

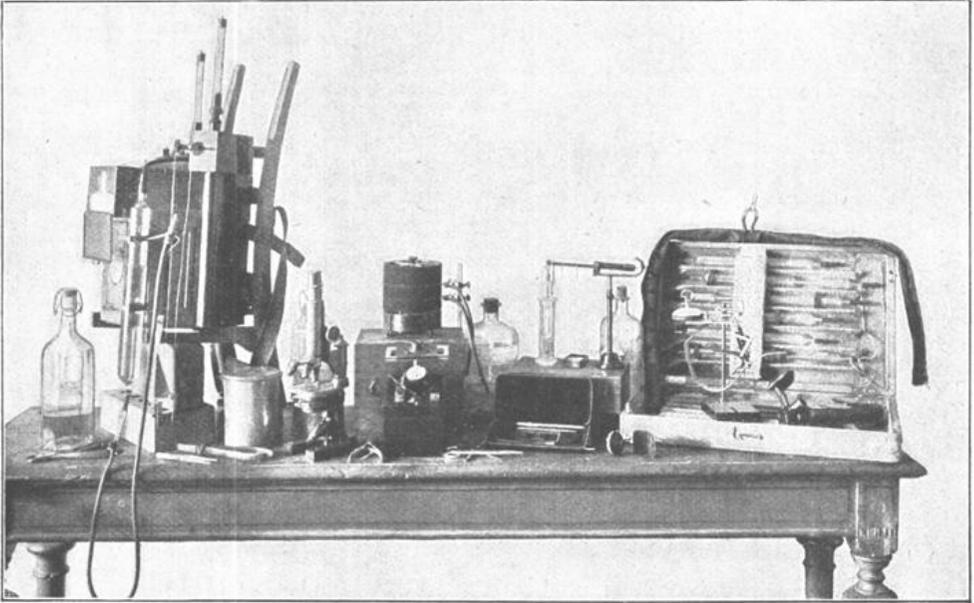
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Höhenklima und Bergwanderungen in ihrer Wirkung auf den Menschen

Zuntz, Nathan

Berlin, 1906

Kapitel XI. Die Atmungsmechanik im Hochgebirge



Unser Instrumentarium.

Kapitel XI.

Die Atmungsmechanik im Hochgebirge.

Der Zweck, der durch die Atmung verwirklicht werden soll: die Abgabe der im Körper gebildeten Kohlensäure und die Aufnahme von Sauerstoff aus der Atmosphäre, wird durch besondere mechanische Vorgänge erreicht. Diese bestehen in Bewegungen, durch welche die Lungen einerseits erweitert, andererseits wieder verengert werden, und die man in ihrer Gesamtheit als Atmungsmechanik bezeichnet.

Bei den Einatmungsbewegungen wird unser Brustraum durch Muskelkraft erweitert, indem das sich kontrahierende Zwerchfell nach unten tritt und gleichzeitig die vordere Wand des Brustkorbes gehoben wird, bei den Ausatmungsbewegungen kehren Zwerchfell und Brustkorb wieder in ihre Ruhelage zurück. Die Lungen sind elastische Säcke, welche dem Brustkorb luftdicht eingefügt sind, so daß ihre Oberfläche dessen Innenwand überall anliegt. Sie folgen daher allen Volumveränderungen des Brustraums, erweitern sich bei der Einatmung, verkleinern sich bei der Ausatmung und wirken dabei wie ein Blasebalg: Bei der Erweiterung tritt Luft von außen in sie ein, bei der Verkleinerung wird ein Teil der sie füllenden Luft, die inzwischen einen Teil ihres Sauerstoffs an das Blut abgegeben und sich mit Kohlensäure beladen hat, aus ihnen ausgetrieben.

Das ist das allgemeine Schema, nach dem der Atmungsvorgang verläuft. Verfolgt man ihn im einzelnen etwas genauer, so hat man folgende Faktoren in Be-

tracht zu ziehen: die Frequenz der Atemzüge, die Tiefe des einzelnen Atemzuges und die aus beiden resultierende, pro Minute geatmete Luftmenge, die sog. Atemgröße oder Ventilationsgröße. Alle diese Faktoren unterliegen nicht nur erheblichen individuellen Schwankungen, sondern wechseln auch bei der gleichen Person durch äußere Einflüsse oder innere Vorgänge in den weitesten Grenzen. Darum muß man gerade beim Studium der Atmung, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, mit Sorgfalt darauf achten, daß alle störenden Einflüsse fernbleiben, daß insbesondere zur Feststellung der Atmung bei Körperruhe alle äußeren Eindrücke abgehalten werden und volle körperliche und auch geistige Ruhe herrscht.

Was zunächst die Atemfrequenz des ruhenden, erwachsenen Menschen betrifft, so liegt sie meist zwischen 12—20 pro Minute, bei wenigen unter 10 oder über 20. Die Atemtiefe ist bei einzelnen Personen zu 300 ccm, bei anderen zu 400 bis zu 800 ccm gefunden worden. Die tiefen Atemzüge gehen im allgemeinen mit geringer Atemfrequenz, die flachen mit hoher Frequenz einher, so daß das in der Minute geatmete Luftvolum, die Atemgröße, doch nur mäßige Differenzen aufweist. Sie beträgt ca. 4—6 l pro Minute. — Man bestimmt Atemfrequenz und Atemtiefe mittels der S. 164 ff. beschriebenen Gasuhr.

Beobachtet man einen ruhig atmenden Menschen genau, so kann man oft schon ohne weiteres erkennen, daß die einzelnen Atemzüge nicht ganz gleichmäßig aufeinanderfolgen, und daß sie nicht gleich tief sind. Letzteres lehrt die verschieden starke Ausdehnung, die Brust und Bauch bei der Einatmung erfahren. Beim wachenden Menschen sind diese Schwankungen nur wenig ausgeprägt, deutlicher beim schlafenden. Hier folgt häufig nach normalen ruhigen Atemzügen eine sich immer mehr vertiefende, oft schnarchende Atmung, die dann entweder plötzlich abbricht, um von flachen Atemzügen abgelöst zu werden, oder allmählich, wie sie entstand, auch wieder schwindet. Es ergibt sich also, daß die Form der Atmung, der Atmungstypus, ein wechselnder ist. Um ihn objektiv festzustellen, bedient man sich des in den Naturwissenschaften, speziell auch in der Physiologie, viel benutzten graphischen Verfahrens. Man läßt die Atemzüge sich selbst aufzeichnen und besitzt dann ein getreues und dauerndes Bild derselben.

