Herkunft in Mengen von 5—10 % und noch mehr (im sogen. Wassergas bis nahezu 50 %) enthalten ist, sich mit dem roten Blutfarbstoff zu Kohlenoxydhämoglobin verbindet und dadurch die Sauerstoffversorgung der Organe noch längere Zeit unmöglich macht, nachdem der Verunglückte aus dem Bereich der giftigen Gase entfernt ist. Bekanntlich ist der rote Blutfarbstoff, das Hämoglobin, der Träger des Sauerstoffs aus den Lungen zu den Geweben und Organen des Körpers. 1 g Hämoglobin bindet 1,3 ccm O_2 , so daß 100 ccm Blut mit durchschnittlich 14 g Hämoglobin über 18 ccm Sauerstoff transportieren. Ohne die Affinität des Hämoglobins würden dagegen 100 ccm Blut auf dem Wege der physikalischen Absorption nur 0,4 ccm Sauerstoff aufnehmen können. Da das Blut bei jedem Kreislauf etwa $\frac{1}{3}$ seines Sauerstoffvorrats, rund 6 ccm abgeben muß, um den Bedarf der Gewebe zu decken, ist die physikalisch absorbierte Menge dieses Gases für den Unterhalt des Lebens absolut ungenügend. Die Versorgung der Gewebe mit Sauerstoff vollzieht sich dadurch, daß das Sauerstoffhämoglobin nach später genauer zu besprechenden Gesetzen in einer sauerstoffarmen Flüssigkeit zerfällt und um so mehr von seinem Sauerstoff abgibt, je niedriger der Sauerstoffgehalt der Flüssigkeit ist. Infolgedessen reguliert der Sauerstoffverbrauch der Organe die Zufuhr; je mehr verbraucht wird, desto mehr gibt das Hämoglobin ab. Andererseits nimmt das Hämoglobin um so weniger Sauerstoff auf, je niedriger der Gehalt der Lungenluft an diesem Gase ist, oder je verdünnter diese Luft beim Aufsteigen in größere Höhen wird. Die Bedeutung dieses Umstandes für die Grenzen, bis zu welchen wir in der Atmosphäre ungestraft emporsteigen können, ist noch besonders zu erörtern. Hier haben wir uns nur der Tatsache zu erinnern, daß das Kohlenoxydgas eine etwa 150 mal stärkere Affinität zum Hämoglobin hat als der Sauerstoff. Infolgedessen wird, wenn gleiche Mengen Kohlenoxyd und Sauerstoff eingeatmet werden, nur $\frac{1}{150}$ des Hämoglobins mit Sauerstoff sich verbinden, der ganze Rest mit Kohlenoxyd. Praktisch verhält sich also das Blut bei Atmung eines derartigen Gemisches so, als ob es überhaupt nur den physikalisch absorbierten Sauerstoff enthielte, und der Atmende erstickt ebenso wie in einer sauerstofffreien Atmosphäre. Die Sauerstoffbindung des Hämoglobins sinkt aber schon unter das unentbehrliche Minimum von 6 %, wenn die geatmete Luft neben den 15 % Sauerstoff, welche sich normal in den Lungenbläschen finden, nur 0,3 % Kohlenoxyd enthält.

Das an den Blutfarbstoff gebundene Kohlenoxyd entweicht wieder bei Atmung einer davon vollkommen freien Luft. Diese Regeneration des Blutes kann sich aber nur langsam vollziehen, weil zunächst nach der Entfernung des Verunglückten aus der kohlenoxydhaltigen Atmosphäre die Lungenluft noch längere Zeit das giftige Gas enthält und auch immer neue Mengen desselben aus dem Blute in diese gelangen. Nun genügt aber ein Fehlen des Sauerstoffs während drei Minuten, um die nervösen Zentra der Atmung zu lähmen. Man wird deshalb bei den durch Kohlenoxyd Verunglückten durch das bloße Verbringen in frische Luft selten eine Wiederbelebung erzielen können. Man muß die gelähmte

Atmung durch künstliche Einpumpung von Luft in die Luftwege ersetzen, die Methode der künstlichen Atmung anwenden, welche im wesentlichen darauf hinausläuft, daß man in regelmäßigem Rhythmus den Brustkasten kräftig komprimiert und dann mit dem Druck wieder nachläßt. Diese Methode sollte daher von allen Menschen, welche sich mit der Füllung von Ballons beschäftigen, oder die Aufsicht bei diesem Geschäft führen, geübt sein. Die Art der Handhabung der künstlichen Atmung läßt sich durch einige Abbildungen besser als durch viele Worte illustrieren. Im Prinzip handelt es sich entweder darum, durch kräftigen Druck auf eine möglichst



Fig. 9. Künstliche Atmung nach Marshall Hall. Zusammendrücken des Brustkorbes.

ausgedehnte Partie des vorderen Brustumfangs Luft aus den Lungen auszutreiben und die Wiederfüllung dann der eigenen Elastizität der Rippen zu überlassen, oder darum, die von den Armen zum Brustkasten gehenden Muskeln als Zugstränge zur Hebung der Rippen und damit zur Erweiterung des Brustkastens zu benutzen. Die erstere Methode zeigt Fig. 9 in der Phase des kräftigen Zusammendrückens des Brustkastens. Die Zunge ist vorgezogen und mit ihrer Spitze durch ein umgeschlungenes Tuch gegen die Lippe befestigt¹⁾. Die letztere Methode, welche von Silvester herrührt, wird zweckmäßig in der Art ausgeführt, daß man bei dem auf dem Rücken liegenden Patienten beide Arme über den Kopf hebt und in dieser Stellung einen kräftigen Zug nach oben und hinten an den Armen ausübt. Fig. 10. Es sind dann wesentlich die vom Oberarm zu den Rippen ziehenden, die vordere Begrenzung der Achselhöhle bildenden breiten Brustmuskeln, welche die Rippen emporziehen. Nach so bewirkter Dehnung des Brustkastens führt man die Arme nach abwärts, legt die Vorderarme über die unteren Brustpartien und drückt auf sie und die Oberarme derart, daß der Brustkasten stark verengt wird. Fig. 11. Man kann auf diese Weise, wie Messungen von Loewy und George Meyer ergeben

¹⁾ Diese 3 Abbildungen sind mit gütiger Erlaubnis von Prof. George Meyer dem im Auftrage des Kgl. Ministeriums des Innern herausgegebenen Nothelferbuch entnommen.

haben, mit jeder Ein- und Ausatmungsbewegung zwei Liter und mehr Luft fördern, das ist so viel, wie der Mensch bei ziemlich angestrenzter Arbeit mit jedem Atemzuge ventilert. Die Anwendung der künstlichen Atmung wird, wenn die Kohlenoxyd-

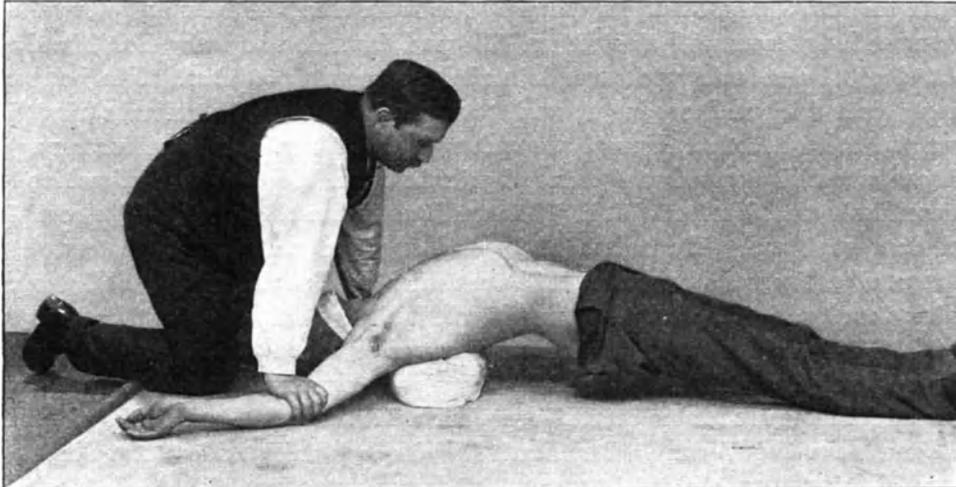


Fig. 10. Künstliche Atmung nach Silvester. Einatmung.

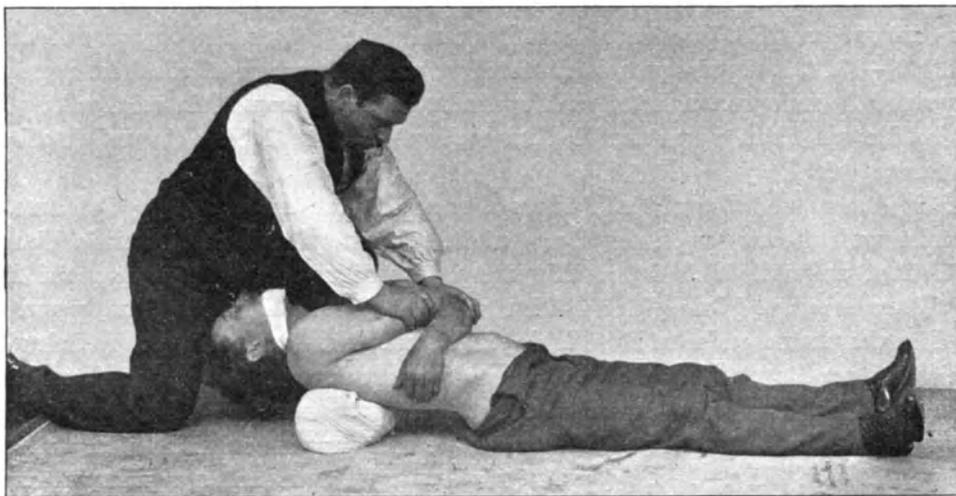


Fig. 11. Künstliche Atmung nach Silvester. Ausatmung.

vergiftung nicht zu lange gedauert hat, zur Wiederbelebung ausreichen. Wenn aber das Blut fast vollständig mit Kohlenoxyd gesättigt ist, erweist es sich oft als nötig, reinen Sauerstoff zuzuführen. Hierzu sollte man ja auf den Ballonfüllplätzen eingerichtet sein, weil es zweckmäßig ist, daß Bomben mit komprimiertem Sauerstoff zur Mitgabe an die Luftschiffer für Hochfahrten bereit gehalten werden. Wenn eine derartige Bombe bereits mit einer Inhalationsmaske versehen ist, wird

man diese vor Mund und Nase halten und durch Zuströmen von Sauerstoff bei fest schließender Maske eine kräftige Ausdehnung des Brustkastens bewirken, dann für einen Moment den Sauerstoffstrom abschließen, die Maske entfernen, worauf die eigene Elastizität des Brustkastens die Luft aus den Lungen entweichen läßt. In dieser Weise kann man, indem man je etwa 3 bis 5 Sekunden lang Sauerstoff einströmen läßt und dann ebenso lange Zeit Mund und Nase frei gibt, eine sehr wirksame künstliche Atmung bewirken. Die belebende Wirkung einer solchen Prozedur übertrifft aus zwei Gründen die einfache künstliche Atmung in hohem Maße. Einmal absorbiert das Blut aus dem zur Einatmung gebrachten reinen Sauerstoff auf rein physikalischem Wege etwa fünfmal so viel Sauerstoff wie aus der Luft, d. h. 100 ccm Blut nehmen statt 0,4—0,5 ccm über 2 ccm Sauerstoff auf. Außerdem aber wird durch den dichteren Sauerstoff das Kohlenoxyd in fünfmal stärkerem Maße aus seiner Verbindung mit dem Hämoglobin verdrängt und dadurch die Entgiftung beschleunigt. Während eine Mischung von Luft mit 0,3 % Kohlenoxyd bei längerer Einatmung schon tödlich wirkt, kann eine Mischung von reinem Sauerstoff mit ca. 1½ % Kohlenoxyd noch ohne Gefahr geatmet werden, wie Haldane durch Versuche an Tieren und Menschen bewiesen hat.

Wenn man bei Verunglückten auf die eine oder die andere Art künstliche Atmung einleitet, darf man nicht vergessen, darauf zu achten, daß die Luft wirklich ungehindert in die Lungen eintreten kann. Bei Bewußtlosen fällt die Zunge leicht der Schwere nach rückwärts gegen den Kehldeckel und verstopft dadurch den Eingang des Kehlkopfs. In solchen Fällen muß man die Zunge nach vorn ziehen und event., indem man die Spitze mit einem Tuch umwickelt, dauernd vorgezogen halten; vgl. Fig. 9—11. Oft erweist es sich als nützlich, an der Zunge rhythmisch im normalen Tempo der Atmung einen kräftigen Zug nach vorn zu üben. Ein solcher Zug hat auch bei Bewußtlosen, wenn nur die Ohnmacht nicht allzu tief ist, eine reflektorische Einatmung zur Folge.

Bei Wasserstofffüllung des Ballons kommen aber noch andere Gefahren in Betracht, weil dieses Gas in der Regel nicht rein ist. Bekanntlich wurde Wasserstoff früher ausschließlich durch Einwirkung verdünnter Schwefelsäure auf Zink oder Eisen erzeugt. In beiden Fällen entsteht reines Wasserstoffgas, wenn die Ingredienzien keine anderen Metalloide enthalten. Nun enthält aber die Schwefelsäure von ihrer Darstellung her fast immer Spuren arseniger Säure, und dann bildet sich neben Wasserstoff das ungemein giftige Arsenwasserstoffgas. Eine zweite Quelle dieses giftigen Gases sind die selten fehlenden Beimengungen von Arsen zum Eisen und häufig auch zum Zink. Nicht ganz so häufig wie Beimengungen von Arsenwasserstoff hat man auch solche von Antimonwasserstoff und Selenwasserstoff in dem entwickelten Gase beobachtet. Durch Arsenwasserstoff sind bereits eine ganze Anzahl von Todesfällen und schweren Erkrankungen bei Menschen, die bei der Füllung von Ballons tätig waren, festgestellt worden, und diese Fälle haben zu einer eingehenden Untersuchung der in Betracht kommenden Verhältnisse durch eine wissenschaftliche Kommission des französischen Kriegsministeriums geführt. Ausführliches über die Ergebnisse findet sich in einer Monographie von Chevalier und Chaignot: „Les intoxications par des gaz des ballons“, Paris 1904. Nach den in großem Umfange ausgeführten Tierversuchen erstreckt sich die Giftigkeit des Arsenwasserstoffs

in erster Linie auf die roten Blutkörperchen, ist also insofern mit der Giftwirkung des Kohlenoxyds einigermaßen verwandt. Aber es bildet sich nicht eine leicht wieder in normales Hämoglobin zurückzuführende Verbindung, vielmehr kommt es zu einer mehr oder weniger weitgehenden Zerstörung der roten Blutkörperchen, aus denen das Hämoglobin in die Blutflüssigkeit übertritt, um dann weiter zu dem für die Sauerstoffaufnahme unfähigen Methämoglobin oxydiert zu werden. Letzteres wird durch die Nieren ausgeschieden und erzeugt hier entzündliche Veränderungen, deren höhere Grade zu einer vollständigen Unterdrückung der Harnsekretion und im Anschluß daran zum Tode führen. In den Tierversuchen der Verfasser erwiesen sich Mengen von Arsenwasserstoff bis zu 20 ccm verteilt in 2000 l Atemluft noch nicht lebensgefährlich. Bei größeren Mengen trat zunächst Erbrechen ein, dann jene Störungen in der Blutbeschaffenheit und als deren Folgen innerhalb einiger Tage Gelbsucht, Harnverhaltung und schließlich Tod. Es bedarf keiner ungewöhnlich großen Verunreinigung der Schwefelsäure mit arseniger Säure, um dem entwickelten Wasserstoff hochgradige Giftigkeit zu erteilen. Ebenso kommen die hierzu nötigen Arsenmengen in Eisenfeilspänen ziemlich häufig vor. Die Verfasser erklären einen Gehalt von 0,1 g Arsen auf 1 kg konzentrierter Schwefelsäure als die äußerste Menge, welche noch ohne große Gefahr zulässig ist. Im allgemeinen frei von arseniger Säure ist die nach dem Kontaktverfahren hergestellte Schwefelsäure, und diese sollte man zur Herstellung von Ballongasen verwenden. Viel sicherer ist es aber natürlich, sich ausschließlich des elektrolytischen Wasserstoffs zu bedienen, wie er in neuerer Zeit ja faktisch in Bitterfeld und an anderen Orten bei Füllung der Ballons zur Verwendung kommt. Bei diesem Gas ist die Beimengung der vorher erwähnten giftigen Wasserstoffverbindungen absolut ausgeschlossen. — Eine Vergiftungsgefahr durch Ballongas kommt gelegentlich auch bei der Landung zustande. v. Schroetter (Hygiene der Aeronautik 1912, S. 45) erwähnt einen solchen Unfall, der ihn selbst im Juni 1902 betroffen hatte: „Ich hatte mich besonders mit dem Freimachen des Ballons beschäftigt, der noch ziemliche Mengen von Gas enthielt; plötzlich traten unter heftigstem Gürtelschmerze im Bereich der unteren Brustapertur (vielleicht Krampf des Diaphragmas) Vernichtungsgefühle ohne Übelkeit ein, und ich sank zu Boden; der Zustand dauerte etwa 2—3 Minuten.“ v. Schroetter berichtet ferner von einem Todesfall bei einem jungen Manne, der sich bemühte, einen zwischen Tannen verfangenen Ballon frei zu machen. Er wurde durch die ausströmenden Gase betäubt, verwickelte sich in das Netzwerk und erstickte so.