Bei der graphischen Methode wird der aufzuzeichnende Bewegungsvorgang auf einen leichten Hebel übertragen, an dessen Spitze ein berußter Papierstreifen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit vorbeigeführt wird. Der Papierstreifen wird gewöhnlich auf eine Trommel aufgespannt (vgl. Fig. 2, S. 306). Das die Trommel treibende Werk ist in dem die Unterlage der Trommel bildenden Gehäuse angebracht.

Für die Aufzeichnung der Atmungsbewegungen wendet man gewöhnlich die sog. „indirekte Übertragung“ an. Man benutzt dabei zwei metallene Kapseln, die mit einer Kautschukmembran verschlossen sind. Die eine Kapsel wird mit ihrer Membran auf der Brust oder dem Bauch durch unnachgiebige Schnüre befestigt. Sie steht mittels eines Gummischlauches mit der zweiten in Verbindung, deren nach oben gewendete Kautschukmembran den Schreibhebel trägt.

Dehnt sich nun die Brust oder der Bauch aus, so wird ein Druck auf die Membran der ersten Kapsel und damit auf die in ihr befindliche Luft ausgeübt, der Druck setzt sich durch den Kautschukschlauch hindurch auf die Luft in der zweiten Kapsel fort und wölbt hier die Membran nach außen vor. Dadurch wird der Hebel gehoben und verzeichnet auf der Trommel eine nach oben gerichtete Linie. Sinkt Brust oder Bauch wieder ein, so schreibt der Hebel eine absinkende Linie.

Anstatt der auf der Brust zu befestigenden Kapsel haben wir uns eines langen Gummischlauches bedient, der, auf Leder montiert, einen Atmungsgürtel darstellt, wie ihn die Figur 2 wiedergibt. Die Atmung wirkt auf ihn genau in gleicher Weise wie auf eine Kapsel. Einzelne Autoren bedienen sich einer Einrichtung, bei der im Gegensatz zu der unsrigen der Hebel bei der Ausatmung gehoben wird, bei der Einatmung herabsinkt (vgl. Fig. 3, S. 330).

Wir werden sehen, daß die Form der Atmung im Höhenklima nicht unbeeinflusst bleibt, daß ihre Änderungen vielmehr sehr interessante und wertvolle Einblicke in das Verhalten des Zentralnervensystems gestatten.

Wenn unsere Atmung ununterbrochen abläuft, so müssen ursächliche Momente vorhanden sein, durch die die Atmungsmuskeln dauernd zur Tätigkeit angeregt werden.

Solcher „Atmungsreize“ gibt es eine große Zahl. Sie wirken nicht direkt auf die Atmungsmuskeln, vielmehr auf das Zentralnervensystem und hier wieder auf eine bestimmte Stelle, von der aus der ganze Atmungsvorgang beherrscht

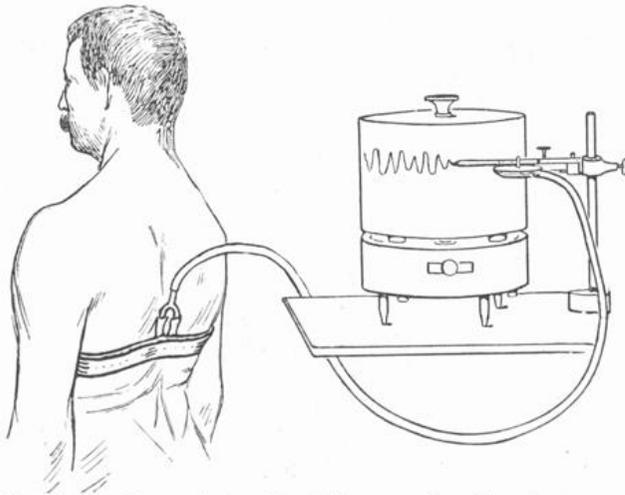


Fig. 2. Unser Apparat zur Registrierung der Atembewegungen.

und geregelt wird, auf das sog. Atmungszentrum. Es liegt im verlängerten Mark, dem Bindeglied zwischen Rückenmark und Hirn. Von hier gehen Nervenfasern zu untergeordneten Zentren im Rückenmark und von ihnen nervöse Bahnen zu den einzelnen Atmungsmuskeln. Werden diese Zentren vom Hauptzentrum abgetrennt oder zerstört, so gehen die Atembewegungen der nicht direkt von ihnen beherrschten Muskeln weiter. Eine Zerstörung des Atemzentrums im verlängerten Mark führt dagegen unmittelbar zum Atemstillstand und zum Tode.

Die Anregung des Atemzentrums ist eine doppelte. Einerseits erfolgt sie auf nervösen Bahnen von anderen Teilen des Körpers her, andererseits in ihm selbst durch das seine Nervenzellen umspülende Blut. Die erste Art der Erregung nennt man reflektorisch, die letztere automatisch. Die automatische Anregung des Atemzentrums ist die wesentlichste. Auch wenn alle seine Verbindungen mit dem übrigen Zentralnervensystem gelöst sind und das Zentrum damit außer allem Kontakt mit Nerven steht, welche von anderen Teilen des Körpers

her Reize zu ihm führen könnten, geht die Atmung, wenn auch in der Form verändert, weiter.

Bei Körperruhe ist es ausschließlich das Verhalten der Gase des durch das Atemzentrum strömenden Blutes, das unsere Atmung anregt und in ihrem Umfange regelt. Insbesondere ist der Gehalt an Kohlensäure für den Ablauf der Atmung maßgebend; wächst er, so wird sie verstärkt, nimmt er ab, so wird sie eingeschränkt. Der Sauerstoff wirkt als solcher nicht unmittelbar. Nur wenn das Blut daran in gewissem Maße verarmt, tritt gleichfalls eine Verstärkung der Atmung ein. Der Sauerstoffmangel wirkt also, wie man sich ausdrückt, reizend auf das Atemzentrum.

In Wirklichkeit ist aber, wie erwähnt, nicht der Mangel an Sauerstoff das erregende Moment, vielmehr werden bei beginnendem Sauerstoffmangel infolge des sich abnorm gestaltenden Stoffwechsels Substanzen gebildet, welche die Fähigkeit haben, das Atemzentrum zu verstärkter Tätigkeit zu reizen (Pflüger). — Wir werden im folgenden sehen, wie gerade im Hochgebirge die Atmung durch dieses Moment eine energische Steigerung erfährt.

Eingehende Untersuchungen von Zuntz und Geppert haben gezeigt, daß, sobald wir unsere Muskeln arbeiten lassen, die Blutgase nicht mehr die einzigen automatischen Atemreize bleiben. Es bilden sich bei der Muskelarbeit neue Reizstoffe. Bei dem intensiven Stoffverbrauch, der durch die Muskeltätigkeit hervorgerufen wird, entstehen noch nicht genauer gekannte Substanzen, die jedoch gleich wie die Kohlensäure saurer Natur zu sein scheinen. Diese Stoffe wirken mächtig auf die Atmung und können sie so energisch steigern, daß das Blut sogar an Kohlensäure ärmer wird als bei Körperruhe. Diese Atmungssteigerung bei Muskeltätigkeit hat eine doppelte Bedeutung. Durch sie wird nicht nur die Sauerstoffzufuhr zum Blute, sondern auch die des Blutes zu den tätigen und sauerstoffbedürftigen Geweben vermehrt. Denn die Steigerung der Atmung führt zugleich auch eine Beschleunigung des Blutkreislaufes herbei.

Wie können wir uns nun eine Vorstellung von dem Verhalten der Blutgase und damit von dem Umfange der Reize bilden, die das Atemzentrum infolge der Beschaffenheit des Blutes treffen?

Müßten wir dazu die Blutgase selbst analysieren, so würden wir von einer Untersuchung dieser Frage am Menschen Abstand nehmen müssen. Aber auf Grund der Erfahrungen, die wir in dem die Blutgase behandelnden Kapitel X besprochen haben, können wir auf indirektem Wege zu dem erwünschten Ziele gelangen.

Wir haben dort gesehen, daß die Spannung der Gase des Blutes sich in den Lungenbläschen ausgleicht mit der Spannung der in letzteren enthaltenen Gase. Das Blut, das aus der Lunge ins linke Herz und von ihm durch die Arterien zu den einzelnen Organen strömt, hat also eine Gasspannung, die der in den Lungenbläschen, oder wie man sie auch nennt, in den Lungenalveolen, gleich ist. — Man erhält also den nötigen Aufschluß über die Atemreize, wenn man die sog. alveolaren Gasspannungen ermittelt.

Die alveolare Sauerstoff- und Kohlensäurespannung wird aus der Sauerstoff- und Kohlensäurespannung der Expirationsluft berechnet. — Man könnte meinen, daß beide gleich sein müßten. Sie wären es, wenn alle eingeatmete Luft an der Atmung teilnähme, d. h. also

Sauerstoff abgäbe und Kohlensäure aufnahme. Dieser Prozeß geht aber nur in den Lungenbläschen selbst vor sich. Um zu diesen zu gelangen, muß die eingeatmete Luft durch die Mund- oder Nasenhöhle, durch Rachen, Kehlkopf und Luftröhre hindurchpassieren. Die letzten Anteile der Einatemungsluft bleiben nun in diesen Luftzuführungswegen zurück, sie gelangen nicht bis zur Lunge und nehmen demgemäß nicht an der Atmung teil. Sie behalten also nahezu ihre der atmosphärischen Luft entsprechende Zusammensetzung. Loewy hat den Raum, den dieser Anteil einnimmt, als „schädlichen Luftraum“ bezeichnet und ihn experimentell zu ca. 140 ccm ermittelt.

Bei der Ausatmung mischt sich die Lungenluft mit diesen 140 ccm, sie verdünnt sich gewissermaßen, wird an Sauerstoff reicher und an Kohlensäure ärmer. Kennt man die Tiefe eines Atemzuges und seinen Gehalt an Sauerstoff und Kohlensäure, so läßt sich sehr einfach auch Sauerstoff- und Kohlensäuregehalt der Lungenalveolarluft und daraus ihre Spannung berechnen. *)

Je größer der Atemzug, um so mehr tritt natürlich der schädliche Raum mit seinen 140 ccm gegen den in die Lunge selbst gelangten Anteil zurück, um so mehr muß die Lungenluft sich der Ausatemungsluft in ihrer Zusammensetzung annähern.

A. Mosso hat die Bedeutung des schädlichen Luftraums geleugnet. Er glaubt, daß die Lungenluft durch die Luft im Kehlkopf und Rachen hindurchtrete, ohne sich mit ihr zu mischen. Wäre das der Fall, so müßten die verschiedenen Anteile eines Atemzuges, die zuerst und die zuletzt ausgeatmeten, gleiche Zusammensetzung zeigen. Das ist nun, wie Loewy beweisen konnte, nicht der Fall. Die ersten Anteile sind zwar immer schon reich an Kohlensäure, aber sie enthalten doch weniger davon als die letzten. Das konnte auch Mosso bestätigen. Er fing zunächst den bei ruhiger Atmung entleerten Anteil eines Atemzuges bei einem seiner Begleiter, Dr. Aggazzotti, gesondert auf und ließ alsdann den Rest der Atemluft durch eine kräftige Ausatmung herauspressen. Letzterer Anteil war stets reicher an Kohlensäure. Damit ist eigentlich die Bedeutung des schädlichen Raumes auch durch Mosso erwiesen. Mosso beabsichtigte nun aber durch diesen Versuch die Zusammensetzung der Lungenluft direkt zu ermitteln, indem er annahm, daß der letzte Anteil des Atemzuges genau die Zusammensetzung der Luft in der Lunge, der er ja entstammt, anzeige. Hier macht sich indes das Bedenken geltend, daß der Gasaustausch während der Zeit, die die Ausatmung erfordert, weitergeht, also die Luft sauerstoffärmer und kohlenstoffreicher wird. Der zuletzt ausgeatmete Anteil ist daher anders zusammengesetzt als die Alveolenluft bei normaler ruhiger Atmung. Für diese gibt die oben ausgeführte rechnerische Ermittlung zutreffendere Werte.

Wenn auch die wesentliche Regulierung unserer Atmung eine automatische ist, so kann der Respirationsverlauf doch in erheblichem Maße reflektorisch beeinflusst werden durch Reize, die dem Atemzentrum von den verschiedensten Stellen unseres Körpers durch Nervenbahnen zugeleitet werden. Gerade in dieser Richtung ist das Höhenklima besonders wirksam, weil in ihm Reize enthalten sind, die in energischerem Maße als im Tiefland die Atmung reflektorisch anregen.

Als das für diese Reflexe bedeutungsvollste Organ ist die äußere Bedeckung unseres Körpers zu nennen. Schon bei leichter Berührung der Haut, mehr noch bei stärkerem Druck und bei Reizungen, die zu Schmerzempfindung führen, ändert sich die Atmung sehr erheblich. Sie wird ferner beeinflusst durch Hitze- oder Kältereiz.