V. Einwirkung größerer Höhen auf Kreislauf und Atmung.

Seit den ersten Versuchen von Otto von Guericke und R. Boyle mit der Luftpumpe weiß man, daß es eine gewisse Verdünnung der Luft gibt, welche mit dem Leben der Organismen unverträglich ist. Dementsprechend muß man erwarten, daß die nach oben zunehmende Luftverdünnung der Höhe, welche man im Luftballon erreichen kann, eine Grenze setzt. Diese Grenze ist mehrfach erreicht und überschritten worden. Am meisten besprochen in der Hinsicht ist das traurige Ende der Hochfahrt von Tissandier mit Sivel und Crocé-Spinelli, welche von Paris

aus im Jahre 1871 mit dem Ballon „Zenith“ eine Höhe von 8600 m erreichten. In dieser Höhe wurden alle drei Insassen des Ballons bewußtlos, Tissandier hatte in 7450 m Höhe bei 300 mm Luftdruck in benommenem Zustande die letzten Notizen gemacht. Sivel und Crocé-Spinelli erwachten aus tiefer Ohnmacht, als der Ballon von 8000 m wieder auf 7400 m gefallen war, warfen in halb betäubtem Zustand reichlich Ballast, was ein neues Steigen bis zum Maximum von 8600 m zur Folge hatte. Hierbei trat der Tod der beiden Luftfahrer ein. Als der Ballon im Fallen wieder ein Niveau von 6000 m erreicht hatte, erwachte Tissandier aus der Ohnmacht, um zu konstatieren, daß seine beiden Gefährten tot waren. Gerade an diese Fahrt knüpften sich die weitgehendsten Erörterungen über die Ursache derartiger Todesfälle und der Unverträglichkeit größerer Höhen mit dem Leben des Menschen und der Tiere. Seit man den Sauerstoff und seine Bedeutung für das Leben erkannt hatte, wurde die Frage diskutiert, ob der Tod durch Luftverdünnung auf mechanische Ursache, Verminderung des enormen Druckes der Luft, welcher auf die Oberfläche des Körpers wirkt, zu beziehen sei, oder auf den Mangel an Sauerstoff in der eingeatmeten Luft. Kurz vor der verhängnisvollen Fahrt des „Zenith“ hatte Paul Bert, der berühmte französische Physiologe, die Wirkung der Änderung des Luftdrucks auf den Menschen in so umfassender Weise experimentell durchgearbeitet, wie dies bis dahin auch nicht entfernt geschehen war. Er machte vor allem vergleichende Versuche in der Art, daß er einerseits bei unverändertem Luftdruck den Sauerstoffgehalt durch Beimengung von Stickstoff oder einem anderen indifferenten Gas herabsetzte, andererseits eine sehr starke Luftdruckverminderung erzeugte, wobei aber der Sauerstoffgehalt dadurch relativ hoch gehalten wurde, daß er nicht die gewöhnliche Atmosphäre, sondern eine Atmosphäre von nahezu reinem Sauerstoffgas der Verdünnung unterwarf. Es zeigte sich bei diesen Versuchen unzweifelhaft, daß die Dichte des Sauerstoffes in der geatmeten Luft maßgebend für die Lebensgrenze ist. Wenn die geatmete Luft aus reinem Sauerstoff bestand, konnte man mit der Verdünnung erheblich weiter gehen als bei atmosphärischer Luft. Die schließlich eintretenden Krankheitserscheinungen waren in beiden Fällen die gleichen. Die Tiere wurden schwach, taumelten, fielen um, zeigten zuweilen Krämpfe, und wenn der Druck noch weiter erniedrigt wurde, trat der Tod ein. Beim genauen quantitativen Studium der Wirkung verminderten Luftdrucks, wie es noch vor kurzem Rozendaal unter Leitung von Kronecker durchgeführt hat, ergab sich jedoch, daß man die Dichte, den Partialdruck des Sauerstoffs beim Aufenthalt in atmosphärischer Luft ohne Gefahr stärker herabsetzen darf, als bei Aufenthalt in reinem Sauerstoffgas. Dies zeigt sich besonders auffällig in folgendem von Kronecker angegebenen Versuch. — Man bringt ein Tier unter eine Glocke mit reinem Sauerstoff und verdünnt bis das Tier umfällt und dem Tode nahe scheint. Läßt man jetzt reinen Stickstoff einströmen, wodurch der absolute Druck erhöht wird, aber natürlich der Partialdruck des Sauerstoffs unverändert bleibt, so erholt sich das Tier alsbald. — Kronecker hat hieraus den Schluß gezogen, es komme wesentlich auf den absoluten Luftdruck an, indem ein allzu niedriger Druck die Verteilung des Blutes beeinflusse und speziell Blutstauung in den Lungen bewirke. Durch eine genauere Untersuchung der obwaltenden Verhältnisse konnte ich aber zeigen, daß bei Zufuhr reinen Stickstoffs zu dem unter niedrigem Drucke stehenden Sauerstoff

dessen Partialdruck in den Lungenalveolen erheblich gesteigert wird. Wie dies zu Stande kommt, soll später erörtert werden. — Ehe die Erhöhung der Sauerstoffspannung in den Alveolen durch die Zufuhr von Stickstoff nachgewiesen war, mußte Kroneckers Versuch als ein schwerwiegendes Argument gegen die überwiegende Bedeutung des Sauerstoffmangels bei den Erscheinungen der Luftverdünnung wirken. In dieser Hinsicht hat auch die Todesfahrt der französischen Aeronauten zu vielen Diskussionen Anlaß gegeben. Paul Bert hatte denselben nämlich auf Grund seiner experimentellen Erfahrungen empfohlen, nach Erreichung einer Höhe von 6000 m Sauerstoff zu atmen, und ihnen zu diesem Behufe mehrere Gummisäcke mitgegeben, welche eine Mischung von Luft und Sauerstoff enthielten. Da trotz dieser Vorsicht der Tod der beiden Aeronauten eintrat, glaubten viele, es sei nunmehr bewiesen, daß nicht Sauerstoffmangel, sondern mechanische Ursachen die Grenze bestimmten, bis zu welcher wir in der Atmosphäre emporsteigen können. In gleichem Sinne hatte man früher viele Erfahrungen von Bergsteigern und Luftfahrern benutzt. In den Berichten über derartige Hochtouren findet sich vielfach die Angabe, daß Nasenbluten oder auch Lungenblutungen eingetreten seien. Diese Blutungen erklärte man rein mechanisch durch die Annahme, der verminderte Druck der Luft halte nicht mehr genügend dem Druck des Blutes in den Gefäßen das Gleichgewicht, und so komme es zu einer Zerreißen der letzteren. Wäre diese Auffassung richtig, so müßten die Blutungen eine regelmäßige Erscheinung bei Luftverdünnung sein. Sie sind aber eine seltene Ausnahme, man beobachtet sie fast nie bei Tieren unter der Glocke der Luftpumpe. Eine genauere Analyse der in Betracht kommenden physikalischen Verhältnisse widerspricht aber auch derartigen Deutungen entschieden. Die Luft als ein leicht bewegliches Medium gleicht ihren Druck überall hin fast momentan aus. Wenn der äußere Druck der Luft sinkt, sinkt in gleichem Maße derjenige aller mit der Außenwelt in Berührung stehender Luftmengen im Innern des Körpers. Speziell die Luft in der Nase und den weiteren Luftwegen bis zu den Lungenbläschen hin muß momentan dieselbe Spannung annehmen, wie die des Körpers an allen Stellen gleichzeitig die Druckverminderung erfahren, kann Luft, welche von außen die Haut umspült. Da also das Blut und alle Flüssigkeiten diese unmöglich auf die Verteilung des Blutes im Körper einen Einfluß ausüben, wie dies bis in die jüngste Zeit noch einige hervorragende Forscher, vor allen Kronecker in Bern annahmen. Es sei noch daran erinnert, daß alle Flüssigkeiten und Gewebe des Körpers dieselbe minimale Zusammendrückbarkeit besitzen wie das Wasser, daß also ihr Volumen durch Änderung des Druckes um eine Atmosphäre nicht merkbar verändert wird. Nur in dem besonderen Fall kann der äußere Druck auf die Raumverhältnisse im Innern des Körpers wirken, wenn sich dort Luft außer Kommunikation mit der Außenwelt befindet. Derartige, wenn auch nicht absolut, so doch relativ abgesperrte Luftmengen, die ihren Druck mit der Außenluft nicht momentan ausgleichen können, finden sich im Innern unseres Ohrs in der sogenannten Paukenhöhle und in verschiedenen Abschnitten des Verdauungsapparates. Die Paukenhöhle kommuniziert zwar durch die tuba Eustachii mit dem Schlunde, aber diese zum Teil knorpelige, zum Teil aber auch durch häutige Wandungen begrenzte Röhre ist für gewöhnlich durch Aneinanderliegen der Wände an ihrer Einmündung in den Schlund verschlossen. Häufig gesellt sich dazu Ansammlung zähen Schleimes, welche

die freie Kommunikation der Luft der Paukenhöhle mit dem Schlund verhindert. Der für gewöhnlich hermetische Verschuß der Schlundmündung der tuba öffnet sich nur beim Schlucken für Momente. Sowie der Außendruck absinkt, dehnt sich daher die Luft in der Paukenhöhle aus und drückt auf ihre Wandungen, besonders auf das ungemein nervenreiche, zarte Trommelfell, welches die Paukenhöhle gegen den äußeren Gehörgang abschließt. Die so bewirkte Spannung des Trommelfells wird schon bei einer plötzlichen Änderung des Luftdrucks um wenige Millimeter schmerzhaft empfunden. Diese schmerzhafte Empfindung ist jedem Luftschiffer bei schnellen Aufstiegen, aber in stärkerem Maße noch bei raschem Sinken des Ballons bekannt. Man kann sie meist durch einige Schluckbewegungen, welche die Schlundöffnung der tuba wegsam machen, beseitigen. Die Empfindlichkeit des Trommelfells gegen kleine Druckschwankungen ist so groß, daß man ohne Beobachtung des Barometers aus den in ihm auftretenden Spannungs-Empfindungen sofort erkennen kann, wenn der Ballon steigt oder fällt. Die Geschwindigkeit, mit welcher die modernen Bergbahnen ihre Passagiere in die Höhe tragen, ist schon groß genug, um die Empfindungen am Trommelfell auszulösen und sie sogar zu quälender Höhe zu steigern, wenn durch entzündliche Schwellungen der Paukenhöhle der Luftausgleich erschwert oder unmöglich gemacht ist. Wegen der Gefahren, welche der Nichtausgleich der in der Paukenhöhle eingeschlossenen Luft dem Gehörorgan bringen kann, muß man bei bestehenden Katarrhen des Rachens, die sehr häufig auf die Ohrtrompete übergreifen, sich von der Durchgängigkeit derselben überzeugen, ehe man an einer Luftfahrt teilnimmt. Auch ohne besondere Prüfung verrät sich der Verschuß der Ohrtrompete an knackenden Geräuschen und unangenehmen Spannungsgefühlen im Trommelfell, welche man häufig beobachtet. Diese mechanischen Wirkungen der Luftdruckveränderungen sind natürlich in ihrer Intensität abhängig von der Schnelligkeit und von der absoluten Größe der Druckschwankungen. Wir werden sie darum in noch stärkerem Maße als bei der Luftverdünnung im Ballon bei der Variation des Luftdruckes um mehrere Atmosphären, wie sie der Taucher und der Arbeiter in den sogenannten Caissons erfährt, finden. Bekanntlich verdoppelt sich der Luftdruck, wenn man 10 m tief in das Wasser taucht. Es setzen sich daher die Taucher, welche in Tiefen bis zu 50 m und mehr arbeiten, einem Druck von 5 Atmosphären aus, und bei ihrem Emporsteigen sinkt der Druck in entsprechendem Maße, also viel stärker, als er selbst beim Steigen in die allerhöchsten Regionen der Atmosphäre abnehmen kann. Die Erscheinungen von seiten des Mittelohrs sind dann auch in gleichem Maße stärker, als sie der Luftschiffer beobachtet. Diese starken Luftdruckschwankungen beim Ein- und Ausschleusen der Arbeiten in Caissons, bzw. beim Tauchen in größere Meerestiefen liefern uns auch den überzeugendsten Beweis, daß abgesehen von der Paukenhöhle des Ohrs und den noch zu besprechenden Luftansammlungen des Verdauungsapparates der Organismus durch die Luftdruckänderungen an sich mechanisch nicht beeinflußt wird. Wenn die Änderung des Druckes auf die Körperoberfläche an sich irgend eine Bedeutung hätte, müßte eine rasche Abnahme des Druckes von etwa $\frac{4}{5}$ Atmosphäre Überdruck bis auf normalen Druck genau denselben Effekt auf den Körper haben wie eine Abnahme von letzterem bis auf eine Spannung von $\frac{1}{5}$ Atmosphäre. Während aber die letztere (durch Sauerstoffmangel) tödlich ist, hat die

erstere kaum ein leichtes Unbehagen, abgesehen von den Empfindungen in der Paukenhöhle, zur Folge.

Wie schon erwähnt, werden auch die im Verdauungsapparat angesammelten Gase durch die Luftverdünnung beim Ballonaufstieg ausgedehnt. Auch hier ist ein momentaner Druckausgleich nach außen darum nicht möglich, weil die vielen Krümmungen und Windungen des Darmkanals und der zeitweise Abschluß durch Aneinanderliegen der Wände einen Ausgleich durch die natürlichen Ausgangspforten des Darmes nur sehr allmählich möglich macht. Wenn aber etwa bei einem Aufstieg zu 5000 m Höhe, d. h. in eine Luft von halber Spannung die den Verdauungsapparat füllenden Gase nach dem Mariotteschen Gesetz sich auf das doppelte Volumen ausdehnen, kann dies bei bestehender stärkerer Gasblähung des Darmkanals zu einer unangenehmen Druckwirkung auf das Zwerchfell und damit zur Behinderung der Atmung führen. Eine, wenn auch absolut geringfügige, Erschwerung der Atmung muß aber in jenen Höhen, welche bereits an sich die Gefahr des Sauerstoffmangels herbeiführen, diese Gefahr nennenswert steigern. Ich habe mich noch vor kurzem an mir selbst überzeugt, daß Einführung größerer Mengen Gas in den Magen durch Trinken von sehr kohlen säurereichen Mineralwässern zu einer Verminderung des Lungenvolumens durch Heraufdrängen des Zwerchfells führt und daß auch die maximale Ausdehnung der Lunge, welche wir durch Bestimmung der sogenannten Vitalkapazität messen, merklich beschränkt wird. Wenn infolge der Ernährungsweise andauernd stärkere Gasentwicklung im Verdauungsapparat stattfindet, wie dies namentlich nach reichlichem Genuß von zuckerreichen Speisen bei manchen Menschen, nach Aufnahme grüner Gemüse in größeren Mengen bei anderen, beobachtet wird, ist die Gefahr störender Blähung während einer Ballonfahrt gegeben. Die absolute Menge des sich im Verdauungskanal entwickelnden Gases hängt ja von der Natur der gärenden Substanzen ab. Sie ist also in der Höhe nicht größer und nicht kleiner, als sie bei gleicher Ernährung auf der Erde sein würde. Das entwickelte Gas aber nimmt der Luftverdünnung entsprechend einen größeren Raum ein und wirkt dadurch mechanisch störender. Es kommt aber noch ein zweites, diese Störung steigerndes Moment hinzu. Ein großer Teil der im Darmkanal gebildeten Gase, namentlich die Kohlen säure, welche immer die Hauptmasse der Gärungsgase ausmacht, wird von dem in der Darmwand zirkulierenden Blut aufgenommen und durch dieses in der Lunge zur Ausscheidung gebracht. Nun hängt die Aufnahme von Gas in das Blut von seinem Partialdruck ab, und dieser ist, wenn eine gegebene Gasmenge vorhanden ist, um so niedriger, je niedriger der absolute Luftdruck ist. Es wird daher beim Absinken des Luftdrucks auf die Hälfte in 5000 m Höhe die Aufnahme von Gasen aus dem Darm in das Blut auf die Hälfte sinken, was natürlich störenden Ansammlungen im Darmkanal wesentlichen Vorschub leisten wird. Man muß deshalb eine rationelle Ernährung als ein keineswegs zu vernachlässigendes Moment für das Gelingen einer Hochfahrt ansehen. Die absolute Menge der aufgenommenen Nahrung muß gering sein, blähende Gemüse, Süßigkeiten, leicht gärendes, zellulose reiches Brot, etwa Pumpnickel, der Genuß moussierender Getränke und dgl. müssen vermieden werden.

Wir wenden uns nunmehr einer genaueren Betrachtung der wesentlichsten Schädlichkeit bei Hochfahrten, des Sauerstoff mangels zu. Da offenbar die volle Würdigung der hier in Betracht kommenden Maßnahmen auch in Fachkreisen nicht

durchgehends besteht, da ferner die Erreichung möglichst großer Höhen im Ballon an eine genaue Kenntnis aller einschlägigen physiologischen Gesichtspunkte geknüpft ist, wollen wir diese jetzt etwas eingehender erörtern. Der Sauerstoff der geatmeten Luft tritt durch die äußerst dünne Zellschicht, welche die Luft der Lungenbläschen von dem in ihrer Wandung zirkulierenden Blut trennt, in dieses über. Nach der gerade in jüngster Zeit durch neue Beweise gestützten Auffassung der meisten Sachkenner handelt es sich dabei um einen rein physikalischen Vorgang, um eine Bewegung des Gases nach den Gesetzen der Gasdiffusion von dem Ort höherer Dichte zu dem geringeren, während nach Ansicht einiger Gelehrter, von denen besonders der jüngst verstorbene dänische Physiologe Chr. Bohr sowie Haldane in Oxford genannt werden müssen, noch eine besondere Arbeitsleistung der Lungenzellen sich an dem Transport des Sauerstoffs beteiligt. Daß eine solche Arbeitsleistung unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht nötig ist, ergibt sich aus den Messungen der Diffusionsgeschwindigkeit der Gase im Lungengewebe, welche ich vor Jahren mit Löwy ausgeführt habe und welche im wesentlichen durch die Untersuchungen von Krogh in Kopenhagen bestätigt worden sind. Es liegen aber Versuche aus jüngster Zeit von Haldane vor, welche dafür sprechen, daß bei eintretendem Sauerstoffmangel, d. h. dann, wenn die Diffusionskräfte nicht mehr ausreichen, das Blut genügend mit Sauerstoff zu versorgen, eine besondere aktive Arbeitsleistung der Zelle den Übertritt des Sauerstoffs aus den Alveolen in das Blut unterstützt. Es würde zu weit führen, wollte ich an dieser Stelle die von Haldane für seine Auffassung ins Feld geführten Versuche verständlich schildern. Vollends aber, wenn ich die Bedenken, die ich gegen die Beweiskraft derselben habe, darlegen wollte. Nur so viel sei gesagt, daß die Grenzen der Luftverdünnung, bei denen die Sauerstoffzufuhr zum Körper ungenügend wird, ziemlich gut mit jenen zusammenfallen, welche man auf Grund der rein physikalischen Betrachtung des Sauerstoffübertritts ins Blut erwarten muß. Es ist also gerade in dem Fall, der uns besonders interessiert, bei der Luftverdünnung im Ballon, die etwaige physiologische Tätigkeit der Lungenzellen nicht von ausschlaggebender Bedeutung. Wir werden daher bei den folgenden Betrachtungen von ihr absehen.