Die Hautreize wirken aber nicht ausschließlich anregend. Man kann unter ihrer Einwirkung auch sekundenlange Hemmung der Atmung beobachten. Solche Hemmungswirkungen gehen in noch viel eklatanterer Weise von der durch den

*) Die Rechnung ist ausführlich mitgeteilt bei Loewy, Pflügers Arch. Bd. 58, S. 416.

fünften und zehnten Hirnnerven („Trigeminus“ und „Vagus“) versorgten Schleimhaut der Nase und der Luftwege aus. Alles was diese Schleimhäute reizt, hebt die Einatmung auf und führt zu einer Ausatmung, der eine mehr oder weniger lange Atempause bei Expirationsstellung des Brustkorbes folgt. Ist der Reiz sehr heftig, so kann die Ausatmung mit explosionsartiger Kraft erfolgen in einer Form, die wir als Niesen oder Husten bezeichnen. Diese Funktion ist eine ausgesprochen zweckmäßige, denn die Unterbrechung der Einatmung gewährt den tieferen Atemwegen, speziell den Lungen, einen Schutz vor dem Eindringen reizender Stoffe und giftiger Gase. —

In ähnlichem Sinne kann man einen anderen Reflex auffassen, dessen Vermittler wiederum die genannten Nerven, Trigeminus und Vagus, sind, und dessen Effekt sich an der ringförmig die Luftröhrenzweige umgebenden Muskulatur äußert. Er ist besonders von J. Lazarus^{6a)} und von Einthoven^{3a)} studiert worden. Diese der Willkür entzogenen Muskeln stellen gewissermaßen eine zweite Etappe für den Schutz der Lungen gegen schädliche Angriffe von außen dar. Auf Reizungen der Nasenschleimhaut oder auch der Luftröhrenschleimhaut ziehen sie sich zusammen, bewirken dadurch eine Verengung der Luftwege und erschweren den Luftzutritt zu den Lungenbläschen. Hierdurch kleben die Staubteilchen an der die Wand überziehenden Schleimschicht leichter fest, um mit dem Schleim nach außen entleert zu werden.

Es gibt nicht wenige Personen, bei denen die Schleimhäute der Luftwege übermäßig empfindlich sind. Bei ihnen geraten die Luftröhrenmuskeln schon in einen Zustand kräftiger Zusammenziehung, wenn die Einatmungsluft nur geringe, im übrigen unschädliche Beimengungen enthält. Die Folge ist erschwerter Luftzutritt zur Lunge und damit Atemnot, die sich bis zu heftigen asthmatischen Anfällen steigern kann.

Bei diesen Personen vermag nun das Höhenklima günstig zu wirken durch seine in Kapitel II hervorgehobene Staub- und Keimfreiheit. Atemnot und asthmatische Beschwerden lassen nach und schwinden, da eben das Höhenklima wenig oder nichts von dem enthält, was die Ringmuskeln der Bronchien zur Zusammenziehung reizen könnte. Aber auch der Gesunde empfindet den wohltätigen Einfluß der Reinheit der Höhenluft: das leichte, freie Atmen in den Bergen ist als der subjektiv wahrnehmbare Ausdruck dieser Wirkung zu betrachten.

Hat das Höhenklima so einen, man könnte sagen, indirekten Einfluß auf die Atmung, so sind ihm in der niederen Temperatur, der starken Luftbewegung und der ihm eigentümlichen intensiven Bestrahlung, Momente gegeben, die von Haut und Auge aus direkt energisch die Atmung erregen können.

Dem auch unsere höheren Sinnesorgane — Ohr und Auge — sind Stätten, von denen aus Atemfrequenz und Tiefe geändert werden. Lauter Schall und grelles Licht führen reflektorische Erregungen zum Atemzentrum, die dessen Tätigkeit beeinflussen.

Der vorstehende kurze Überblick erschien uns geboten, um das Verständnis der eigentümlichen Wirkungen, die das Höhenklima auf die Atmung ausübt, zu erleichtern.

Frequenz und Tiefe der Atmung im Hochgebirge. Am einfachsten zu beobachten sind die Veränderungen der Atmungsfrequenz. Sie ist der labilste Faktor der Atmungstätigkeit, und kann schon durch Anwendung eines Mundstückes oder auch einer Maske verändert werden.

Es hat sich nun gezeigt, daß der Übergang in eine größere Höhe die Atmungsfrequenz ändert, und zwar im Sinne einer Zunahme. Bei längerem Aufenthalt kehrt die Frequenz allmählich wieder zu den im Tieflande beobachteten Werten zurück.

So fand Mermod¹¹⁾ in Straßburg (142 m Höhe), in Erlangen (343 m), in Lausanne (614 m) und in St. Croix (1100 m), wo er sich stets mehrere Monate aufhielt, schließlich keine Differenzen mehr. H. Weber sah bei 30 Personen, die 2 bis 20 Wochen im Hochlande verweilten, einen Anstieg der Atemfrequenz in 82% der Fälle, in 6% eine Abnahme.

Sehr gut wird die Zunahme der Atmungsfrequenz beim Übergang in die Höhe und ihr Wiederabsinken bei längerem Aufenthalt durch Beobachtungen illustriert, die 1896 gemacht wurden. Es betrug die Atemfrequenz pro Minute bei:

	A. Loewy	J. Loewy	Leo Zuntz
In Berlin (31 m Höhe)	13—14	9—10	10
In der Capanna Gnifetti (3620 m):			
am 17. August	16	12	—
„ 19. „	15	—	17
„ 20. „	14	—	14

Die Atmung wurde frühmorgens gleich nach dem Erwachen bei vollkommener Ruhe im Bett gezählt.

Etwas ungleichartiger stellt sich die Wirkung der Höhe, wenn man die Frequenz bei Anstellung von Atmungsversuchen zählt. Die Mehrzahl der untersuchten Individuen — und ihre Zahl ist im Laufe der Jahre eine verhältnismäßig beträchtliche geworden — zeigt zwar auch eine Steigerung, aber daneben findet sich doch nicht selten eine Konstanz oder sogar eine Abnahme.

Die Veränderungen der Atemfrequenz halten sich immer in engen Grenzen, die Zunahmen betragen 2—5, die Abnahmen 1—3 Atemzüge pro Minute.

Wir wollen davon absehen, hier das gesamte Beobachtungsmaterial mitzuteilen; es findet sich in Versuchen, die Marceet auf der Insel Teneriffa im Jahre 1878 angestellt hat, wobei die Höhendifferenzen zwischen dem Meeresniveau und 3580 m schwankten, ferner in Versuchen von Veraguth, der bis 1800 m (St. Moritz) aufstieg, in Versuchen von Mosso, der auf der Spitze des Monte Rosa zählte (4560), von Schumburg-Zuntz, die am Nordabhang des Monte Rosa von Zermatt aus bis ca. 4000 m hinaufkamen, und von A. und J. Loewy und Leo Zuntz, die südlich am Monte Rosa bis 3620 m (Gnifetti-Hütte) emporstiegen.

In Mossos Versuchen sowohl wie auf unserer damaligen Expedition handelt es sich um Beobachtungen an einer größeren Zahl von Personen, und in beiden treten individuelle Unterschiede der Höhenwirkung besonders gut zutage.

Die Mossoschen Ergebnisse finden sich auf der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt. Zu ihnen ist zu bemerken, daß die ersten fünf auf ihr verzeichneten Personen vom Aostatal langsam in die Höhe stiegen. Sie schlugen an verschiedenen Zwischenstationen ihr Lager auf und kamen so jede Woche nur 1000 m höher. Die beiden letzten stiegen von Turin direkt zum Gipfel. Sie allein zeigen

auf dem Monte Rosa eine Abnahme der Atemzahl. Bei den ersteren tritt mit Ausnahme eines ein Ansteigen der Atemfrequenz ein. — Mosso, Bizzozzero und Sarteur hatten schon Hochtouren gemacht, die übrigen nicht.

Tabelle 1.
Mossos Versuche.

Versuchsperson	Ort	Atmungs- frequenz pro Min.	Atmungs- tiefe cem
U. Mosso . . .	Gressoney (1627 m)	12	578*)
	Margherita-Hütte (4560 m)	13	660
B. Bizzozzero	Gressoney	11	808
	Margherita-Hütte	15	611
Camozzi . . .	Gressoney	8	587
	Margherita-Hütte	9	883
Sarteur . . .	Gressoney	10	562
	Margherita-Hütte	10	582
Solferino . . .	Gressoney	10	641
	Margherita-Hütte	14	390
Chamois . . .	Turin	18.5	428
	Margherita-Hütte	15.5	585
Oberhoffer . .	Turin	20	445
	Margherita-Hütte	19	483

Ähnliche Verschiedenheiten weisen nun, wie gesagt, unsere eigenen Versuche auf.

Tabelle 2.
Eigene Versuche.

Ort	Waldenburg		Kolmer		Caspari		Müller		Loewy		Zuntz	
	Fre- quenz pro Min.	Tiefe cem										
Berlin . . .	10	566	17.2	382	14.5	401	13.0	447	11.5	438		
Brienz . . .	7.5	646	14.7	432	13.2	363	9.9	502	11.6	394	7.3	648
Rothorn . .	7.6	690	16.0	412	15.5	365	13.0	420	13.6	246	7.0	782
Col d'Olen	8.2	723					9.7	585				
Monte Rosa	6.0	885	18.0	462	12.1	699	8.2	1079	15.7	399	6.0	1495

Eine regelmäßige Steigerung der Frequenz von Brienz zum Monte Rosa-Gipfel findet sich nur bei Kolmer und Loewy, im Gegensatz dazu ein Absinken bei Zuntz. Bei Waldenburg macht sich ein Sinken der Frequenz auf der Monte Rosa-Spitze geltend, ebenso bei Müller und Caspari, die auf dem Rothorn eine deutliche Steigerung gegenüber Brienz erkennen lassen. Also auch in

*) In Mossos Buch steht Seite 467 die falsche Zahl 758.

unseren Versuchen überwiegt die erregende Wirkung des Höhenklimas auf die Atemfrequenz. Woher die gefundenen individuellen Unterschiede stammen, ist nicht sicher zu sagen. Von Waldenburg abgesehen, hatten wir alle bereits häufig Hochtouren unternommen, die uns gegen 4000 m führten, das Training auf unserer Expedition selbst war für alle das gleiche gewesen. Altersunterschiede können auch nicht gut in Frage kommen, da gerade das älteste und jüngste Mitglied, Zuntz und Waldenburg, sich gleich und von den anderen abweichend verhalten.

Es besagt nicht viel und ist eigentlich nur eine Umschreibung der Tatsachen und ein Eingeständnis unserer Unkenntnis, wenn wir zu dem Schluß kommen, daß mit Bezug auf die Atemfrequenz die Erregbarkeit verschiedener Naturen gegen die Klimareize der Höhe eine verschiedene ist.

Auch die Atemtiefe ändert sich mit der Höhe und wiederum bei den einzelnen Personen in ganz verschiedener Weise. Aber es ist interessant, daß ein deutlicher Gegensatz zwischen Atemfrequenz und Tiefe besteht. Sowohl in Mossos wie in unseren Versuchen ist bei denen, die eine Verminderung der Frequenz zeigen, meist die Tiefe vermehrt, und wo die Frequenz gesteigert ist, die Atemtiefe oft verringert. Bei Mossos Versuchspersonen macht nur der Soldat Camozzi eine Ausnahme, bei uns Waldenburg auf Col d'Olen und Kolmer und Loewy auf dem Monte Rosa-Gipfel.

Die Atemgröße bei Körperruhe. Atemfrequenz und Atemtiefe bedingen nun im Verein miteinander denjenigen Faktor, dem die wesentlichste Bedeutung im Atmungsmechanismus zukommt, nämlich die Ventilationsgröße pro Minute. Sie ist darum so wesentlich, weil von ihr die Sauerstoffversorgung des Körpers in erster Linie abhängt. Im Gegensatz zur Atemfrequenz und -tiefe erweist sich das pro Minute geatmete Luftvolum im Höhenklima in eindeutiger Weise gegenüber dem Tieflande geändert: Es ist fast stets gesteigert. — Allerdings zeigt sich auch hier, daß die Höhenlage, in welcher die Steigerung des Atemvolums einsetzt, eine individuell verschiedene ist, und daß auch der Umfang der Steigerung bei gleicher Höhe von Person zu Person wechselt.

Eine scheinbare Ausnahme machen nur die Untersuchungen von Jaquet und Stähelin. In diesen war das Atemvolum nicht gesteigert. Aber sie stiegen nur zu 1600 m Höhe auf. Es ist anzunehmen, daß beim Anstieg zu bedeutenderen Höhen eine Atemsteigerung wohl auch an ihnen hervorgetreten wäre.

Daß eine Höhe von 1600 m bereits anregende Wirkung hervorzurufen vermag, ergibt sich aus Versuchen von Zuntz und Schumburg. Ihr Atemvolum pro Minute betrug in Berlin: bei Zuntz 4.99 l, bei Schumburg 5.56 l, in Zermatt dagegen bei ersterem 5.45 l, bei letzterem 6.36 l. — Ähnliches zeigen die Ergebnisse Veraguths. In Zürich (459 m) atmete dieser in 5 Minuten 26.3 l, in St. Moritz (1800 m) bald nach dem Aufstieg 34.4 l, nach vierzehntägigem Aufenthalt 28.8 l; in Parpan (1505 m), wohin er sich von St. Moritz begab, 27.7 l, und nach der Rückkehr nach Zürich, wie im Beginne, 26.6 l. Ja, schon in 1100 m Höhe kann die steigernde Wirkung angedeutet sein, so in Versuchen von Mermod. Alle übrigen Untersuchungen erstrecken sich bis zu Höhen über 2000 m; hier werden die Wirkungen augenfälligere.