Wie schon S. 31 ausgeführt, kann das Blut seine Aufgabe, den Geweben des Körpers den für ihre chemischen Prozesse nötigen Sauerstoff zu liefern, nur dadurch erfüllen, daß es in dem roten Farbstoff der Blutkörperchen einen eigenen Sauerstoffträger besitzt. Ohne diesen Sauerstoffträger würde das Blut noch etwas weniger Sauerstoff aufnehmen können, als wir im Wasser finden, das mit Luft in ausgiebiger Berührung war. Bekanntlich hängt die vom Wasser und anderen indifferenten Flüssigkeiten aufgenommene Sauerstoffmenge von der Dichte dieses Gases in der Luft ab. Das Wasser nimmt bei jedem Druck, so lange seine Temperatur dieselbe bleibt, dasselbe Volumen Sauerstoff aus der Luft auf. Dieses Volumen hat aber bei halbem Druck selbstverständlich nur das halbe Gewicht. Die aufgenommene Gewichtsmenge Sauerstoff ist also dem Druck proportional, aber nicht dem absoluten Luftdruck, sondern nur dem Anteil, welchen der Sauerstoff an diesem Gesamtdruck hat. Wenn also 100 ccm Wasser bei der Temperatur unseres Körpers aus reinem Sauerstoff etwa 2,4 ccm aufnehmen, nehmen sie aus atmosphärischer Luft, die nur zu $\frac{1}{5}$ aus Sauerstoff besteht, nur 0,5 ccm auf. Diese 0,5 ccm wiegen im

Meeresniveau d. h. bei einem Druck von 760 mm etwa 0,7 mg. In einer Höhe von 5500 m, bei halbem atmosphärischen Druck, dagegen nur 0,35 mg. Die einem im Wasser lebenden Tier zur Verfügung stehende Sauerstoffmenge nimmt also entsprechend dem Luftdruck in der Höhe ab, und darin liegt die Ursache, daß im Wasser lebende Organismen in gewissen Höhen nicht mehr existieren können, weil sie dem Wasser nicht mehr den für ihr Leben nötigen Sauerstoff zu entnehmen vermögen. In genau derselben Lage würden sich die Zellen unseres Körpers dem Blute gegenüber befinden, wenn dieses nicht neben dem physikalisch absorbierten Sauerstoff noch den an den Blutfarbstoff gebundenen enthielte. Auch dieser Sauerstoff ist ja bei verschiedenem Luftdruck in verschiedener Menge vorhanden, aber seine Menge folgt einem anderen komplizierteren Gesetz als der physikalisch absorbierte Sauerstoff.

Der eisenhaltige in den Blutkörperchen enthaltene rote Farbstoff, das Hämoglobin, ist eine sehr komplizierte Verbindung eines Eiweißkörpers mit dem eisenhaltigen Farbstoff Hämatin. Ein Molekül dieser Verbindung vereinigt sich an der Luft mit einem Molekül Sauerstoff. Da das Molekulargewicht des Hämoglobins 16000, das des Sauerstoffs 32 ist, kommt auf 1 g Hämoglobin etwa 2 mg oder bei gewöhnlichem Luftdruck gemessen 1,35 ccm Sauerstoff. Diese Verbindung, das Oxyhämoglobin ist nur bei einer Temperatur von mehreren Graden unter 0° beständig, bei höherer Temperatur zersetzt sie sich, gibt also ihren Sauerstoff ab. Das tritt in einfachster Weise zutage, wenn wir eine kalte Lösung des an der Luft mit Sauerstoff in Verbindung getretenen Farbstoffs oder statt dessen eine Quantität Blut im luftleeren Raum allmählich erwärmen. Bei -5° entwickelt sich, wie schon erwähnt, kein Gas. Schon bei einer Temperatur von 0° aber gibt die Verbindung langsam Sauerstoff ab. Bei höherer Temperatur erfolgt diese Sauerstoffabgabe wesentlich schneller und bei der Temperatur des Warmblüterkörpers $= 37^{\circ}$ hat die Lösung in wenigen Augenblicken an den luftleeren Raum all ihren Sauerstoff abgegeben. Das gilt allerdings nur, wenn der Raum wirklich luftleer oder doch frei von Sauerstoff ist und durch eine kräftige Luftpumpe in diesem Zustande erhalten wird. Bringen wir die sauerstoffhaltige Blutlösung in ein Vakuum von beschränktem Umfang, so daß der abgegebene Sauerstoff in dem vorher leeren Raum eine gewisse Dichte erlangt, so hört die weitere Abgabe von Sauerstoff seitens des Blutfarbstoffs auf, um erst vorzuschreiten, wenn wir den Sauerstoff aus dem Luftraum entfernt haben, entweder indem wir aufs neue mit Hilfe der Luftpumpe alles auspumpen, oder indem wir den Sauerstoff durch ein indifferentes Gas, etwa Stickstoff, verdrängen. Wir erkennen durch diesen Versuch, daß die Sauerstoffverbindung des Hämoglobins bei höheren Temperaturen zwar fähig ist, vollkommen in Sauerstoffgas und zurückbleibendes Hämoglobin zu zerfallen, daß aber dieser Zerfall aufhört, sobald eine gewisse Quantität Sauerstoff sich in dem Raum befindet. Wenn wir diesen Versuch in der Weise ausführen, daß wir zunächst mit Hilfe der Luftpumpe die vollständige Trennung des Sauerstoffs von der Hämoglobinlösung herbeiführen und dann in den jetzt luftleeren Raum eine bestimmte Quantität Luft oder reinen Sauerstoff eintreten lassen, so wird ein großer Teil des Sauerstoffs sofort wieder vom Hämoglobin gebunden und zwar in um so reichlicherer Menge, je größer seine Dichte in dem Luftraum ist. Für jede Dichte des Sauerstoffs besteht also eine gewisse Größe seiner Auf-

nahme ins Blut, oder mit anderen Worten, bei jeder Dichte des Sauerstoffs haben wir es im Blute zu tun mit einer Mischung der Hämoglobinsauerstoffverbindung und des reinen Hämoglobins, in der die Sauerstoffverbindung um so mehr überwiegt, je größer die Dichte des Sauerstoffs in der angrenzenden Atmosphäre ist. Der eben geschilderte Vorgang der Verbindung des Sauerstoffs mit dem Hämoglobin und der Wiederabtrennung desselben in Berührung mit einer sauerstoffärmeren oder -freien Atmosphäre kann sich beliebig oft wiederholen. Wie für jede Konzentration des Sauerstoffs besteht auch bei gegebener Konzentration für jede Temperatur eine bestimmte Mischung sauerstoffhaltigen und sauerstofffreien Hämoglobins, oder anders ausgedrückt: bei jeder Dichte des Sauerstoffs in der Atmosphäre ist das mit ihr in Berührung stehende Hämoglobin zu einem bestimmten von der Temperatur abhängigen Prozentsatz mit Sauerstoff gesättigt. In Berührung mit atmosphärischer Luft von gewöhnlichem Druck ist die Sättigung des Hämoglobins mit Sauerstoff nahezu eine vollkommene, d. h. es findet sich fast genau auf 1 Molekül Hämoglobin der Lösung 1 Mol. Sauerstoff. Wie diese Sättigung bei Abnahme der Dichte des Sauerstoffs abnimmt, ergibt sich aus folgender Tabelle, welche für verschiedene Sauerstoffspannungen in der Atmosphäre die zugehörige Sättigung des Blutes mit Sauerstoff bei einer Temperatur von 38° C. angibt, wobei die Sättigung bei 150 mm Spannung, d. h. bei gewöhnlichem Atmosphärendruck, als hundert Prozent, bezeichnet wird. Daneben ist in Kol. 4 die in der Blutflüssigkeit nach dem Absorptionsgesetz gelöste Sauerstoffmenge angegeben.

Spannung mm	Sauerstoff aufgenommen Proz. chem. gebunden	in 100 ccm Blut von 38° C.	
		chem. geb. Sauerstoff	in Plasma gelöster Sauerstoff
10	30,0	6,0	0,020
20	64,7	12,9	0,041
30	81,6	16,3	0,061
40	90,4	18,1	0,081
50	95,4	19,1	0,101
60	97,6	19,5	0,121
70	98,8	19,8	0,141
80	99,5	19,9	0,162
90	99,8	19,95	0,182
150	100	20,0	0,303

Aus der prozentischen Sättigung ist in Kol. 3 die im Blute bei normalem Hämoglobingehalt faktisch vorhandene Sauerstoffmenge berechnet. Diese Zahlen erleiden nun noch eine weitere, für das Verständnis der Atmung wichtige Komplikation durch die Einwirkung der im Blut nie fehlenden Kohlensäure auf die Sauerstoffbindung durch das Hämoglobin. Die Verbindung des Sauerstoffs mit dem Hämoglobin wird durch die gleichzeitig vorhandene Kohlensäure gelockert, oder mit anderen Worten: bei Gegenwart von Kohlensäure ist die durch eine bestimmte Sauerstoffspannung bewirkte Sättigung des Hämoglobins eine unvollkommnere. Das ist zahlenmäßig in folgender Tabelle¹⁾ ausgedrückt:

¹⁾ Nach Bohr Blutgase u. resp. Gaswechsel. Braunschweig 1905, S. 92.

Tabellé über den Einfluß der Kohlensäurespannung
auf die Sauerstoffaufnahme im Blut bei 38°.

Sauerstoffspannung mm	Aufgenommener Sauerstoff			
	5 mm CO ₂	20 mm CO ₂	40 mm CO ₂	80 mm CO ₂
5	11	5	3	1,5
10	28,5	14	9	4
15	51	27	18,5	8
20	67,5	41	29,5	14
25	76	54	40	22
30	82	63,5	50	31
35	86	71	58	40
40	89	77	66,5	49
45	91	82	73	56
50	92,5	86	78,5	62,5
60	95	90,5	86	73
70	97	94	91	80,5
80	98	96	94,5	87
90	98,5	97	96	91,5
100	99	98	97	95
150	100	100	99,8	99,5

Man sieht aus der Tabelle, daß der Einfluß der Kohlensäure bei höherer Sauerstoffspannung nur sehr gering ist, denn die Sättigung, welche bei 150 mm Sauerstoffspannung und 5 mm CO₂ 100 beträgt, wird durch Erhöhung der Kohlensäurespannung auf 80 mm nur auf 99,5 erniedrigt. Dagegen nimmt bei 5 mm Sauerstoffspannung unter der gleichen Zunahme der Kohlensäure der aufgenommene Sauerstoff von 11 % auf 1,5 % ab. Diese Wirkung der Kohlensäure kommt der Verwertung des Sauerstoffs im Körper gewöhnlich zugute. In den Geweben, wo der Sauerstoff gebraucht wird, entsteht durch den Lebensprozeß der Zellen Kohlensäure, die aus den Zellen in das Blut überströmt. Infolgedessen wird die Spannung der Kohlensäure in den Geweben erhöht. Während sie in der Lunge bei normaler Atmung etwa 30—35 mm beträgt, steigt sie in den Geweben bis zu etwa 50 mm. Andererseits macht sich eine störende Wirkung der Kohlensäure für die Sättigung des Hämoglobins mit Sauerstoff bei verminderter Dichte dieses Gases, also etwa bei Atmung in großen Höhen, geltend. Wie wir noch sehen werden, haben wir in einer Meereshöhe von 5000 m noch mit einer Sauerstoffspannung in den Lungen von 40—50 mm zu rechnen. Unter diesen Umständen ist die Sättigung des Blutes bei 45 mm O-Spannung, wenn der Kohlensäuregehalt desselben ein niedriger ist, die CO₂-Spannung nur 20 mm beträgt, noch 82 %, bei 40 mm dagegen nur 73 %. Es ist also für die möglichst gute Versorgung des Körpers mit Sauerstoff wichtig, daß der Kohlensäuregehalt der Lungenluft ein möglichst niedriger, der des Kapillarenblutes in den Geweben dagegen ein möglichst hoher sei.

Als eine weitere Grundlage der Lehren, welche sich aus den mitgeteilten Tatsachen für die Hygiene des Aufenthaltes in sehr großen Höhen der Atmosphäre ergeben, müssen wir nun noch kurz erörtern, wie man die Spannung des Sauerstoffes und der Kohlensäure an der atmenden Oberfläche der Lungenbläschen ermitteln

kann. Es ist ja ohne weiteres klar, daß in den Luftbläschen der Lunge der Gehalt an Sauerstoff wesentlich niedriger, der an Kohlensäure erheblich höher sein muß als in der Außenluft, welche wir einatmen. Die Lunge des Menschen enthält bekanntlich ein gewisses Quantum Luft, welches auch bei stärkster Ausatmung nicht entleert werden kann, die Residualluft. Ihre Menge beträgt durchschnittlich etwa 1 Liter. Bis auf diesen Wert können wir aber den Luftgehalt der Lunge nur durch willkürlich aufs äußerste verstärkte Ausatmung bringen, normal bleibt ein wesentlich größeres Luftquantum, das wir bei ruhiger Atmung auf 2500—3000 ccm schätzen können, in der Lunge zurück. Diesem Luftvorrat, welcher aus 1000 ccm Residualluft und 1500—2000 ccm „Reserveluft“ besteht, werden bei einer normalen ruhigen Einatmung etwa 500 ccm Luft beigemischt und nur bei willkürlich oder infolge gesteigerten Bedürfnisses bis aufs Äußerste verstärkter Einatmung fügt sich zu dieser normalen Einatemungsluft die sogenannte Komplementärluft in Höhe von wiederum 1800 ccm. Aus diesen Tatsachen ergibt sich, in welchem Umfange wir die Menge der ein- und ausgeatmeten Luft wechselnden Bedürfnissen anpassen können. Indem wir mit äußerster Anstrengung ein- und ausatmen, fördern wir statt der normalen 500 ccm annähernd 4000 ccm. Es hängt nun, wie leicht einzusehen, die Beschaffenheit der in den Lungenbläschen mit dem Blute in Wechselverkehr tretenden Luft einerseits von der Menge Sauerstoff ab, welche das Blut in der Zeiteinheit aus ihr aufnimmt und von der Menge Kohlensäure, welche es abgibt, und andererseits von der Menge frischer Luft, welche durch die Atembewegungen in die Lungenbläschen gelangt. Für die Wirkung dieser Zufuhr ist es aber nicht gleichgültig, ob eine bestimmte Menge Luft den Lungen durch viele flache oder durch wenige sehr voluminöse Atemzüge zugeführt wird. Der letztere Vorgang läßt den Kohlensäuregehalt der Luft der Lungenbläschen niedriger, ihren Sauerstoffgehalt höher werden als die flache Atmung bei gleichem geförderten Luftvolumen. Dieser Unterschied erklärt sich daraus, daß nicht die ganze eingeatmete Luft wirklich in die Lungenbläschen gelangt. Ein Teil bleibt in den Zufuhrwegen, d. h. in der Nase, dem Schlund, dem Kehlkopf und der Luftröhre mit ihren Ästen und wird zu Beginn des nächsten Atemzuges wieder in nahezu unveränderter Beschaffenheit entleert, ohne der Luft der eigentlichen Lungenbläschen sich beigemischt zu haben. Wir bezeichnen diesen Luftraum, in dem die eingeatmete Luft noch nicht ihre Funktion erfüllen kann, als den „schädlichen Raum“. Seine Größe ist natürlich individuell verschieden, beträgt aber bei Menschen mittlerer Größe etwa 140 ccm, wie Loewy durch Messungen festgestellt hat. Wenn ein Mensch nun mit einem Atemzuge nur 140 ccm ein- und wieder ausatmet, so wird er die Luft der Lungenbläschen überhaupt kaum mit frischem Sauerstoff versorgen und auch die Kohlensäure nicht nach außen schaffen. Es würde also ein Mensch bei noch so zahlreichen, derartigen flachen Atemzügen schließlich ersticken müssen. Man kann sich durch Versuche am eigenen Körper sehr leicht von der Richtigkeit dieser Tatsache überzeugen. Wenn man etwa 1 Minute lang die normale Luftmenge von ca. 5 Litern in dieser Weise atmet, was 36 Atemzüge pro Minute erfordert, so ergibt sich, daß die ausgeatmete Luft statt, wie in der Norm etwa 200 ccm Kohlensäure zu enthalten, deren nur etwa 50 aufweist. Daß überhaupt eine nennenswerte Menge Kohlensäure unter diesen Umständen zur Ausscheidung kommt, erklärt sich dadurch,

daß sich bei den Atembewegungen Luftwirbel bilden, welche einen Teil der Luft der Alveolen bis in die größeren Luftröhrenäste vortreiben und dafür aus diesen wieder frische Luft in die Alveolen schaffen. Es wirkt ferner in diesem Sinne der Herzschlag, welcher, indem sich das Herz abwechselnd füllt und entleert, die benachbarten Lungenräume komprimiert und wieder frei gibt, so daß ein gewisser Luftwechsel in den Lungenbläschen sogar bei vollständig fehlenden Atembewegungen zustande kommt (cardiopneumatische Atmung).