Wir wollen in zwei Tabellen eine Übersicht aller in Betracht kommenden Werte geben. Die folgende Tabelle 3 enthält die auf unserer Expedition gewonnenen Zahlen, die Anhangstabelle XXVI alle übrigen in der Literatur vorliegenden.

Tabelle 3.
Verhalten der Lungenventilation im Höhenklima.

	Waldenburg		Kolmer		Caspari		Müller		Loewy		Zuntz	
	Atemgröße un- reduziert	Prozent. Zunahme des Atem- volums	Atemgröße un- reduziert	Prozent. Zunahme des Atem- volums	Atemgröße un- reduziert	Prozent. Zunahme des Atem- volums	Atemgröße un- reduziert	Prozent. Zunahme des Atem- volums	Atemgröße un- reduziert	Prozent. Zunahme des Atem- volums	Atemgröße un- reduziert	Prozent. Zunahme des Atem- volums
Berlin: Barom.: 758 mm Höhe: 54 m	5662.5	5148.0	6570.7	6008.9	5812.5	5182.5	1901 5801 5343 1903 5923 5189		5041.3	4466.9	4877	4460
Brienz: Barom.: 715 mm Höhe: 500 m	4847.8	4035.9	6352.9	6038.3	4808.7	4132.3	4970.4	4275.6	4573.3	3945.1	4724.5	4117.5
Brienzer Rothorn: Barom.: 590 mm Höhe: 2150 m	5243.6	3766.3	6584.9	4714.9	5659.5	4075.9	5465.5	3916.2	5256.0	3761.2	5473.7	3926.1
Col d'Olen: Barom.: 525 mm Höhe: 2900 m	5961.2	3922.4					5675.3	3715.3				
Monte Rosa: Barom.: 425 mm Höhe: 4560 m	5308.3	2846.8	8323.2	4462.6	8466.5	4563.5	8919.9	4515.0	6269.8	3386.7	8431.2	4608.6
		9.51		32.58		76.08		63.36				78.47

Es handelt sich um ein ganz stattliches Material, da in beiden Tabellen zusammen über die Wirkung auf 19 Personen berichtet wird. Mit den schon genannten, Mermod, Veraguth und Jaquet, würden also im ganzen 22 Personen bis jetzt im Höhenklima untersucht sein.

Betrachten wir zunächst Anhangstabelle XXVI mit ihren 15 Personen.

Von allen hat allein der Soldat Solferino auf der Gnifetti-Spitze ein geringeres Atemvolum als in Gressoney. Alle übrigen 14 Personen atmen energischer in der Höhe als in der Tiefe. Ja, mit wenigen Ausnahmen zeigt sich in denjenigen Versuchsreihen, in denen in mehreren verschiedenen Höhen das Atemvolum bestimmt wurde, daß ein mit der Höhe stetig zunehmendes Anwachsen stattfindet.

Eine Ausnahme in dieser Beziehung macht Marcets Führer, Cupelin, der in 2161 m Höhe unbedeutend weniger atmet als im Meeresniveau, eine scheinbare auch J. Loewy, der auf Col d'Olen in 2800 m erheblich weniger als in Berlin atmet. Aber letzterer war bei den Berliner Versuchen noch nicht vollkommen mit dem Atmen an der Gasuhr vertraut, auch fanden diese Versuche im pneumatischen Kabinett statt, an dessen Enge man sich erst gewöhnen muß.

Die Ergebnisse unserer letzten Expedition, die auf Tabelle 3 vereinigt sind, sind dadurch etwas eigentümlich, daß bei der Mehrzahl der Teilnehmer das Atemvolum in Berlin abnorm hoch liegt. In Brienz (500 m Höhe) ist es erheblich niedriger, um nun mit dem Aufsteigen in die Höhe bei allen progredient zuzunehmen. Nur der eine Waldenburgsche Wert auf dem Monte Rosa bildet eine Ausnahme.

Unter den untersuchten 19 Personen sind alle Altersklassen vom 20. bis gegen das 60. Lebensjahr vertreten, kräftige Bergsoldaten und mit einem Übermaße körperlicher Kraft nicht gerade begabte Großstädter, Personen, die das Hochgebirge kennen, und solche, die es noch nie zuvor besucht hatten. Mustert man die Zahlen daraufhin, ob die eben genannten Momente einen Einfluß auf das Ergebnis haben, so drängt sich der Gedanke auf, daß ein häufiger Besuch des Hochgebirges ebenso wie ein längerer Aufenthalt in ihm eine Gewöhnung herbeiführt, derart, daß die Atmung weniger erregt wird. Dafür spricht die relativ geringe Steigerung, welche Mossos Bergsoldaten aufweisen, dafür auch das Ergebnis von Marcets Bergführer, Cupelin.

Stellt man die an Zuntz auf drei Expeditionen innerhalb acht Jahren, oder die an A. Loewy auf zweien mit einem Zwischenraum von fünf Jahren gewonnenen Zahlen zusammen, so findet man auch hier im Verhalten des Atemvolums Unterschiede zwischen den früheren und späteren Expeditionen angedeutet. Bei beiden, die zwischen diesen Expeditionen allerdings wiederholt das Hochgebirge besucht hatten, ist eine Art Gewöhnung zustande gekommen. Bei Loewy beträgt die Atemsteigerung auf der Monte Rosa-Spitze weniger als gelegentlich der vorhergehenden Expedition auf der 3600 m hoch gelegenen Gnifetti-Hütte und selbst als auf dem 2900 m hohen Col d'Olen. Bei Zuntz liegt das Atemvolum beim ersten Aufenthalt auf der Gnifetti-Spitze im Mittel um 800 ccm höher als beim zweiten (8431 ccm gegen 7613 ccm). Freilich kommt für Zuntz in Betracht, daß er sich 1903 vor Ersteigung der Spitze 6 Tage in Col d'Olen aufgehalten hatte.

Als allgemeines Resultat können wir demnach den Satz aufstellen, daß das Höhenklima imstande ist, unsere Atmung anzuregen. Das geschieht bei der Mehrzahl der Individuen, soweit sie nicht Bergbewohner sind, wohl schon bei 1500 m Höhe, wird oberhalb 2500 m erheblich und tritt besonders hervor, wo die Beschwerden des Sauerstoffmangels einsetzen. — Gewöhnung an das Hochgebirge rückt die Grenze, bei der die Atmungssteigerung einsetzt, hinauf.