Trotz dieser Beimengungen von eigentlicher Lungenluft zu der Luft des schädlichen Raumes können wir die wahre Zusammensetzung der Luft der Lungenbläschen aus der Analyse der ausgeatmeten Luft berechnen, wenn wir annehmen, daß in dieser für jeden Atemzug 140 ccm unveränderter atmosphärischer Luft enthalten sind. Die Richtigkeit dieser Rechnung ergibt sich aus der Übereinstimmung ihres Ergebnisses mit der direkten Analyse von Luft der Lungenbläschen, die wir dadurch gewinnen, daß wir den letzten Anteil einer kräftigen Ausatmung zur Analyse aufsammeln. Dies geschieht nach Haldane in der Weise, daß man nach einer normalen Einatmung durch einen langen Schlauch ausatmet und das im Munde befindliche Ende dieses Schlauches sofort nach beendigter Ausatmung mit der Zunge verschließt. An dies Ende ist seitlich ein Ansatz befestigt, durch welchen man etwa 20 ccm Luft aus dem Schlauch zur Analyse entnimmt. Durig und ich haben während eines Aufenthaltes in Teneriffa zahlreiche Berechnungen der Zusammensetzung der Alveolenluft aus der analysierten Ausatemluft ausgeführt, während unmittelbar vorher oder nachher Dr. Douglas, ein Mitarbeiter von Haldane, nach dessen Methode die gleichen Bestimmungen ausführte. Die Übereinstimmung war durchgehends eine befriedigende, nur einige in 3100 m Meereshöhe angestellte Bestimmungen ergaben differente Resultate, für die aber eine ausreichende Erklärung in dem Sinne gefunden werden konnte, daß die Atemmechanik schon einige Zeit vor dem von Douglas ausgeführten Versuche keine ganz normale war und dadurch eine gewisse Stauung von CO_2 im Blute zustande kam.

Da die genaue Kenntnis der Alveolartension für die Beurteilung der Höhe, in welcher der Sauerstoffmangel Gefahr bringen kann, von ausschlaggebender Bedeutung ist, wollen wir die Methode ihrer Berechnung eingehender darlegen. Nennen wir das Volumen des ganzen Atemzuges = A, das des schädlichen Raumes = a, den Prozentgehalt der ausgeatmeten Luft an Sauerstoff = E, den der eingeatmeten Luft = J, so ist der Sauerstoffgehalt der Alveolarluft = x =

$$x = \frac{A E - a J}{A - a}.$$

Es sei die Rechnung durch ein Beispiel erläutert:

In einem Versuch im Meeresniveau betrug der Sauerstoffgehalt der während eines längeren Atemversuchs ausgeatmeten Luft 16 % (E); der der eingeatmeten Luft ist, so lange man im Freien atmet, natürlich konstant und beträgt 20,9 % (J).

Die in der Minute ausgeatmete Luftmenge betrug 5500 ccm, die Zahl der Atemzüge pro Minute 7, also das durchschnittliche Volumen jeder Atmung 786 ccm.

Die Zusammensetzung der Alveolarluft berechnet sich hiernach zu:

$$\frac{786 \cdot 0,16 - 140 \cdot 0,209}{786 - 140} = 14,92 \% \text{ O}_2.$$

Die hier vorliegende Atemform, wenige und tiefe Atemzüge, ist diejenige, die mir persönlich eigentümlich ist. Wir haben aber schon Menschen beobachtet, welche dasselbe Luftquantum oder ein etwas größeres in 20 Atemzügen atmeten.

Berechnen wir nun für diesen letzteren Fall die Alveolartension:

Der einzelne Atemzug würde hier betragen = $5500 \text{ ccm} : 20 = 275 \text{ ccm}$. Davon kommen nur $275 - 140 = 135 \text{ ccm}$ auf die eigentliche Lungenluft, und deren Zusammensetzung würde sein, wenn die ausgeatmete Luft wieder 16 % Sauerstoff hätte:

$$\frac{275 \cdot 0,16 - 140 \cdot 0,209}{275 - 140} = 10,82 \% \text{ O}_2.$$

Die Spannung des Sauerstoffs in den Lungenalveolen, welche den Grad der Sättigung des Blutes, wie wir oben gesehen haben, bedingt, berechnet sich aus dem Prozentgehalt und dem herrschenden Luftdruck. Es sei dieser im Meeresniveau 760 mm. Davon ist die Spannung des Wasserdampfs bei 37° C mit 46 mm abzuziehen, da ja in den Lungenalveolen die Luft stets infolge der Berührung mit der ausgedehnten feuchten Oberfläche mit Wasserdampf gesättigt ist. Der Druck der Gase beträgt also in den Lungenbläschen nur $760 - 46 = 714 \text{ mm}$. Die Sauerstoffspannung beträgt nun bei dem erst betrachteten Atemtypus 14,29 % dieses Wertes, also 106,6 mm bei dem zweiten, bei 20 Atemzügen in der Minute 10,82 % = 77,25 mm. Man sieht, wie enorm die Atemmechanik die Sauerstoffversorgung des Blutes beeinflusst. Das ist aber noch viel mehr der Fall, wenn wir uns in großen Höhen befinden, wie sich sofort ergibt, wenn wir dieselbe Rechnung für einen Barometerstand von 380 mm, etwa entsprechend 5000 m Meereshöhe ausführen. Für den ersten Atemtypus finden wir eine Sauerstoffspannung von 47,73, für den anderen 36,14. Wenn wir nun hieraus und aus der vorher S. 43 gegebenen Tabelle die relative Sättigung des Blutes mit Sauerstoff berechnen und zwar zunächst unter der Annahme, daß die Spannung der Kohlensäure in den Lungenbläschen, die wir ja in ganz analoger Weise aus der Kohlensäureanalyse der Atemluft berechnen, 20 mm betragen habe, so finden wir folgende Werte:

bei tiefer Atmung im Meeresniveau: 98 %, in 5000 m Höhe 88 %,
 bei flacher Atmung „ „ 96 %, in 5000 m Höhe 72 %.

Eine Kohlensäurespannung von 20 mm kommt aber nur bei forcierter Atmung, wie sie vielfach in größerer Meereshöhe besteht, zustande. Bei normaler Atmung erreicht diese oft 40 mm, besonders im Meeresniveau. Dann würden die entsprechenden Sättigungswerte des Blutes sein:

97 % und 76 %
 94 % und 59,5 %.

Was nun die Bedeutung dieser Abnahme der Sauerstoffsättigung des Blutes betrifft, so ist dieselbe wiederum individuell je nach der Kraft des Herzens und der Schnelligkeit des Blutumschlages verschieden. Ein vollkommen kräftiger Mensch verbraucht im Durchschnitt bei einem Blutumschlag nur etwas über $\frac{1}{3}$ des Sauer-

stoffvorrats, den sein Arterienblut aus der Lunge mitbringt, d. h. von den 98 % der bei voller Sättigung aufnehmbaren Menge, welche bei tiefer Atmung im Meeresniveau aufgenommen werden, bleiben etwa 65 % ungenutzt und finden sich noch in dem aus dem rechten Herzen in die Lunge wieder einströmenden Venenblut. Demgemäß sollte man meinen, daß selbst eine Sauerstoffsättigung zu 59,5 %, wie wir sie bei flacher Atmung in 5000 m Höhe berechnet haben, den Bedarf des Körpers decken müßte. Denn auch hiervon würde nach Abzug von 33 % noch 26,5 % im Venenblute übrig bleiben. Diese Zahlen über den Sauerstoffverbrauch bei einem Umlauf des Blutes gelten aber nur für den Durchschnitt alles Venenblutes. In einzelnen Organen und namentlich in tätigen Organen ist der Sauerstoffverbrauch ein sehr viel größerer. Bei angestrenzter Körper-tätigkeit findet man das Venenblut im rechten Herzen sehr arm an Sauerstoff. Es enthält oft in 100 ccm nur 1—3 ccm, d. h. kaum 10 % des Gehalts bei voller Sättigung. Noch geringer ist aber oft der Sauerstoffgehalt des aus den tätigen Muskeln selbst ausströmenden Venenblutes. Dasselbe kann vollkommen sauerstofffrei sein. Daraus ergibt sich, daß für die Muskelarbeit eine ganz geringe Abnahme des Sauerstoffgehalts im arteriellen Blut schon eine Schädigung bedeutet. Wenn der tief atmende Mensch in 5000 m Höhe 10 % weniger Sauerstoff in seinem Arterienblut hat oder gar, wie das bei 40 mm Kohlensäurespannung der Fall sein würde, 20 % weniger, so bedeutet das schon eine erheblich verminderte Arbeitsfähigkeit des Körpers. Es gibt aber auch einzelne Organe, die schon in der Ruhe den Sauerstoffvorrat in dem ihnen zufließenden Blut weit stärker verbrauchen als dem Durchschnitt entspricht. Dies scheint ganz besonders in einzelnen Teilen des Hirns der Fall zu sein, so daß in diesem Organ schon geringe Abnahme des Sauerstoffgehalts des Arterienblutes Schädigung zustande bringt. Wahrscheinlich gilt für das Hirn dasselbe, was wir bei den Muskeln leicht nachweisen können, daß nämlich die tätigen Teile des Organs den Sauerstoff des durchströmenden Blutes in viel höherem Maße ausnutzen als die ruhenden. In einer eben veröffentlichten Arbeit hat Tangl gezeigt, daß starke Erregung des Gehirns, die er durch intermittierende grelle Beleuchtung erzielte, den Sauerstoffverbrauch von durch Curare bewegungslos gemachten Tieren erheblich steigerte. Er fand auch in dem aus den Hirnvenen abfließenden Blute während des Lichtreizes einen viel niedrigeren Sauerstoffgehalt als vorher und nachher. Nun bedeutet aber normales Fungieren der Sinne, normale Beherrschung unserer Muskulatur und schnelle Überlegung eine intensive Tätigkeit in bestimmten Teilen des Hirns, die speziell die betreffenden Funktionen leisten. So verstehen wir es, daß schon in relativ mäßigen Höhen bei einzelnen Menschen bald diese, bald jene Hirnfunktion notleidet. Bei einem ist es die Erhaltung des Gleichgewichts des Körpers, es treten Schwindelerscheinungen, Unsicherheit des Gehens auf, beim andern leidet die Verarbeitung der Sinneseindrücke; genaues Ablesen von Instrumenten, genaue Beobachtung akustischer Zeichen und dgl. werden unmöglich. Für manche Beobachtung im Ballon dürfte es von besonderer Bedeutung sein, daß zu den besonders leicht durch mangelhafte Sauerstoffversorgung geschädigten Funktionen des Gehirns der Farbensinn gehört. Ablesungen am Spektroskop oder am Interferometer und ähnlichen Instrumenten scheinen schnell in größeren Höhen mangelhaft zu werden.

Aus dem, was wir vorher über die Bedeutung des tiefen Atmens für die Sicherung eines hohen Sauerstoffgehalts in den Lungenbläschen gesagt haben, leiten sich zum Teil die enormen Unterschiede in der Toleranz verschiedener Menschen gegen Höhenluft ab. Loewy fand bei seinen ausgezeichneten Untersuchungen über die Wirkung der Luftdruckänderungen auf den Menschen ein Versuchsindividuum, das bei einem Minutenvolumen von etwa 5 Liter 18—22 Atemzüge in der Minute ausführte. Bei ihm traten schon ernste Erscheinungen des Sauerstoffmangels, in einem Fall sogar Ohnmacht, ein, bei einer Luftverdünnung, entsprechend einem Barometerdruck von 441 mm oder einer Meereshöhe von 3000 m. Ich selbst diente in den gleichen Versuchen und konnte dank meiner langsamen und tiefen Atmung (durchschnittlich 5 Atemzügen von je 800—1000 ccm) eine Luftverdünnung von 350 mm, entsprechend 6000 m Meereshöhe ohne Unbehagen vertragen. Das zeigt, in welchem Maße die individuelle Art der Atmung die Höhentoleranz beeinflusst. Wir hatten auch Gelegenheit, die Atemmechanik einiger hervorragender Höhenmenschen zu untersuchen (Berson, Süring, von Schrötter). Bei allen betrug die Atemtiefe über 500 ccm pro Atemzug. Es scheint sehr schwierig zu sein, willkürlich einen Atemmodus für Stunden inne zu halten, der von dem gewohnten verschieden ist. Offenbar hängt es von dem Bau des Brustkastens, der Leichtigkeit der Rippenhebung und der Exkursionsfähigkeit des Zwerchfells ab, ob ein Individuum seinen Luftbedarf mit geringerer Anstrengung durch zahlreiche, flache, oder durch wenige tiefe Atemzüge deckt. Unwillkürlich paßt sich nun bei jedem die Atemmechanik den Widerständen in der Weise an, daß die Gesamtarbeit der Atemmuskulatur eine möglichst geringe ist. Derartige Vermeidung unnützer Anstrengung sehen wir bei vielen, halb automatisch sich vollziehenden Funktionen unseres Körpers. Besonders charakteristisch tritt sie auch bei der Lokomotion hervor. Wenn wir die Geschwindigkeit des Gehens über eine gewisse individuell verschiedene bequeme Gangart beschleunigen, wird der Verbrauch nicht nur absolut, sondern auch für den Meter Wegs ein größerer. Wenn eine bestimmte Geschwindigkeit überschritten wird, sehen wir dann den Menschen halb unwillkürlich aus dem Gehen ins Laufen verfallen. Die Messungen des Verbrauchs haben ergeben, daß das bei der Geschwindigkeit geschieht, bei welcher der Verbrauch für das Laufen geringer ist als für das ebenso schnelle Gehen. Dasselbe habe ich bei mit Hagemann ausgeführten Untersuchungen über die Lokomotion des Pferdes gefunden.

Bekanntlich paßt sich die Atmung bei Muskeltätigkeit mit großer Präzision dem gesteigerten Verbrauch an, derart, daß, trotzdem die Verbrennung im Körper aufs 4—8 fache gesteigert ist, der Kohlensäuregehalt der Atmungsluft nur wenig gegenüber der Ruhe vermehrt ist und auch das Sauerstoffdefizit beinahe dasselbe bleibt wie bei Körperruhe. Diese Anpassung an den gesteigerten Arbeitsverbrauch vollzieht sich nun bei den Menschen, welche in der Norm zahlreiche, flache Atemzüge ausführen, hauptsächlich durch eine starke Vertiefung der Atmung. Diese Vertiefung hat natürlich eine Zunahme der Sauerstoffspannung in den Lungenalveolen zur Folge, und so kann man gelegentlich in größeren Höhen oder bei Luftverdünnung beobachten, daß bei mäßiger Arbeit die Luftverdünnung besser vertragen wird als bei ruhigem Sitzen. So war es bei der vorher erwähnten flach atmenden Versuchsperson Loewys. Trotz des etwa aufs 5 fache gesteigerten Sauerstoffsverbrauchs

war bei ihm die Sauerstoffspannung in den Lungenalveolen bei Arbeit höher als in absoluter Ruhe. Das hatte natürlich zur Folge, daß das arterielle Blut sauerstoffreicher ward, und daß demgemäß auch die Sauerstoffversorgung des Hirns während der Arbeit eine ausreichendere war als in absoluter Ruhe. Diese Erfahrung steht nur in einem scheinbaren Kontrast mit dem, was wir vorher über die Beschränkung der Arbeitsfähigkeit in größeren Höhen sagten. Durch die Arbeitsleistung der Muskeln wird ja der Sauerstoffverbrauch im Hirn nicht wesentlich geändert, infolgedessen kommt diesem der etwas erhöhte Sauerstoffgehalt des arteriellen Blutes zugute. Die Muskeln mit ihrem aufs 4—5 fache gesteigerten Sauerstoffverbrauch profitieren aber von dieser Zunahme des Sauerstoffgehalts um wenige Prozente nicht nennenswert.

Die hier hervortretende Tatsache, daß Muskeltätigkeit die Atmung so stark anregen kann, daß trotz des vermehrten Verbrauchs Erscheinungen von Höhenkrankheit verschwinden, wird verständlich, wenn wir den Mechanismus der Regulation der Atembewegungen ins Auge fassen. Der Impuls zur abwechselnden Vergrößerung und Verkleinerung des Brustkastens geht bekanntlich von dem sogenannten Atemzentrum im verlängerten Mark aus. Dieses Zentrum wird in der Norm und beim ruhenden Menschen im wesentlichen durch den Kohlensäuregehalt des Blutes erregt, derart, daß die Atembewegungen um so kräftiger werden, je reicher das Blut an Kohlensäure wird. Man kann experimentell nachweisen, daß jedes Millimeter Zuwachs der Kohlensäurespannung in den Lungenbläschen und damit natürlich auch in dem arteriellen zum Atemzentrum strömenden Blute die Größe der Atmung steigert. Durchschnittlich findet man, daß Zunahme der Spannung um 10 mm die Lungenventilation um 2—3 Liter pro Minute erhöht. Bei Muskeltätigkeit aber wächst die Atmung enorm, ohne daß die Kohlensäurespannung nennenswert zunimmt; manchmal, so namentlich oft bei Hunden, ist sogar die Steigerung der Ventilation durch die Muskeltätigkeit so groß, daß trotz der enorm vermehrten Produktion die Kohlensäurespannung in den Lungenalveolen, also auch im Arterienblut niedriger wird. Hier muß also ein anderer Reiz wirksam sein. Man kann leicht nachweisen, daß er in den tätigen Muskeln gebildet wird, denn wenn man das aus diesen kommende Blut aufstaut, es nicht zum rechten Herzen und von hieraus weiter zum Atemzentrum gelangen läßt, bleibt die Verstärkung der Atmung aus. Sie muß also auch auf einer chemischen Substanz, welche in den tätigen Muskeln gebildet wird, beruhen. Diese Substanz scheint nun nach allen neueren Untersuchungen Milchsäure zu sein, welche stets dann in tätigen Muskeln gebildet wird, wenn die Sauerstoffversorgung derselben keine ganz genügende ist. Bei dem enormen Verbrauch der tätigen Muskeln im Vergleich zu den ruhenden ist es aber unvermeidlich, daß namentlich im Beginn der Muskeltätigkeit der Sauerstoffbedarf dieser Organe nicht ganz gedeckt ist, daß sie also vorübergehend ohne Sauerstoff (anaerobiotisch) arbeiten müssen. So kommt es, daß die Muskeltätigkeit eigentlich regelmäßig mit Milchsäureproduktion verbunden ist und dadurch verstärkte Atmung bewirkt. Das Auftreten der Milchsäure bei Muskeltätigkeit läßt sich übrigens durch direkte Titrierung des Blutes leicht nachweisen. Man kann auch zeigen, daß sie um so reichlicher auftritt, je forcierter die Muskeltätigkeit und andererseits je ungenügender die Sauerstoffversorgung der tätigen

Muskeln ist. Wir werden demgemäß erwarten müssen, daß in größerer Höhe infolge des verminderten Sauerstoffgehalts des Arterienblutes die Milchsäurebildung bei der Muskeltätigkeit besonders reichlich ist und daß dadurch die Erregung des Atemzentrums besonders intensiv wird. Das muß weiterhin dazu führen, daß bei Arbeit in größeren Höhen die Kohlensäurespannung in den Lungenalveolen und damit auch im Blut infolge der forcierten Atmung heruntergeht. Die Tatsachen entsprechen durchaus diesen Überlegungen.

Eine Zunahme der Säure im Blut läßt sich auf zwei Weisen bequem demonstrieren. Entweder in der Art, wie man die Alkaleszenz irgend einer Sodalösung durch Titrieren bestimmt, indem man so lange Säurelösung von bekannter Konzentration zufügt, bis die Flüssigkeit auf Lackmuspapier neutral reagiert, d. h. bis blaues Lackmus ganz schwach gerötet wird. Mit einer gewissen Modifikation, welche durch die intensive Rotfärbung des Blutes bedingt ist, läßt sich diese Methode beim Blut anwenden. Man verfährt dabei in der Weise, daß man eine gemessene Menge Blut, etwa 5 ccm mit destilliertem Wasser aufs 10 fache verdünnt. Dadurch werden die roten Blutkörperchen aufgelöst, und es entsteht eine durchsichtige, rote Flüssigkeit. Wenn man in diese einen Streifen Lackmuspapier eintaucht, der mit konzentrierter Kochsalzlösung gesättigt ist, kann man hinterher mit Hilfe von Filtrierpapier den Blutfarbstoff vollkommen entfernen und sieht dann auf dem Papier fast so gut, als wenn man es mit einer farblosen alkalischen Lösung zu tun hätte, den blauen Farbenton, welcher die alkalische Reaktion des Blutes anzeigt. Man fügt dann stark verdünnte, etwa $\frac{1}{25}$ normale Weinsäure so lange zu, bis das eingetauchte Lackmuspapier nach Entfernung des Blutfarbstoffes eine deutliche Rotfärbung zeigt und diese auch nach etwa einer Minute noch behält. Dieses Abwarten ist nötig, um nicht durch die Wirkung der Kohlensäure getäuscht zu werden. Nach dieser Methode bestimmte Galeotti den Alkaligehalt von Kaninchenblut bei demselben Tier erst in Turin und dann auf dem Gipfel des Monte Rosa (4560 m). Es zeigte sich eine Abnahme der Alkaleszenz um etwa $\frac{1}{3}$. Ähnliche Versuche habe ich an mir selbst und mehreren Kollegen auf Teneriffa in Höhen bis zu 3000 m ausgeführt. Auch hier ist eine deutliche Abnahme, wenn auch entsprechend der geringeren Höhe keine so erhebliche, wie sie Galeotti auf dem Monte Rosa fand, nachweisbar. In ganz gleicher Weise nimmt die Alkaleszenz des Blutes ab, wenn man ein Tier starke, mit Sauerstoffmangel einhergehende Muskelarbeit ausführen läßt, wenn man etwa ein Kaninchen rasch durchs Zimmer hetzt. In diesem Falle kann die gebildete Säuremenge so bedeutend sein, daß das Blut überhaupt nicht mehr alkalisch gegen Lackmus reagiert. Sobald dieser Punkt erreicht ist, stirbt das Tier. Das ist eine Erscheinung, die man schon lange auf der Jagd beim Hetzen von Hasen und dgl. beobachtet hat. Ebenso wie bei dieser Prüfung der Reaktion gegen Lackmus, tritt die Abnahme des Alkali im Blut zutage, wenn man den Kohlensäuregehalt desselben bestimmt. Die mit der Dichte der Kohlensäure in der Atemluft wechselnde Menge der im arteriellen Blut enthaltenen Kohlensäure ist zum größeren Teil chemisch an Alkali gebunden, nur zum kleineren Teil physikalisch in der Flüssigkeit absorbiert.

In dem Maße, wie die Alkaleszenz des Blutes abnimmt, sinkt natürlich auch die gebundene Kohlensäure und damit der gesamte Gehalt des Blutes an Kohlensäure.

Marro, ein Mitarbeiter von Mosso, fand an Kaninchen diese Abnahme der Kohlensäure beim Übergang von der Ebene zum Gipfel des Monte Rosa. Der Befund kann nicht so unmittelbar wie das Ergebnis der Titrierung als Beweis verminderter Alkalimengen im Blute dienen. Es hängt ja der Kohlensäuregehalt des Blutes nicht nur vom Vorrat desselben an Alkali, d. h. von seiner Bindefähigkeit für Kohlensäure, sondern auch von der Dichte der Kohlensäure in der Lungenluft ab. Bei gegebener Alkaleszenz des Blutes entspricht jedem Kohlensäuredruck eine bestimmte Kohlensäuremenge im Blute. Wenn nun in größeren Höhen die Atmung eine forciertere, infolgedessen der Gehalt der Alveolenluft an Kohlensäure ein niedrigerer ist, muß ebenso der Kohlensäuregehalt des Blutes abnehmen. In der Tat kann man nun durch Messung der Atemvolumina feststellen, daß die Lungenventilation in größeren Höhen bei gleicher Kohlensäurebildung im Körper eine größere ist. Das kommt, wie vorher schon erwähnt, daher, daß die in der Höhe gebildete Milchsäure oder, mit anderen Worten, die verminderte Alkaleszenz des Blutes als neuer Reiz auf das Atemzentrum wirkt. Infolgedessen ist stets bei Abnahme der alkalischen Reaktion des Blutes sein Kohlensäuregehalt stärker vermindert als dieser Abnahme entspricht. Es wirken eben stets verminderte Bindefähigkeit infolge der Säurebildung und verstärkte Ventilation zusammen, um den Kohlensäuregehalt des Blutes auf einen sehr niedrigen Wert zu bringen. Wie aus dem Gesagten hervorgeht, ist die Störung des Stoffwechsels, welche in großen Höhen aus der mangelnden Sauerstoffversorgung einzelner Organe resultiert, die Ursache der Milchsäurebildung und damit der Abnahme der alkalischen Reaktion des Blutes und gleichzeitig der verstärkten Atmung.

Die aus beiden Momenten hervorgehende Verminderung des Kohlensäurevorrats im Blute hat Mosso irrtümlich als das Primäre in der Höhenwirkung angesehen und ist so zu der viel besprochenen Theorie der „Akapnie“ gekommen. Akapnie, d. h. Rauchlosigkeit: mit diesem prägnanten Ausdruck bezeichnete Mosso die Minderung des Kohlensäuregehalts im Blut. Es ist durch neuere Untersuchungen, namentlich von Henderson dargetan worden, daß sehr starke Verminderungen des Kohlensäuregehalts im Blut, wie man sie durch forcierte Lufteinblasungen in die Lunge erzielen kann, das normale Ineinandergreifen der nervösen Regulation des Blutdrucks und der Herztätigkeit ganz wesentlich stören und so Krankheitserscheinungen, ähnlich dem nach großen Verletzungen auftretenden sogenannten „shock“, herbeiführen kann. Damit hat aber die Kohlensäureverminderung beim Aufenthalt in großen Höhen nichts zu tun, denn hier tritt ja an Stelle der teilweise durch die Säure aus dem Blute verdrängten Kohlensäure eben diese nicht flüchtige Säure, die ebenso wie die Kohlensäure als Reiz für die nervösen Zentren fungiert. Vermöge dieser Bildung von Milchsäure, welche sofort einsetzt, wenn in irgend einem Organ der Sauerstoff zur Deckung des Energiebedarfs nicht ausreicht, trägt der Sauerstoffmangel in sich selbst ein Korrektiv. Zum normalen Atemreiz der Kohlensäure tritt der der Milchsäure, und so kommt es zu einer Verstärkung der Atembewegungen, welche geeignet ist, die Kohlensäurespannung in den Lungenalveolen herabzusetzen und gleichzeitig die Sauerstoffversorgung des Blutes zu verbessern. Wenn die zur Milchsäurebildung führende Sauerstoffarmut sich nur in Organen geltend macht.

welche für den Ablauf der Lebensprozesse nicht in jedem Augenblick unentbehrlich sind, also nicht im Hirn oder im Herzen, veranlaßt sie verbesserte Atmung und damit wieder reichlichere Sauerstoffversorgung des Blutes, die eine Anpassung an stärkere Luftverdünnung bedeutet. Es ist also eine wichtige Bedingung für das Ertragen sehr großer Höhen, daß das Hirn so reichlich mit Blut versorgt sei, daß bei ihm der Sauerstoffmangel sich später als in der Muskulatur oder in den Drüsen der Bauchhöhle geltend macht.

Diese Erwägung sollte uns zu besonderer Vorsicht bei Hochfahrten älterer Personen veranlassen. Bekanntlich kommt es im höheren Alter sehr häufig zu einer als Arteriosklerose bezeichneten Erkrankung der Arterien, bei welcher diese ihre normale Elastizität verlieren, starr und zugleich brüchig werden. Die Erkrankung befällt zuweilen weite Strecken der Hauptarterien des Körpers, in anderen Fällen einzelne kleinere Äste. Die im höheren Alter häufigen Hirnblutungen (sog. Hirn-schlag) beruhen auf der Zerreißung derartig erkrankter Arterien. Aber auch ohne daß es zu einem solchen das Leben bedrohenden Ereignis kommt, erzeugt die Arteriosklerose der Hirngefäße mannigfache Störungen, welche auf ungenügender Blutversorgung einzelner Teile des Hirns beruhen. So beobachtet man Unsicherheit beim Stehen und Gehen, besonders aber bei feineren Hantierungen, welche häufig nur mit starkem Zittern ausgeführt werden können. In anderen Fällen besteht Schwindelgefühl, undeutliches Sehen, das sich bis zu vorübergehender Blindheit steigern kann. Alle diese Erscheinungen beruhen darauf, daß die erkrankten Gefäße, deren Ringmuskulatur zum Teil durch starres verkalktes Gewebe ersetzt ist, sich nicht mehr, dem wechselnden Bedarf des Gehirns und seiner einzelnen Teile entsprechend, verengern und erweitern können. Es kommt dadurch besonders in den jeweils stark tätigen und deshalb sauerstoffbedürftigen Teilen des Hirns zu Sauerstoffmangel, der die Funktion beeinträchtigt, unter Umständen vorübergehend lähmt. (Vergessen von Namen, von eben geplanten Dingen, Blindheit, Unfähigkeit gewisse Bewegungen auszuführen.) Wo derartige Erscheinungen bestehen oder auch nur vorübergehend auftreten, ist natürlich der verminderte Sauerstoffgehalt des Arterienblutes in Höhen über 3000 m eine ernste Gefahr. Die Kombination der beiden Schädlichkeiten, vermindertes Sauerstoffgehalt des Blutes und ungenügende Zufuhr desselben durch die erkrankten Arterien, kann bedrohliche Störungen auslösen, welche durch die Arterienerkrankung allein nicht zustande gekommen wären.

Ähnlich wie die Arteriosklerose des Hirns bedeutet auch die sehr häufige an den Kranzgefäen des Herzens eine große und unberechenbare Gefahr bei starker Luftverdünnung. Wenn die Starre und Verengung der Herzarterien einen höheren Grad erreicht hat, kann jede plötzliche Anstrengung, die eine verstärkte Pumparbeit des Herzens verlangt, zur Erlahmung dieses Organs und damit zum Tode führen. Die gleiche Wirkung hat natürlich der verminderte Sauerstoffgehalt des Arterienblutes in größeren Höhen — das Herz erhält noch weniger Sauerstoff als sonst, seine Arbeitsfähigkeit ist also gemindert, während doch das vermehrte Bedürfnis aller Organe nach Sauerstoffzufuhr eine verstärkte Herzarbeit verlangt. Diese Forderung eines die geringere Sauerstoffsättigung des Hämoglobins kompensierenden rascheren Blutumlaufs erkennen wir beim Übergang in größere Höhen an der wachsenden Zahl der Herzschläge. In jüngster Zeit hat Flemming be-

sonders dieses Anwachsen der Pulsfrequenz bei Hochfahrten genauer studiert. Er konnte auch zeigen, daß der Pulsschlag prompt langsamer wird und sogar zu den Normalwerten am Boden zurückkehrte, wenn man Sauerstoff atmen läßt.

Um zu prüfen, ob das Gefäßsystem eines Menschen den Anforderungen einer Hochfahrt gewachsen ist, sollte man ihn einige Minuten lang eine Luft mit nur 12—13 % Sauerstoffgehalt atmen lassen und beobachten, ob dabei Störungen auftreten. — Am bequemsten kann man dies mit Hilfe einer die Kohlensäure der Ausatemungsluft absorbierenden Kalipatrone (Dräger, Lübeck), wie sie bei den Rettungsapparaten der Feuerwehr gebräuchlich sind, und eines um 4 Liter Luft fassenden Gummisacks feststellen. Wenn man aus dem Sack etwa 1½ Minuten ruhig sitzend durch die Patrone geatmet hat, ist der Sauerstoffgehalt der Luft auf etwa 13 % reduziert. Ein normaler Mensch hat dann noch keinerlei Funktionsstörungen, während bei erkrankten Hirn- oder Herzgefäßen die oben geschilderten Störungen zu erwarten sind.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß der Durchschnittsmensch bis zu Höhen von 4000 m im Ballon keine Beschwerden durch Sauerstoffmangel erfährt. Jene Fälle auffallend flacher häufiger Atmung, bei welchen schon in 3000 m Erscheinungen auftreten, sind selten. Nur dann könnten in geringeren Höhen bereits Störungen sich einstellen, wenn die Versorgung des Hirns eine auffallend schlechte ist. Sei es, daß die Gefäße des Hirns selbst so eng sind, daß sie nur gerade den Bedarf im Flachlande decken, oder daß die Herztätigkeit aus irgend einem Grunde eine besonders schwache ist. Beide Fälle dürften sich kombinieren in der Nachwirkung reichlicheren Alkoholgenusses.

Den Sauerstoff, das souveräne Mittel zur Überwindung der Höhenkrankheit, werden wir im folgenden eingehender besprechen. Hier sei nur hervorgehoben, daß man die vorher geschilderten ersten Erscheinungen des Sauerstoffmangels durch willkürliche Vertiefung der Atmung beseitigen kann.

Von der Muskeltätigkeit hatten wir schon vorher gesagt, daß sie beim Menschen mit flacher Atmung eine bessere Sauerstoffversorgung des arteriellen Blutes und damit des Gehirns herbeiführt. Andererseits ist sie es gerade, die besonders bei größeren Anstrengungen und bei forcierterer Benutzung einzelner Muskelgruppen schon in Höhen von 3000 m deutlich leidet. Es geht namentlich aus den zahlreichen Messungen, welche ich und mehrere Mitarbeiter sowie Durig auf verschiedenen Expeditionen ins Hochgebirge gemacht haben, hervor, daß die maximale Leistung der Muskulatur in einer Höhe von 3000 m schon bei der Mehrzahl der Menschen herabgesetzt ist. Diese Herabsetzung spricht sich in einem sehr interessanten und auf den ersten Blick paradox erscheinenden Phänomen aus. Wenn man den Sauerstoffverbrauch für eine bestimmte Arbeitsleistung, z. B. für das Ersteigen einer gewissen Höhe mißt, so ist er in 3000 m Höhe fast bei allen Menschen größer als im Meeresniveau. Diese Steigerung des Verbrauchs, die ja auf den ersten Blick als eine sehr unzweckmäßige Reaktion des Organismus erscheint, kommt dadurch zustande, daß bei ungenügender Versorgung der arbeitenden Muskeln mit Sauerstoff und dadurch bedingter verminderter Leistungsfähigkeit derselben Hilfsmuskeln zur Arbeit herangezogen werden, welche für die betreffende Arbeit weniger zweckmäßig gelagert sind und deshalb die Arbeit nur unter größerem Energieverbrauch

leisten können. Dasselbe Phänomen beobachten wir auch in der Ebene bei starker Ermüdung, sowie in allen Fällen, wo durch entzündliche Reizung von Sehnen oder Gelenken die Bewegung schmerzhaft wird. Ein reiches Material konnte ich in dieser Hinsicht bei meinen mit Schumburg ausgeführten Studien über die Physiologie des Marsches sammeln. Wenn ein Soldat etwa 25 km mit Gepäck marschiert ist und eine gewisse Ermüdung bei ihm Platz gegriffen hat, braucht er pro Meter Weges 5—10 % mehr Sauerstoff als im Beginn des Marsches. Dieser Mehrverbrauch ist noch ein erheblich größerer, wenn etwa eine Blase unter dem Fuße oder eine ähnliche kleine Marschschädigung eine gewisse Schonung beim Gehen erfordert. In demselben Zustande wie die ermüdeten Muskeln am Schluß eines langen Marsches befinden sich alle unsere Muskeln in stark verdünnter Luft. Weil sie mit weniger Sauerstoff versorgt sind, kommen sie früher an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit, und es werden deshalb Hilfsmuskeln zur Leistung der Arbeit herangezogen. Von besonderer Bedeutung kann dieser Umstand für den Flieger werden, der positive und sehr präzise Muskelarbeit beim Steuern aufzuwenden hat. Wenn er in Höhen von 2000 m und darüber sich befindet, ist sicher die Leistungsfähigkeit seiner Muskulatur, namentlich soweit es sich um länger andauernde Spannung der Muskeln handelt, eine herabgesetzte. Das straffe aktionsbereite Halten des Steuers in bestimmter Position bedeutet eine ständige Anspannung einer Anzahl von Muskeln der Arme. Solche Anspannung aber ist, wie jedermann aus Erfahrung weiß, viel ermüdender als selbst größere Kraftanstrengungen, die in raschen Intervallen von Erschlaffungen der Muskeln gefolgt sind. Diese stärkere Ermüdung bei der sogenannten tonischen Kontraktion des Muskels beruht darauf, daß die ständige Spannung die Blutdurchströmung der Muskeln beeinträchtigt. Der Wechsel von Kontraktion und Erschlaffung, wie er in besonders typischer Weise beim Gehen auftritt, wirkt auf den Blutstrom in den Muskeln wie eine Pumpe. Bei jeder Kontraktion werden die Venen ausgepreßt und bei der nachfolgenden Erschlaffung füllen sie sich neu in der Richtung des normalen Blutstroms von den Kapillaren her, weil die Venenklappen einen Rückstau hindern. Diese Pumpenwirkung fällt bei andauernder Muskelspannung weg, infolgedessen wird bei ihr der Sauerstoffvorrat des in geringerer Menge durchströmenden Blutes stärker beansprucht und ein geringes Minus an Sauerstoff im arteriellen Blut, wie es in mäßigen Höhen schon besteht, macht sich stärker geltend. Hier kommt aber noch ein anderes Moment in Betracht, dadurch gegeben, daß wir bei andauernder fester Spannung der Armmuskeln, wie sie das Halten des Steuers auch heute noch bei den meisten Flugzeugtypen bedingt, nicht ganz frei atmen können. Die von dem Brustkasten zum Oberarm ziehenden Muskeln finden an letzteren ihren Fixpunkt und infolgedessen muß der Brustkasten in relativ steter Spannung, die natürlich dem Ein- und Ausatmen hinderlich ist, gehalten werden. Nach dieser Richtung kann man sich übrigens trainieren und kann sich üben, jene unwillkürliche Hemmung der Atmung, wie sie bei straffer Haltung der Arme besonders dann leicht zustande kommt, wenn auch die Aufmerksamkeit in bestimmter Richtung angestrengt fixiert ist, zu überwinden. Es scheint mir nicht unwichtig, daß bei der Einschulung des Fliegers, der größere Höhen erreichen soll, auf diese Vermeidung von Atmungshemmungen besonders geachtet wird.