Jaquet hat auf Grund eines weniger umfassenden Beobachtungsmateriales die Anschauung ausgesprochen, daß bis zu einem Barometerdruck von 550 mm, entsprechend etwa 2500 m Höhe, die Atemmechanik keine Veränderungen aufweist, welche als typische Wirkung des Höhenklimas hingestellt werden könnten; dieser Auffassung können wir uns auf Grund des vorstehend zusammengestellten Zahlenmateriales nicht anschließen. Die klimatischen Reize des Höhenklimas setzen, wie es scheint, besonders bei denen, die an sie nicht gewöhnt sind, doch schon weit früher ein.

Die Atemgröße bei Körperarbeit. Wir haben bis jetzt allein von dem Luftvolumen gesprochen, das bei Körperruhe in der Minute geatmet wird. Wir wollen nun sehen, ob auch das Atemvolumen, welches von einer bestimmten Arbeitsleistung erfordert wird, sich mit der Höhe ändert.

Das Material zur Beantwortung dieser Frage geben uns die auf den Tabellen Nr. XVII—XXII des Anhangs vereinigten Zahlen an die Hand. — Ein Blick auf diese Werte zeigt zunächst, welch kolossalen Effekt die Muskelarbeit auf die Leistung der Atemmuskeln hat. An Stelle der 4—6 l Luft, die bei Körperruhe geatmet werden, sehen wir hier Volumina von über 30 l in Berlin und Brienz und über 40 l auf dem Monte Rosa. Da aber die Arbeitsleistungen nie einander gleich sind, lassen sich diese Werte nicht unmittelbar vergleichen. Dazu ist es notwendig, zu berechnen, wie groß die Luftmenge ist, die für je 1 mkg Steigarbeit gebraucht wird.

Zu diesem Zweck ziehen wir von den in Stab 6 der Anhangstabellen aufgeführten Atemvolumina bei Steigarbeit die Atemvolumina bei Körperruhe ab. Es bleibt die Luftmenge übrig, die der gesamten Marscharbeit zukommt. Diese setzt sich noch aus zwei Komponenten zusammen, der Vorwärtsbewegung des Körpers und seiner Hebung. Die der Vorwärtsbewegung zukommenden Luftmengen kennen wir auf Grund der Marschversuche auf horizontaler Bahn. Diese geben uns an, wieviel Luft für jeden Meter Weg geatmet wird, wir können demnach berechnen, wieviel Luft die in Stab 16 verzeichnete Vorwärtsbewegung während des Bergaufsteigens erfordert. Nach Abzug dieser bleibt dasjenige Luftvolumen übrig, das dem Emporsteigen entspricht. Wird dies durch die in Stab 18 aufgeführten Werte für die pro Minute geleistete Steigarbeit dividiert, so erhält man schließlich die Luftmenge für jedes um ein Meter gehobene Kilogramm.

So ist die folgende kleine Tabelle 4 berechnet.

Aus Tabelle 4 geht deutlich hervor, wie bei uns allen das 1 mkg Steigarbeit zukommende Atemvolumen mit der Höhe anwächst.

Bevor wir jedoch auf die Wirkung des Höheng Aufenthaltes näher eingehen, wollen wir kurz die in Berlin selbst erhaltenen Werte miteinander vergleichen. Dabei zeigt sich nun, daß die Luftmengen, die pro Meterkilogramm Steigarbeit verwendet werden, individuell nicht unbedeutend schwanken. Loewy hat den niedrigsten Luftwechsel mit nur 15 ccm für jedes Meterkilogramm Arbeit, Caspari, Kolmer und Zuntz haben gegen 20 ccm und Müller und Waldenburg 25—26 ccm. Maximum und Minimum differieren also um ca. 66%. — Wenn man bedenkt, daß die Minutenarbeit im Mittel etwa 500 mkg ausmacht, so fallen diese Differenzen schon ins Gewicht; sie bedeuten, daß der eine größere Luftmenge Atmende für seine

Atmung mehr Energie aufwenden muß als der mit einer geringeren Luftmenge sich Begnügende. Allerdings wird dieser Nachteil des weniger ökonomischen Atmens dadurch wettgemacht, daß dabei die Sauerstoffzufuhr zur Lunge und durch die mit der Atmungsverstärkung einhergehende Beschleunigung der Blutzirkulation noch besonders die Sauerstoffversorgung der Gewebe sich günstiger gestalten und somit das Maximum der möglichen Arbeit erhöht wird.

Tabelle 4.
Atemvolumen für das Meterkilogramm Steigarbeit.

Ort	Höhe in m	cem Atemluft erforderlich für jedes mkg Steigarbeit bei						Bemerkungen
		Walden- burg	Kolmer	Caspari	Müller	Loewy	Zuntz	
Berlin I . . .	} 54 {	26	19	19	25	15	—	Steigung 12.68°—18.24° " 26°
" II . . .		—	—	—	25	—	20	
Brienz I . . .	} 500 {	27	28	27	34	33	22	bei Ankunft aus Berlin bei Rückkehr v. Rothorn
" III . . .		—	22	—	25	35	—	
BrienzerRothorn	2150	29	28	34	38	43	48	
Col d'Olen . .	2900	41	—	—	36	—	—	
Punta Gnifetti.	4560	—	89	95	—	—	80	Steigung 22—29°

Wenn wir nun nach Feststellung dieser individuellen Eigentümlichkeiten, die sich schon in Berlin geltend machten, die Einwirkung der Höhe betrachten, so erkennen wir, daß — anders als in der Ruhe — bei Körperarbeit schon in Brienz eine deutliche Steigerung der Atemvolumina zutage tritt. Allerdings nicht ausnahmslos: Waldenburg, dessen Atemvolumen auch bei Körperruhe durch die Höhe nur wenig beeinflußt wurde, hat bis zum Rothorn hinauf kaum eine Steigerung. Aber bei allen übrigen ist sie vorhanden und zum Teil so erheblich, daß bei Loewy die Luftmenge pro Meterkilogramm Steigarbeit in Brienz schon über 100 % ansteigt. Mit Ausnahme von Kolmer steigt sie bei allen weiter auf dem Brienzer Rothorn, um auf dem Monte Rosa-Gipfel exzessive Werte zu erreichen. Sie übertrifft hier die Berliner Lungenventilationsgröße um das $4\frac{1}{2}$ - bis 5fache. — Dieses Ergebnis steht im Einklang mit unseren Untersuchungen aus dem Jahre 1896 und 1903.^{3) 7) 17)} Auch dort fanden wir, daß die Atemtätigkeit bei Muskelarbeit stärker erregt wird als im Tieflande.

Noch auf eine auffallende Beobachtung möchten wir hinweisen, die bei zweien von uns — bei Kolmer und Müller — gemacht werden konnte.