VI. Erscheinungen des Sauerstoffmangels in geringen Höhen.

Aus dem vorher Gesagten ergibt sich, daß die Erscheinungen des Sauerstoffmangels, welche in Höhen über 4000 m bei allen Menschen mehr oder weniger zutage treten, schon in geringeren leichten Störungen herbeiführen können. Wir hatten schon auseinandergesetzt, daß die Empfänglichkeit des Menschen für diese Störungen nicht nur individuell ungemein verschieden ist, sondern daß sie auch bei derselben Person stark wechselt mit Änderungen des Gesundheitszustandes, welche anderweitig kaum empfunden werden. Diese individuellen Differenzen in der Toleranz gegen die Höhenwirkung hängen, abgesehen von der Atemmechanik, in erster Linie von der Leistungsfähigkeit des Herzens ab. Wir hatten ja gesehen, daß ein geringer Sauerstoffmangel des arteriellen Blutes durch schnelleren Umlauf desselben wettgemacht werden kann. Man begreift daher, daß bei geschwächter Herztätigkeit schon in geringeren Höhen Erscheinungen des Sauerstoffmangels auftreten können. Diese Erscheinungen sind aber auch nicht immer in denselben Organen zuerst bemerkbar; speziell die Ernährungsverhältnisse des Gehirns und seine Blutversorgung wechseln, je nachdem dieses Organ ausgeruht oder überanstrengt ist, und hängen ferner ab von gewissen Giften, welche die Funktion des Hirns beeinflussen. Am auffallendsten wirkt in dieser Hinsicht der Alkohol. Wenn die erregende Wirkung dieses Genußmittels abgeklungen ist, bleibt auch nach mäßigen Gaben eine gewisse Herabsetzung der Leistungsfähigkeit des Hirns, welche uns in höherem Maße in den Erscheinungen des sogenannten Katzenjammers bekannt ist. In diesem Zustande ist aber nicht nur die Leistung der Hirnzellen verringert, auch ihre Blutversorgung ist nicht eine vollkommen normale. Die Gefäßnerven, welche diese Blutversorgung vermitteln, reagieren ebenfalls nicht in normaler Weise auf die Impulse, die ihnen im Zusammenhang mit der Beanspruchung einzelner Hirnabschnitte zufließen. Durch diese Störungen der Gefäßregulation, verbunden mit dem Schwächezustand des Herzens, welcher durch die gleiche Schädlichkeit bedingt ist, kann es leicht kommen, daß schon in einer Höhe von 2000 m die Feinheit der Reaktion unseres Zentralnervensystems auf äußere Eindrücke und ebenso die Schnelligkeit dieser Reaktion vermindert ist. Auf diesem Umstande beruht eine große Gefahr für den Flieger, sobald er in größere Höhen vordringt. Wenn schon die normalen Verhältnisse des Fluges an die geistigen Kräfte und an die Schnelligkeit des Entschlusses des Fliegers die höchsten Anforderungen stellen, so wachsen diese Anforderungen natürlich, wenn er sich in großen Höhen bewegt, besonders dann, wenn diese Bewegungen nicht über Ebenen erfolgen, sondern beim Übersteigen hoher Gebirge, etwa der Alpen. Hier ist das Fliegen in großen Höhen notwendig und nach allem, was wir über den Einfluß der Gebirge auf die Luftströmungen wissen, ist es sogar notwendig, daß man sich viele Hundert Meter über dem zu überschreitenden Höchstpunkt des Gebirges in der Luft hält. Wissen wir doch, daß an den Abhängen der Bergzüge sehr starke auf- und absteigende Luftströmungen von größter Unregelmäßigkeit häufig vorkommen. Eine hierher gehörige Beobachtung, welche ich vom Gipfel des Monte Rosa, der

Margherita-Hütte, aus gemacht habe, wo Staubwolken vom Sesiatal aus innerhalb weniger Minuten mehr als 3000 m hoch bis über meinen Standort hinaus emporgewirbelt wurden, und zwar bei schönem, sonnigen Wetter, habe ich schon S. 8 erwähnt. Es ist gerade die plötzliche Erwärmung der Bergflanken durch die Sonne, welche diese unerwarteten aufsteigenden und ähnlich natürlich auf der anderen Seite des Berges absteigenden Windstöße zustande kommen läßt. Es erscheint kaum denkbar, daß die Steuerkunst auch eines geübten Fliegers einem derartigen plötzlichen Windanprall stand hält. Er muß daher beim Übersteigen der Gebirge so hoch wie möglich über dem Kamme sich befinden. Damit aber kommt er in Regionen, in welchen der Sauerstoffmangel sich schon erheblich geltend macht, d. h. mit anderen Worten, seine körperliche und geistige Leistungsfähigkeit ist vermindert gerade in dem Moment, wo die höchsten Anforderungen an dieselbe gestellt werden. Die Gefahr solcher Störungen ist um so größer, je schneller man aus mäßigen Höhen bis zu 3000 m und mehr emporsteigt. Das lehren unter anderem die Erfahrungen, welche man auf den Bergbahnen gemacht hat, verglichen mit dem, was man beim Wandern auf die Bergeshöhen beobachtet. In Höhen, wo der Fußgänger fast niemals irgendwelche Störungen empfindet (2500—3000 m), findet man unter den Reisenden der Bergbahnen schon eine ganze Menge Bergkranker. Das liegt keineswegs allein daran, daß mit den Bahnen auch schwächlichere Personen, denen das Klettern unmöglich ist, in bedeutende Höhen gelangen, vielmehr beobachtet man auch an solchen Menschen, welche bei Fußwanderungen niemals in solchen Höhen bergkrank gewesen sind, auf der Zahnradbahn Erscheinungen von Schwäche, Schwindel und Übelkeit, die sich meist schon dadurch als Höhenkrankheitssymptome dokumentieren, daß sie schnell schwinden, wenn man durch eine Anzahl tiefer Atemzüge willkürlich den Sauerstoffgehalt des Blutes erhöht. Die Gefahr des Eintritts derartiger durch Sauerstoffmangel im Hirn bedingter Funktionsstörungen wird beim Flieger noch dadurch erhöht, daß man bei gespannter Aufmerksamkeit auf irgend ein wichtiges Moment, etwa beim Beobachten des Ganges der Maschine, leicht vorübergehend das Atmen vergißt, oder richtiger gesagt, die Atmung hemmt. Diese Hemmung, welche bei hohem Luftdruck vollkommen ungefährlich ist, weil sie von selbst rechtzeitig durch Einsetzen tiefer Atemzüge unterbrochen wird, kann in einer Höhe von 3000 m und mehr direkt verhängnisvoll werden, indem sie jenen Zustand der Ernährungsstörung im Hirn herbeiführt, welcher zu unzweckmäßigem Handeln und damit eventuell zu einem tödlichen Absturz führt.

Von eigenen Erfahrungen, welche die Bedeutung des Sauerstoffmangels schon in mäßigen Höhen illustrieren, möchte ich eine Beobachtung anführen, welche wir beim Aufenthalt in den Cañadas des Pic von Teneriffa vor zwei Jahren machen konnten. Einer unserer Mitarbeiter, Dr. Douglas, beschäftigte sich bei Prüfung des Einflusses der Höhe auf die Blutbildung mit Farbenvergleichen, indem die Farbe einer verdünnten Blutlösung mit der eines künstlichen Gemisches von Blut und Karminlösung sehr genau verglichen werden mußte. Während er in der Ebene diese Farbenvergleiche mit großer Präzision anstellen konnte, erwies sich in der Höhe unter sonst gleichen Bedingungen der Fehler erheblich größer. Andere Erfahrungen der Art, die sich allerdings auf wesentlich größere Höhen beziehen,

hat von Schrötter in seiner Abhandlung „Der Sauerstoff in der Prophylaxe und Therapie der Luftdruckerkrankungen“¹⁾ mitgeteilt. Er gibt dort S. 239 ein Faksimile seiner Handschrift, wie sie in großer Höhe sich gestaltet, verglichen mit seiner schönen, klaren Schrift unter normalen Verhältnissen. Man sieht bei Betrachtung dieser Schriftzüge, in wie hohem Maße die Beherrschung der feineren Bewegungsverhältnisse der Hand und des Armes, welche beim Schreiben erforderlich sind, unter Wirkung der Höhe gelitten hat. Man sieht aber noch ein zweites, daß nämlich auch die Präzision des Ausdrucks in der Schilderung der Beobachtungen wesentlich geringer wird als unter höherem Luftdruck. In den extremsten Fällen führen diese Störungen der Sauerstoffversorgung des Hirns zum vollständigen Ausfall einzelner Hirnfunktionen. So haben Luftfahrer wiederholt bemerkt, daß sie plötzlich in großer Höhe die Skala ihrer Thermometer nicht mehr sehen konnten. Von diesem Zustand bis zum vollständigen Schwinden des Bewußtseins ist natürlich nur noch ein ganz kleiner Schritt. Wenn schon in der Ebene bei geschwächter Herzstätigkeit infolge vorangegangener Überanstrengung oder der anderen erwähnten Umstände es gelegentlich selbst bei kräftigen Menschen vorkommen kann, daß sie bei plötzlichen Aufstehen aus der liegenden oder sitzenden Stellung das Bewußtsein verlieren, ohnmächtig werden, so ist diese Gefahr um so größer, in je dünnerer Luft man sich befindet.

Ich möchte noch ein Beispiel jener ganz leichten und doch unter Umständen gerade für den Flieger verhängnisvollen Störung der Hirnfunktionen anführen, welche wir bei unserem Aufenthalt auf dem Monte Rosa beobachteten. Ein Mitglied unserer Expedition, C., ein recht geübter Bergsteiger, litt während unseres Aufenthaltes mehr oder weniger ausgesprochen an den Erscheinungen der Bergkrankheit. Wir machten eines Tages einen Abstieg von der Gipfelhütte zu dem etwa 70 m tiefer gelegenen großen Hochplateau. Dabei passierte man längs der Randkluft, welche den Eisabhang des Gipfels von dem großen Firnfeld trennt. Um einem kleinen Hindernis im Wege auszuweichen, machte C. einen Sprung zur Seite, aber nicht, wie das eigentlich instinktiv jeder mit den Verhältnissen Vertraute getan haben würde, nach der Bergseite, sondern direkt in die Randkluft hinein, so daß er verloren gewesen wäre, wenn er nicht von den hinter ihm Gehenden am Seile gehalten worden wäre. Ich erwähne diesen Fall, weil er die Gefahren, denen der Luftfahrer, der fortwährend rasche Entschlüsse zu fassen hat, in solchen Höhen ausgesetzt ist, besonders deutlich illustriert.

VII. Sauerstoffatmung als Mittel zur Erreichung größerer Höhen.

Die Tatsache, daß die Beschwerden der Höhe, speziell die Eingenommenheit des Kopfes, die Abschwächung der Sinnesfunktionen und die Erlahmung der Muskelkräfte schwinden, wenn man Sauerstoff atmet, steht über allem Zweifel fest. In Höhen von 4000—8000 m etwa bedarf es hierbei nicht einmal besonderer Kautelen, welche den Lungen reinen Sauerstoff sichern. Es genügt, den Partialdruck dieses

¹⁾ Handbuch der Sauerstofftherapie von Max Michaelis, Berlin 1906, S. 155—314.

Gases in den Lungen nennenswert zu erhöhen, um sofort alle Erscheinungen zu beseitigen. Dementsprechend genügen in diesen Höhen die relativ primitiven Hilfsmittel, deren sich die Luftfahrer bis vor kurzem allgemein bedienten. Noch auf der Rekordhöhenfahrt von Berson und Süring benutzten diese eine einfache, mit der Sauerstoffbombe verbundene Hartgummiröhre, welche sie in den Mund nahmen und etwa wie eine Pfeife handhabten. Hierbei gelangte je nach der Weite der Öffnung der Sauerstoffbombe mehr oder weniger Sauerstoff bei der Einatmung in die Lungen, gemischt mit Luft, welche gleichzeitig durch die Nase eindrang. Dieses Verfahren ist darum recht unzuverlässig, weil ja meist die Symptome des Sauerstoffmangels sich nicht in unangenehmer und zur Abhilfe drängender Weise offenbaren. Oft kann das Bewußtsein plötzlich schwinden, ohne daß Vorbote zu verstärkter Sauerstoffzufuhr gemahnt hätten. Mit dem Eintritt von Bewußtlosigkeit oder selbst von Halbschlaf aber kann das Mundstück gänzlich den Lippen entgleiten, und damit ist unter Umständen der Tod des Luftfahrers besiegelt. Man muß deshalb für Höhenfahrten über 8000 m darauf bestehen, daß eine festsitzende Verbindung der Atemwege mit der Sauerstoffquelle bestehe. Als solche kann man die Mundstücke benutzen, wie ich und meine Mitarbeiter sie seit vielen Jahren bei Respirationsversuchen anwenden. Zwischen Lippen und Zähnen befindet sich eine weiche Gummiplatte, die in der Mitte durchbohrt ist und eine Röhre trägt, die die Verbindung mit der Sauerstoffquelle vermittelt. Das Mundstück wird schon durch die Elastizität der Lippen und die Mundfeuchtigkeit luftdicht festgehalten. Man kann es aber noch weiter sichern, indem man eine vorn geschlitzte elastische Binde, etwa nach Art der Bartbinden, über die Lippen legt und am Hinterkopf zuschnürt. Die Nase ist durch eine Klemme hermetisch verschlossen. Auf diese Weise erfolgt die Atmung zwar nicht in ganz normaler Weise, da die Nase ausgeschlossen ist, aber doch in einer Art, welche von den meisten Menschen standstillig stundenlang ertragen wird. In gewisser Hinsicht noch bequemer wird die Atmung, wenn man eine gut schließende, der individuellen Gesichtsform angepaßte Maske, welche Mund und Nase bedeckt, anlegt. Eine solche Maske trägt zweckmäßig am Rande eine Art Pneumatik, durch welche die feste Anpassung an das Gesicht erleichtert und der Druck der Ränder gemildert wird. Man hat solche Masken aus Metall und aus Hartgummi angefertigt. Zu ihrer sicheren Befestigung dienen wiederum Bänder, welche am Hinterkopf zugeschnürt werden. Man kann auch, wie dies Fleming in jüngster Zeit getan hat, die Maske mit der Mütze zu einem Ganzen verbinden und dadurch ihre Last gewissermaßen durch den ganzen Kopf tragen lassen. Ich habe keine praktische Erfahrung, um beurteilen zu können, ob diese Einrichtung Vorzüge vor dem einfachen Anbinden der Maske besitzt. Die Maske muß natürlich zwei Öffnungen haben, für den eintretenden Sauerstoff und für die Ausatemungsluft. Beide Wege, auf alle Fälle aber die Austrittsöffnung müssen mit Ventilen versehen sein. Als Austrittsventil dient zweckmäßig eine kurze Metallröhre, welche durch eine aufgeschliffene, bewegliche Metallplatte verschlossen ist. Die Platte wird durch schwachen Druck einer Feder angedrückt und öffnet sich, sobald im Innern der Maske geringer Überdruck durch die Ausatmung erzeugt wird. Von großer Wichtigkeit ist die Kapazität der Maske. Da ein Teil der ausgeatmeten Luft in dieser zurückbleibt und bei der nächsten Ein-

atmung wieder in die Lungen zurückgelangt, vergrößert die Maske den „schädlichen Raum“ der Luftwege, über welchen wir S. 44 sprachen. Die Wirkung einer solchen Vergrößerung des schädlichen Raumes ist aber bei der Sauerstoffatmung eine etwas andere als bei der gewöhnlichen Zusammensetzung der Atemluft. Bei letzterer hat die im schädlichen Raum zurückbleibende Expirationsluft einen Sauerstoffgehalt von 14—15 %, der in extremen Fällen, d. h. bei geringem Atemvolumen und oberflächlicher Atmung bis auf 10 % herunter gehen kann. Besteht nun der größte Teil der neuen Einatmung aus dieser Luft, so wird natürlich der Sauerstoffgehalt in den Alveolen alsbald auf einen bedenklichen Wert herabsinken. Atmen wir dagegen eine sehr sauerstoffreiche Luft, so wird bei gleichem prozentischen Verbrauch in den Lungen der Sauerstoffgehalt der Luft im schädlichen Raum noch immer 50 % betragen, wenn die Einatemluft etwa 60 % hatte. Es darf also ohne erhebliche Beeinträchtigung der Sauerstoffversorgung Luft wiederholt geatmet werden; natürlich wächst unter diesen Umständen der Kohlensäuregehalt der eingeatmeten Luft. Das ist aber nicht unbedingt ein Nachteil, denn jede Erhöhung der Kohlensäurespannung in der Atemluft führt zu Vertiefung der Atmung und damit wiederum zu einer Verminderung des Anteils des schädlichen Raumes am Gesamtvolumen eines Atemzuges, d. h. also zu einer Verbesserung der aus der Maske eingeatmeten Luft. Da wir früher gesehen haben, daß eine Vertiefung der Atmung gerade bei beginnendem Sauerstoffmangel erwünscht ist und den Erscheinungen des Sauerstoffmangels abhelfen kann, ist die durch die Maske bewirkte Erhöhung der Kohlensäurespannung in der Lungenluft zweckmäßig, so lange sie eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Als höchste zulässige Kapazität der Maske möchte ich etwa 160 ccm bezeichnen. Es beträgt dann der gesamte schädliche Raum ca. 300 ccm, so daß bei einer Atemtiefe von 500 ccm, wie sie den meisten Menschen zukommt, immer noch 200 ccm frisch zuströmenden Sauerstoffs in die Alveolen gelangen.

Von wesentlicher Bedeutung ist auch die zweckmäßige Regulation des Zustromes von Sauerstoff zur Maske. Man benutzt hierzu jetzt fast allgemein die Zwischenschaltung eines Gummisackes zwischen Sauerstoffbombe und Atemmaske. In der Tat sichert ein solcher Sack, wenn man ihn ständig in einem Zustand mittlerer Füllung hält, die nötige Sauerstoffzufuhr, auch wenn aus irgend einem Grunde einzelne Atemzüge besonders vertieft werden, und er vermeidet es andererseits, daß der Sauerstoff unter Überdruck der Maske zuströmt, was ein nutzloses Entweichen desselben durch das Ausatemungsventil zur Folge haben würde. Zwischen die Sauerstoffbombe und den Gummisack pflegt man allgemein ein Reduzierventil einzuschalten, durch welches eine bequeme Dosierung der ausströmenden Sauerstoffmenge ermöglicht ist. Das Reduzierventil hat aber auch einen Nachteil. Es nimmt ziemlich viel Raum ein und beengt dadurch, besonders wenn bei mehreren Mitreisenden etwa drei Sauerstoffbomben gleichzeitig in Tätigkeit sind, den ohnehin knappen Raum in der Gondel. Man ist übrigens auch bei Benutzung eines solchen Ventils nicht der Mühe enthoben, in kurzen Zwischenräumen den Sauerstoffstrom aus der Bombe zu regulieren. Einmal weil das Atembedürfnis wechselt, namentlich nach jeder körperlichen Anstrengung, wie etwa Ballastauswerfen, sehr erheblich gesteigert ist, und andererseits weil der Sauerstoffstrom bei der allmählichen Abnahme des Drucks in der Bombe nachläßt. Ich finde es deshalb nach zahlreichen

Erfahrungen bei der Sauerstoffzufuhr zu meiner Respirationskammer zweckmäßiger, auf das Reduzierventil zu verzichten und dafür die Öffnung der Bombe, statt durch das kleine Rad, welches auf dem Kopfe der Bombe angebracht ist, durch einen etwa 15 cm langen Hebel, den man sehr bequem an Stelle dieses Rades aufschrauben kann, zu bewirken. Mit Hilfe eines solchen Hebels läßt sich der Austritt des Sauerstoffs aus der Bombe aufs feinste regulieren. Diese Regulation hat so zu geschehen, daß der Sack immer zu etwa $\frac{2}{3}$ gefüllt bleibt.

Die Menge des für eine Fahrt mitzunehmenden Sauerstoffs ergibt sich leicht aus der normalen Atemgröße des Menschen. Diese beträgt in absoluter Ruhe im Durchschnitt etwa 5 Liter pro Minute. Man wird bei dem leichten Grade von Bewegungen, die der Ballonfahrer zum Zwecke seiner Beobachtungen im allgemeinen nur auszuführen hat, kaum mehr als 7 Liter als Durchschnittsbedarf zu rechnen haben. Das wäre also pro Stunde ein Verbrauch von 420 Liter, so daß man mit einer gewöhnlichen 1200 Liter fassenden Bombe für knapp drei Stunden versorgt wäre. Eine längere Zeit dürfte man kaum in Höhen von 7000 m und darüber verweilen. Immerhin bleibt es unbedingt notwendig, daß der Ballonfahrer, ebenso wie er auf seinen Ballastvorrat für die künftige Landung achtet und diese nicht unter eine gewisse Grenze sinken lassen darf, so auch auf alle Fälle sorgen muß, daß er mit seinem Sauerstoffvorrat ausreicht, bis er wieder unter 6000 m Höhe abgesunken ist. Es ist deshalb auf alle Fälle erwünscht, an der Bombe ein Manometer zu haben, welches uns in jedem Moment über den noch vorhandenen Sauerstoffvorrat unterrichtet. — Der oben angenommene Verbrauch von 7 Liter Sauerstoff pro Minute ist allerdings bei einigermaßen dicht schließenden Leitungen und gut anliegender Maske oder Mundstück ein Maximum. Es nimmt ja das Atemvolumen in der Höhe, wie alle unsere Hochgebirgsversuche gezeigt haben, zu, aber im allgemeinen in geringerem Maße als die Verdünnung der Luft. Das auf normalen Druck reduzierte Atemvolumen ist also in der Höhe der Regel nach etwas geringer als im Meeresniveau. In unseren Versuchen und denen der anderen im Hochgebirge tätigen Forscher kam nur ausnahmsweise der Fall vor, daß das reduzierte Atemvolumen in der Höhe dem im Meeresniveau gleichkam oder es gar übertraf. So reicht also der angenommene Durchschnittsbedarf von 7 Liter auch noch für die gelegentlich des Ballastwerfens oder ähnlicher Arbeiten nötigen Anstrengungen aus.

VIII. Berechnung der höchsten erreichbaren Höhen.

Wenn es sich darum handelt, maximale Höhen mit Hilfe der Sauerstoffatmung zu erreichen, müssen noch gewisse Kautelen beachtet werden, die man bisher wohl nicht genügend klargestellt hat. Das Wesentliche bleibt ja, daß eine zur Deckung des Sauerstoffbedarfs ausreichende Dichte dieses Gases in den Lungenalveolen bestehe. Diese Dichte hängt außer vom absoluten Luftdruck von der Menge anderer Gase ab, die dem Sauerstoff in den Lungenalveolen beigemischt sind. Hier haben wir stets bei der Körpertemperatur von ca. 37° eine Wasserdampfspannung von 46 mm. Die Kohlensäurespannung wechselt in weiteren Grenzen. Sie ist ja im allgemeinen niedriger als auf der Erde, wenn wir in Höhen von 4000 m und darüber ge-

wöhnliche Luft atmen. Wir haben oben schon auseinandergesetzt, daß dies seinen Grund darin hat, daß in solchen Höhen der in einzelnen Organen bereits wirksame Mangel an Sauerstoff zur Bildung von Milchsäure und damit zu einem neuen Atemreiz Anlaß gibt, welcher die Lungenventilation verstärkt und dadurch naturgemäß den Prozentgehalt der Lungenluft an Kohlensäure herabmindert. Mit dieser Minderung dürfen wir natürlich nicht rechnen, wenn wir reinen Sauerstoff atmen, und wir werden überhaupt im allgemeinen mit dem Maximum an Kohlensäure rechnen müssen, wenn wir Gefahren ausschließen wollen. Wir können dann, solange stärkere Muskeltätigkeit vermieden wird, annehmen, daß in der Minute 250 ccm Kohlensäure (reduziert auf 0° und 760 mm) ausgeschieden werden. Das würde bei 5 Liter Lungenventilation im Liter 50 ccm von 0°, also etwa 57 ccm bei 37° C ausmachen. Das bedeutet aber eine Gasspannung von 43,3 mm. Die so berechnete Spannung ist sicher ein Maximalwert, denn sie übertrifft die höchste praktisch beobachtete nicht unerheblich. Es kommt nun aber nicht auf die Kohlensäurespannung in der Exspirationsluft, sondern auf die höhere in den Lungenbläschen an. Diese ergibt sich aus der Erwägung, daß bei jedem Atemzug der Inhalt des schädlichen Raumes als nahezu unveränderte atmosphärische Luft ausgeatmet wird, daß also bei einem Menschen, dessen schädlicher Raum 140 ccm beträgt, die ganze ausgeatmete Kohlensäure in den Lungenbläschen in einem Luftraum enthalten war, der um 140 ccm kleiner ist als das Volumen der Expiration. Wir wollen nun für verschiedene Formen der Atemmechanik, die sich aus dieser Erwägung ergebende Kohlensäurespannung in den Lungenalveolen berechnen. Jener vorher angenommene Fall, daß in der Ausatemungsluft eine Kohlensäurespannung von 43,3 mm herrscht, stellt sicher ein Extrem dar. Praktisch wird sich bei so hohem Kohlensäuregehalt automatisch die Atmung verstärken und infolgedessen die Kohlensäurespannung herabgehen. Wenn wir aber mit jenem extremen Fall rechnen, und um nach jeder Richtung die Bedingungen ungünstig zu machen, annehmen, daß die 5 Liter Minutenventilation sich auf 10 Atemzüge verteilen, dann hätten wir in diesen 5 Litern $10 \times 140 \text{ ccm} = 1,4 \text{ Liter}$ Luft des schädlichen Raumes. Es wäre also die Kohlensäure welche in 5 Litern 43,3 mm Spannung hat in 3,6 Liter Alveolenluft enthalten. In dieser würde also die Spannung betragen

$$\frac{43,3 \cdot 5}{3,6} = 60,1 \text{ mm.}$$

In den umfänglichen Untersuchungen, welche ich selbst und meine Mitarbeiter und später Durig über die Kohlensäurespannung in den Lungenbläschen bei Aufenthalt in verschiedenen Höhen angestellt haben, wurde als Maximum in der Ebene eine Spannung von 36 mm gefunden, in größeren Höhen ging dieselbe bis auf 20—25 mm zurück. Das bezieht sich allerdings auf den Zustand absoluter Ruhe und niedriger Sauerstofftension in der Atemluft. Bei größerer Muskelanstrengung nimmt im allgemeinen die Lungenventilation so stark zu, daß die Kohlensäurespannung in der Ebene meist nur wenig erhöht, in der verdünnten Luft des Hochgebirges sogar etwas herabgesetzt ist.

Wir wollen nun für jene faktisch wohl niemals vorkommende maximale Spannung von 60,1 mm und weiter für die den tatsächlichen Verhältnissen entsprechende,

aus unseren zahlreichen Erfahrungen abgeleiteten, wohl allein in Betracht kommenden Spannungen von 36 und 25 mm die erreichbaren Höhen berechnen. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß der zur Atmung zur Verfügung stehende Sauerstoff niemals absolut rein ist. Wir finden durchschnittlich im Sauerstoff der käuflichen Bomben 3—4 % Stickstoff, haben aber auch gelegentlich schon Bomben mit einem Gehalt von 7 und 8 % Stickstoff gefunden. Es erscheint deshalb nötig bei Rekordfahrten, die bis zu maximaler Höhe gehen sollen, den Sauerstoffgehalt der zu benützenden Bomben analytisch festzustellen, und eine stärkere Beimengung als 3 % Stickstoff nicht zuzulassen. Aber selbst dann, wenn man sich für eine Höhenfahrt ganz reinen Sauerstoff verschaffen würde, wäre es doch nicht zu vermeiden, daß in den Lungenbläschen dauernd ein geringer Stickstoffgehalt sich findet, und zwar aus zwei Gründen. Einmal hat unser Körper, in den verschiedenen Geweben gelöst, nicht unerhebliche Mengen von Stickstoff vorrätig. Sind es doch diese Stickstoffmengen, welche nach mehrstündigem Aufenthalt in komprimierter Luft sich derartig anhäufen, daß sie nach der Rückkehr unter normalen Druck die das Leben bedrohende Entwicklung von Gasblasen im Blute und im Gewebe des Nervensystems hervorrufen. Wir können den Gesamtvorrat des menschlichen Körpers an gasförmig absorbiertem Stickstoff unter normalen Bedingungen, je nachdem der Organismus magerer oder fettreich ist, auf 2000—2500 ccm schätzen. Ein fettreicher Organismus beherbergt erheblich mehr Stickstoff, weil Fett einen etwa 5 mal größeren Absorptionskoeffizienten für dieses Gas hat als Wasser. Dazu kommt ein individuell wechselnder Vorrat an Stickstoff in den Darmgasen, der bis zu 500 ccm betragen kann. Wenn wir nun reinen Sauerstoff atmen, gibt zwar das Blut in den Lungenalveolen fast momentan den größten Teil seines Stickstoffs an den Sauerstoff, der die Lungenbläschen erfüllt, ab, aber in den Geweben sättigt es sich aufs neue mit Stickstoff, so daß immer wieder eine beträchtliche Stickstoffmenge an die Luft der Lungenbläschen abgegeben wird. Wir dürfen, gestützt besonders auf die exakten Messungen von A. Bornstein in Hamburg, annehmen, daß erst nach etwa einer Stunde der größte Teil des im Körper vorrätigen Stickstoffs an die Lungenluft abgegeben ist. Rechnen wir nun, daß in dieser Stunde 300 Liter Sauerstoff geatmet worden sind, und daß sich der Stickstoff des Körpers auf dieses Gas gleichmäßig verteilt hätte, so ergibt sich bei einem maximalen Stickstoffvorrat von 3000 ccm durchschnittlich 1 % Stickstoff im Lungengas. Faktisch vollzieht sich ja die Stickstoffabgabe des Körpers nach einer asymptotisch der Abszisse sich nähernden Kurve. In der ersten Zeit wird viel, dann progressiv immer weniger Stickstoff der Lungenluft beigemischt. Wir werden also darauf rechnen dürfen, daß ein Luftfahrer, der etwa in einer Höhe von 6000 m mit der Sauerstoffatmung beginnt, wenn er nach einer Stunde eine Höhe von 10 000 m erreicht hat, nur noch sehr geringe Mengen Stickstoff in seinen Geweben hat, also der Luft seiner Lungenbläschen auch nur sehr wenig von diesem Gas beimengt. Ganz aber wird diese Stickstoffbeimengung zur Lungenluft überhaupt nicht aufhören, denn die äußere Haut nimmt in Berührung mit der Atmosphäre ständig aus dieser Stickstoff auf und gibt ihn an das zirkulierende Blut ab. Es findet, wie bekannt, bei Menschen und Tieren eine Hautatmung statt, welche unter normalen Verhältnissen zu einer Abgabe von Kohlensäure und zu

einer Aufnahme von Sauerstoff führt. Stickstoff wird für gewöhnlich durch die Haut nicht aufgenommen, weil die Spannung dieses Gases im Blut ebenso hoch ist wie in der an die Haut angrenzenden Luftschicht. Das ändert sich aber, sobald durch die Atmung reinen Sauerstoffs die Stickstofftension im Blut auf einen minimalen Wert reduziert ist. Jetzt nimmt die Haut ständig Stickstoff auf, und dieser Stickstoff wird in den Lungen an die Alveolenluft wieder abgegeben. Der Umfang dieser Stickstoffwanderung nach den Lungen läßt sich auf Grund der Versuche, welche Franchini und Preti¹⁾ in meinem Laboratorium ausgeführt haben, annähernd abschätzen.

Die direkt bestimmte Sauerstoffaufnahme durch die Haut betrug bei einer Temperatur der Haut von 36° C und einer als Triebkraft wirkenden Konzentrationsdifferenz von 81,5 Volumprozent 1,25 l pro Stunde. Nun verhalten sich nach Hüfner die Diffusionskoeffizienten von Sauerstoff und Stickstoff wie 1,67 : 1,79. Es würden also bei gleicher Konzentrationsdifferenz in der Stunde 1,34 l Stickstoff ins Blut eintreten, um in der Lunge wieder ausgeschieden zu werden. Da die Konzentrationsdifferenz zwischen dem Stickstoffgehalte der Atmosphäre und dem der mit Sauerstoff gefüllten Lungenalveolen auf 77 % anzuschlagen ist, vermindert sich diese Zahl im Verhältnis $\frac{77}{81.5}$ auf 1,29 l pro Stunde. Bei 600 l Lungenventilation in der Stunde ergibt dies eine Erhöhung des Stickstoffgehalts in der Expirationsluft um 0,22 %, also in der Alveolenluft um etwa 0,3 %. Das wäre bei 250 mm Luftdruck ein Partiardruck von 0,75 mm.

Ein Stickstoffgehalt des Bombengases von 3 % würde bei 250 mm Barometerstand einen Partiardruck von 7,5 mm ergeben. Durch die Zumischung des Wasserdampfes und der Kohlensäure wird dieser in den Lungenalveolen etwa auf die Hälfte herabgedrückt. Wir müssen deshalb damit rechnen, daß durch die gesamten Umstände, d. h. durch die unvermeidliche Verunreinigung des geatmeten Sauerstoffs mit Stickstoff und durch die ständige Zufuhr von Stickstoff zu den Lungenalveolen von seiten des Blutes, die Stickstofftension in der Lungenluft wenigstens 4 mm beträgt. Wir hätten dann also 46 mm Wasserdampfspannung, 60 mm Kohlensäure, 4 mm Stickstoff und müssen ferner verlangen, daß behufs ausreichender Sättigung des Blutes mit Sauerstoff die Tension dieses Gases wenigstens 40 mm beträgt. Wir kommen so zu einer Gesamtspannung von 150 mm, d. h. die äußerste Höhe, die wir unter diesen Umständen ohne Gefahr erreichen können, wäre die, in welcher der Luftdruck 150 mm beträgt, d. h. eine Höhe von 13 000 m. Wir haben hier extrem hohe Kohlensäurewerte in der Alveolenluft angenommen. Faktisch wird sich in der Höhe die Ventilation stets verstärken, man wird nicht mit 5000 ccm Sauerstoff per Min. auskommen, sondern wird unter dem Reize der Kohlensäure und der Produkte des Sauerstoffmangels erheblich stärker atmen, wenigstens 7000—9000 ccm Sauerstoff per Minute. Dann aber mindert sich die Kohlensäure-tension in den Lungenalveolen, und man kann dementsprechend mit der Möglichkeit noch in größeren Höhen ausreichend mit Sauerstoff versorgt zu sein, rechnen. Wenn wir annehmen, daß der Kohlensäuregehalt der Alveolen nicht über den höchsten Wert ansteigt, der in den Versuchen von Durig und seinen Mitarbeitern beobachtet wurde, das sind 36 mm, dann würden wir für die gesamte Gasspannung in den Lungenalveolen haben:

¹⁾ G. Franchini und L. Preti, Über Hautatmung III. Bioch. Zeitschrift 9, S. 442.

36 mm	Kohlensäure,
46 „	Wasserdampf,
4 „	Stickstoff,
40 „	Sauerstoff

126 mm, das entspricht einer Höhe von 14300 m, wohl das Maximum, das bei Atmung möglichst reinen Sauerstoffs im Ballon erreicht werden kann.

Bei den vorstehenden Rechnungen ist aber stets vorausgesetzt worden, daß der schädliche Raum nicht mehr als 140 ccm betrage. Wenn wir statt des Mundstücks die vorher besprochene Maske benutzen, wird aber der schädliche Raum wesentlich größer. Will man unter diesen Umständen die erreichbare Höhe berechnen, so muß man den Inhalt der Maske dem durch den Bau der Atemwege gegebenen schädlichen Raum von 140 ccm addieren und wird nunmehr, namentlich bei solchen Personen, welche gewohnheitsmäßig nicht sehr tief atmen, die Höhengrenze wesentlich niedriger finden. Wir wollen die Rechnung durchführen für eine Maske von 150 ccm Inhalt.

Der gesamte schädliche Raum beträgt nun 290 ccm, der Unterschied im Kohlensäuregehalt der Exspirationsluft und der Alveolenluft wird ein sehr erheblicher. Die hohe Kohlensäurespannung in den Alveolen führt dann naturgemäß zu einer verstärkten Lungenventilation, was wiederum eine Vergrößerung des Sauerstoffverbrauchs bedeutet. Wir werden bei Anwendung einer derartigen Maske sicher niemals weniger als 8 Liter in der Minute atmen, wahrscheinlich noch erheblich größere Luftmengen. Bei einer Atemtiefe von 500 ccm würden also 16 Atemzüge gemacht werden, wobei 16 mal $290 = 4640$ ccm Luft auf den schädlichen Raum und 3360 auf die Lungenalveolen kommen. Eine Minutenmenge von 250 ccm, oder auf Körpertemperatur reduziert von 285 ccm Kohlensäure würde auf diese 3360 ccm verteilt, einen Prozentgehalt von 8,49 oder einen Partialdruck von 64,5 mm ausmachen. Wir haben nun als Grenzwerte der zulässigen Gesamtspannung $64,5 + 46 + 40 + 4 = 154,5$ mm = 12 705 m Höhe. Es beschränkt also die Maske durch den unvermeidlichen schädlichen Raum die erreichbare Höhe nicht unerheblich, und man wird bei dem Bestreben, einen Höhenrekord zu erreichen, die Unbequemlichkeit der Mundstückatmung in den Kauf nehmen müssen.

Man wird aus dem vorher Gesagten erkennen, wie sorgfältig alle Einzelheiten des Atemapparats und der Sauerstoffzufuhr geprüft sein müssen, wenn man ohne Lebensgefahr die Höhengrenze von 12 000 m übersteigen will. Es dürfte sich am meisten empfehlen, in solchen Fällen vorher die ganze Apparatur in einer Luftkammer, in welcher man durch Maschinenkraft entsprechende Verdünnungen herstellt, zu prüfen. Derartige Luftkammern befinden sich im sogenannten pneumatischen Kabinett des Berliner jüdischen Krankenhauses und wurden hier von Berson, Süring und von Schrötter vor Antritt ihrer Höhenfahrten benutzt. Leider reicht die Kraft der Luftpumpen hier nicht aus, um Verdünnungen bis zu 126 mm, wie wir sie als theoretisch möglich bei Mundstückatmung berechnet haben, zu erzielen. Ob andere ähnliche Einrichtungen, wie die des Physiologischen Instituts in Turin und die des Lister Instituts in London, so weitgehende Verdünnungen ermöglichen, ist mir nicht genau bekannt.

Ich sagte schon vorher, daß sehr genaue Prüfungen des Sauerstoffs auf seine Reinheit notwendig sind. Diese Prüfung sollte sich aber nicht nur auf den beigemengten Stickstoff beziehen, vielmehr mit besonderer Sorgfalt noch darauf, ob etwa Spuren von Kohlenoxyd dem Sauerstoff beigemengt sind. Ich habe vor Jahren einmal eine Sauerstoffbombe in Händen gehabt, in deren Luft sich über $\frac{1}{10}$ % Kohlenoxyd befand. Ein solcher Sauerstoff würde ja, wenn wir ihn auf der Erde atmen, keine merklichen Gesundheitsstörungen herbeiführen, denn, da die Affinität des Kohlenoxyds zum Hämoglobin 150 mal größer ist als die des Sauerstoffs, würde bei Einatmung dieses Gasgemisches, da ja die Spannung des Sauerstoffs bei 95 % Gehalt 950 mal größer wäre als die von 0,10 % Kohlenoxyd, höchstens $\frac{1}{6}$ des ganzen Hämoglobin durch Kohlenoxyd in Beschlag genommen werden. Das bedeutet, wie gesagt, auf der Erdoberfläche keine Lebensgefahr, würde aber die erreichbare Höhe im Ballon ganz enorm herabdrücken, resp. würde in einer Höhe, in welcher bei Atmung reinen Sauerstoffs noch gar keine Gefahr droht, schwere Erscheinungen von Sauerstoffmangel, vielleicht den Tod herbeiführen.

Es ist noch eine andere Methode der Sauerstoffatmung als Ersatz der schweren und dadurch die Steigkraft des Ballons beeinträchtigenden Bomben vorgeschlagen worden. Cailletet, der berühmte Entdecker der Verflüssigung der Luft, hat vorgeschlagen, flüssigen Sauerstoff in Dewarschen Flaschen mit in die Höhe zu nehmen und den sich in diesen Flaschen ständig entwickelnden Sauerstoff zu atmen. Der Vorschlag wurde dann noch etwas vereinfacht durch Erdmann, welcher flüssigen Sauerstoff einfach in Kautschukbeuteln den Luftschiffern mitgab. Ich selbst hatte Gelegenheit, der Vorbereitung einer Hochfahrt von v. Schrötter beizuwohnen, für welche ein Sauerstoffvorrat in dieser Form mitgenommen wurde. Die Schwierigkeit dieser Art der Sauerstoffversorgung liegt darin, daß man die Verdampfung des flüssigen Sauerstoffs schwer regeln kann. Infolge der stetig abnehmenden Temperatur in größeren Höhen ist die Gefahr vorhanden, daß die Verdampfung des Sauerstoffs um so mehr abnimmt, je höher man kommt, je größer das Bedürfnis nach reinem Sauerstoff ist. Da die Verdampfung des reinen Sauerstoffs niemals so fein zu regeln ist wie etwa das Ausströmen des Gases aus dem Ventil der Flasche, wird man immer in die Notwendigkeit versetzt sein, der Luft Zutritt zu dem Sauerstoffreservoir zu gewähren. Man wird also in sehr wechselndem Maße mit atmosphärischer Luft, d. h. mit Stickstoff verdünnte Sauerstoffmischungen einatmen. Infolgedessen ist die Höhe, welche man erreichen kann, garnicht im voraus zu berechnen. Denkbar wäre es, die Methode etwa dadurch zu vervollkommen, daß man eine regulierbare Heizung des mit flüssigen Sauerstoff gefüllten Gefäßes vorsieht. Eine solche Heizung könnte ungefährlich etwa auf thermo-elektrischem Wege erfolgen, indem man in dem Sauerstoffbehälter eine Widerstandsspirale anbrächte, durch die man einen dosierbaren Strom aus Akkumulatoren hindurchleitet. Es müßte dann das Sauerstoffreservoir mit einem größeren Kautschukbeutel, in dem sich das Sauerstoffgas ansammelt und aus welchem die Atmung erfolgt, verbunden sein. Durch Regulation der Heizung wäre dafür zu sorgen, daß der Kautschukbeutel stets ausreichend mit Sauerstoffgas gefüllt wäre. Einstweilen möchte ich glauben, daß die ständige Aufmerksamkeit, welche die Regulation der Verdampfung des Sauerstoffs erfordert, mit der geringen Ersparnis an Gewicht zu teuer erkauft wäre. Die zur Lieferung

der nötigen Wärme mitzunehmenden Akkumulatoren würden nicht sehr viel weniger wiegen als die Sauerstoffbomben.

Etwas aussichtsreicher dürfte eine andre, in neuerer Zeit mehrfach benutzte Methode der Gewinnung reinen Sauerstoffs sein. Bekanntlich benutzt man jetzt vielfach in Rettungsapparaten für das Betreten von Räumen mit irrespirabler Luft Vorrichtungen, in welchen der Sauerstoff aus Superoxyden durch Einwirkung von Wasser erzeugt wird. Man hat zu diesem Behufe das Natriumsuperoxyd unter dem Namen Oxyolith in handliche Würfel geformt, von denen jeder eine genau bestimmte Quantität Sauerstoff entwickelt, wenn er in Wasser gelöst wird. Dr. Douglas benutzte auf unserer Teneriffa-Expedition derartige Oxyolithwürfel, um in einem größeren Kautschukbeutel Sauerstoff zu Atemversuchen zu entwickeln. Die Methode hat den Vorzug, daß aus dem Oxyolith während der Entwicklung des Sauerstoffs eine Lösung von Natriumhydroxyd gebildet wird, welche die ausgeatmete Kohlensäure absorbiert. Infolgedessen kann man, wenn man an dem Sack hin und her atmet, den darin enthaltenen Sauerstoffvorrat zum größeren Teil verbrauchen. Man kommt also mit einer relativ geringen Sauerstoffmenge längere Zeit aus. Wenn man z. B., wie dies bei den Versuchen von Douglas geschah, in einem entsprechend großen Kautschukbeutel etwa 6 Liter reinen Sauerstoff entwickelt, so kann man, ehe durch den vom Körper ausgeatmeten Stickstoff eine zu erhebliche Abnahme der Sauerstoffdichte im Sack erfolgt ist, immerhin $\frac{2}{3}$ des Vorrats, d. h. etwa 4 Liter veratmen, ohne daß eine Störung in der Atemmechanik sich bemerkbar macht, d. h. man würde mit den 6 Litern Sauerstoff etwa 10 Minuten lang auskommen, während man bei Benutzung von Bomben oder von flüssigem Sauerstoff diese Quantität in einer Minute verbrauchen würde. Es erscheint also sehr wohl denkbar, die Oxyolithmethode derart auszubilden, daß sie für die Ballonfahrten in sehr großen Höhen brauchbar wäre. Man müßte nur für eine sehr bequeme Unterbringung des Oxyolithvorrats, resp. für eine größere Anzahl vorher für Atmung vorbereiteter Kautschuksäcke Sorge tragen. Ein Bedenken sehe ich nur in der sehr niedrigen Temperatur der großen Höhen. Wasser könnte man natürlich nicht ohne weiteres benutzen, es fragt sich, ob eine sehr niedrig gefrierende Salzlösung, etwa eine konzentrierte Chlorcalciumlösung für die Entwicklung des Oxyoliths brauchbar wäre.

Um jene Höhengrenze zu überfliegen, bei der auch die Atmung reinen Sauerstoffs das Leben des Menschen nicht mehr möglich macht, hat v. Schroetter die Einrichtung eines luftdichten Gehäuses vorgeschlagen in welchem sich die Beobachter befinden. Die Wandungen dieses Kastens müßten stark genug sein, um einen Überdruck von 50—100 m Hg im Innern zu gestatten, dann wäre es allerdings möglich, so hoch vorzudringen, wie es die Tragkraft eines Riesenballons nur irgend gestattet. Die Verwirklichung dieses Projekts wird davon abhängen, ob physikalische oder meteorologische Probleme von genügender Bedeutung vorliegen, um die Riesenkosten und die immerhin nicht zu unterschätzende Gefahr für das Leben des Fahrers zu rechtfertigen. Angesichts der Erfolge der unbemannten Registrierballone erscheint es immerhin zweifelhaft, ob diese Frage zu bejahen ist. — Ein Problem, das durch die jüngsten Ansichten über die mit der Höhe zunehmende Anhäufung der spezifisch leichteren Gase in unserer Atmosphäre aktuell geworden ist, die Erforschung der chemischen Zusammensetzung der

Atmosphäre in extremen Höhen, läßt sich wohl auch mit Hilfe der unbemannten Ballone lösen.

Der Zweck dieses Schriftchens wäre erreicht, wenn es mir gelungen wäre, durch schärfere Charakterisierung der physiologischen Vorgänge, welche für den Luftschiffer und den Flieger bedeutungsvoll sind, die Selbstbeobachtung anzuregen und zur Verminderung der Gefahren mitzuhelfen. Vielleicht bin ich stellenweise etwas mehr in physiologische Einzelheiten eingegangen, als zur Information des Technikers nötig erscheint — aber gerade das genauere Studium der Art, wie sich die Regulationen in unserem Körper vollziehen, dürfte geeignet sein, zum Einleben in diese Probleme anzuregen.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Luftfahrt und Wissenschaft.

In freier Folge herausgegeben

von

Joseph Sticker.

Schriftleitung und Verwaltung der Stiftungen:

Professor **A. Berson,**

Dipl.-Ing. **C. Eberhardt,**

Gerichtsassessor **J. Sticker,**

Professor Dr. **R. Süring,**

Wirkl. Geh. Oberbaurat Dr. **H. Zimmermann.**

Früher erschienen:

Heft 1. **Luftfahrtrecht.** Von Dr. jur. **Josef Kohler,** Geh. Justizrat, ordentlicher Professor der Rechte an der Universität Berlin. VI und 45 Seiten. Preis M. 1,20. (Stiftung des Kaiserlichen Aero-Clubs, Berlin.)

Heft 2. **Experimentelle Untersuchungen aus dem Grenzgebiet zwischen drahtloser Telegraphie und Lufterlektrizität.** Von Dr. **M. Dieckmann,** Privatdozent für reine und angewandte Physik an der Kgl. Technischen Hochschule München. 1. Teil: **Die Empfangsstörung.** Mit 56 Abbildungen. Preis M. 3,—. (Stiftung des Berliner Vereins für Luftschiffahrt, Berlin.)

Demnächst erscheinen:

Untersuchungen über die Formänderungen der Hülle von Prall-Luftschiffen. Von Dipl.-Schiffbau-Ingenieur **Alexander Dietzius,** Privatdozent für Luftschiffbau an der Kgl. Technischen Hochschule zu Berlin.

Die Querschnittsformen der Vogelflügel und ihre Verwertung für Luftschrauben. Von Dipl.-Ing. **C. Eberhardt,** Ingenieur beim Luftschiffer-Bataillon, Berlin.

Tabellen zur astronomischen Ortsbestimmung. Von Dr. **A. Kohlschütter.**

Experimentelle Untersuchungen aus dem Grenzgebiet zwischen drahtloser Telegraphie und Lufterlektrizität. Von Dr. **Max Dieckmann,** Privatdozent für reine und angewandte Physik an der Kgl. Techn. Hochschule München. 2. Teil: **Die Reichweitenänderung.**

Die Untersuchung der Flugzeug- und Luftschiff-Maschinen. Von Professor **A. Wagener.**

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Biologie des Menschen.

Aus den wissenschaftlichen Ergebnissen der Medizin
für weitere Kreise dargestellt.

Bearbeitet von

Dr. Leo Hess, Prof. Dr. Heinrich Joseph, Dr. Albert Müller, Dr. Karl Rudinger,
Dr. Paul Saxl, Dr. Max Schacherl.

Herausgegeben von

Dr. Paul Saxl und Dr. Karl Rudinger.

Mit 62 Textfiguren.

Preis M. 8,—; in Leinwand gebunden M. 9,40.

Die Methode der künstlichen Atmung und ihre Anwendung in historisch-kritischer Beleuchtung mit besonderer Berücksichtigung der Wiederbelebungsverfahren von Ertrunkenen und Ersticken. Von Dr. G. van Eysselsteijn, Direktor des Universitäts-Krankenhauses in Groningen. Mit einem Vorwort von Prof. K. F. Wenkebach in Straßburg i. E. 1912.

Preis M. 3,20.

Der Einfluß psychischer Vorgänge auf den Körper, insbesondere auf die Blutverteilung. Von Prof. Dr. E. Weber, Oberassistent am Physiologischen Institut der Universität Berlin. Mit 120 Textfiguren. 1910.

Preis M. 14,—; in Leinwand gebunden M. 16,—.

Vorlesungen über Physiologie. Von Dr. M. von Frey, Professor der Physiologie und Vorstand des Physiologischen Instituts an der Universität Würzburg. Zweite, neubearbeitete Auflage. Mit 80 Textfiguren. 1911.

In Leinwand gebunden Preis M. 11,—.

Das Ohrlabyrinth als Organ der mathematischen Sinne für Raum und Zeit. Von Prof. Dr. E. von Cyon. Mit 45 Textfiguren, 5 Tafeln und dem Bildnis des Verfassers. 1908.

Preis M. 14,—.

Die Nerven des Herzens. Ihre Anatomie und Physiologie. Von Professor Dr. E. von Cyon. Übersetzt von H. L. Heusner. Neue, vom Verfasser umgearbeitete und vervollständigte Ausgabe mit einer Vorrede für Kliniker und Ärzte. Mit 47 Textfiguren.

Preis M. 9,—.

Elektrophysiologie menschlicher Muskeln. Von Dr. med. H. Piper, a. o. Professor der Physiologie, Abteilungsvorsteher am Physiologischen Institut der Kgl. Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin. Mit 65 Abbildungen. 1912.

Preis M. 8,—; in Leinwand gebunden M. 8,80.

Physiologisches Praktikum. Chemische und Physikalische Methoden. Von Prof. Dr. Emil Abderhalden, Direktor des Physiologischen Institutes der Universität zu Halle a. S. Mit 271 Figuren im Text.

Preis M. 10,—; in Leinwand gebunden M. 10,80.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.