Bei beiden war, als sie, von Berlin kommend, in Brienz ihre Steigversuche ausführten, die Atmung deutlich erhöht. Als sie jedoch vom Brienzer Rothorn zurückkehrten und ihre weiteren Versuche in Brienz anstellten, war ihre Atemtätigkeit dabei ganz (Müller) oder nahezu (Kolmer) auf die Berliner Werte zurückgegangen. Das spricht dafür, daß beide sich an die Klimareize in Brienz unterdes gewöhnt hatten. Bei Loewy war ein solcher Rückgang nicht zu erkennen. — Besonders bemerkenswert ist, daß bei Kolmer und Müller der Stoffumsatz, die Körpertemperatur und die Pulsfrequenz (vgl. Kapitel VIII, XII u. XV) dasselbe eigentümliche Verhalten in der zweiten Brienzer Periode zeigen:

sie liegen niedriger als in der ersten Brienzer Periode und nähern sich den Berliner Werten!

Die Anpassung der Atemgröße an die Luftverdünnung. Um die Steigerung der Atmungstätigkeit festzustellen, haben wir die durch die Gasuhr an den verschiedenen Stationen geatmeten und von ihr angezeigten Luftmengen direkt miteinander verglichen. Nun enthalten aber in den verschiedenen Höhen gleiche Luftvolumina eine ganz verschiedene Luftmasse, die Menge der Gasmoleküle in einem Volum Luft nimmt ja mit der Höhe entsprechend der Luftverdünnung ab.

Um sich Kenntnis von der Luftmasse, d. h. der Zahl der eingeatmeten Gasmoleküle zu verschaffen, und um diese in der Höhe und im Tieflande vergleichen zu können, muß die Atemgröße, wie schon früher auseinandergesetzt, auf den sog. Normalzustand, d. h. auf gleichen Druck von 760 mm Quecksilber, auf 0° und auf Trockenheit reduziert werden.

Ein Blick auf die Anhangstabellen Nr. X—XXIII und die vorstehende Tabelle 3 lehrt, daß in der überwiegenden Zahl der Versuche die reduzierten Luftmengen in der Höhe geringer sind als im Tieflande. Unter der großen Zahl der untersuchten Personen finden wir nur an A. Loewy auf dessen erster Expedition eine Steigerung der reduzierten Atemgröße bei Körperruhe, sowohl auf Col d'Olen wie auf der Gnifetti-Hütte (3.58 l in Berlin zu 3.77 l und 3.71 l), ebenso bei Leo Zuntz in der Gnifetti-Hütte und auf der Monte Rosa-Spitze (4.36 l : 4.57 l : 5.70 l). — Auf letzterer liegt auch bei Mossos Bergsoldaten Camozzi das reduzierte Atemvolum höher als in Turin (3.83 l : 4.50 l), ebenso bei N. Zuntz gelegentlich dessen erster Monte Rosa-Besteigung (Anhangstabelle XV) (4.46 l : 4.6 l).

Die meist beobachteten Verminderungen der geatmeten Luftmasse bei Körperruhe in den verschiedenen Höhenstationen sind individuell wieder ganz verschieden. Bei der Mehrzahl der untersuchten Personen sind sie nur gering, bei wenigen ist die Versorgung mit Atemluft in der Höhe eine wesentlich verschlechterte. Letzteres ist besonders bei der Mehrzahl von Mossos Bergsoldaten der Fall. Und trotzdem vertrugen diese die Höhenluft besser als diejenigen, welche — wir verweisen nur auf die Mehrzahl der Teilnehmer unserer eigenen Expedition — infolge Steigerung ihrer Atmung fast dieselbe Luftmasse, oder auf der Monte Rosa-Spitze sogar eine noch höhere als in Brienzen, ihren Lungen zuführten.

Das weist darauf hin, daß bei den die Höhe gewöhnten Soldaten andere Regulationseinrichtungen bestehen müssen, welche die Steigerung der Atmung überflüssig machen.

A. Mosso hat als erster im Jahre 1884 auf die Bedeutung der Tatsache hingewiesen, daß die reduzierte Luftmenge, die man im Hochgebirge einatmet, geringer ist, als die im Tieflande. Er hatte sie ermittelt gelegentlich einer Expedition auf den Theodulpaß (Matterjoch, 3333 m Höhe), die er von Turin aus unternommen hatte. Die geatmeten Luftmengen, welche — auf 1 m Druck und 0° reduziert — für eine halbe Stunde in Turin gegen 120 l betragen, waren auf dem Theodul auf etwa 95 l herabgesetzt. Mosso schloß, daß, wenn wir imstande sind, mit einer um soviel geringeren Luftmenge auszukommen, wir im Tieflande eigentlich über Bedarf atmen. Mosso nannte das „Luxusatmung“ und die Lehre von dieser Luxusatmung hat in der Physiologie der Atmung eine Rolle gespielt.

Aus dem von uns zusammengefaßten Zahlenmaterial geht nun hervor, daß dieser Luxus-

atmung eine allgemeine Gültigkeit nicht zukommt. Immerhin ist die Tatsache von Interesse, daß bei der Mehrzahl der Menschen eine Einrichtung besteht, die sie befähigt, auch für verschlechterte Bedingungen der Sauerstoffzufuhr gerüstet zu sein und trotz dieser ihren normalen Stoffumsatz zu behaupten. Die Tatsache, daß die Luftzufuhr im Tieflande reichlicher ist als für Körperruhe erforderlich, reiht sich vielen für andere Körperfunktionen bekannten an, die nicht den Zeiten des gewöhnlichen Bedarfes, sondern den Zeiten der Not angepaßt sind.

Im Vorstehenden ist wiederholt von dem Worte Gewöhnung Gebrauch gemacht worden, einfach um der Tatsache Ausdruck zu geben, daß der Übergang in neue Bedingungen, die in unserem Falle durch Höhengedächtnis und Training gegeben sind, Wirkungen auf die Lungenventilation hervorruft, welche trotz Fortdauer der neuen Bedingungen allmählich rückgängig werden. — Wir wollen versuchen, den sehr vagen Begriff mit einem bestimmteren Inhalt zu erfüllen.

Die Zunahme der Lungenventilation im Höhenklima ist ein sehr zweckmäßiger Regulationsvorgang; sie steigert unsere Widerstandskraft gegen den verminderten Sauerstoffgehalt der eingeatmeten Luft. Geht sie bei längerem Aufenthalte wieder zurück, so muß man schließen, daß sie nicht mehr notwendig ist, daß andere Regulationsmechanismen eingesetzt haben, die sie überflüssig machen. Solche liegen in den schon besprochenen Veränderungen des Blutes und wohl auch in einer zweckmäßigeren Regulation des Blutumlaufes. Diese Anschauung wird dadurch gestützt, daß mit und trotz Rückgang der Lungenventilation das Befinden bei Körperruhe — wo es gestört war — sich bessert und die Leistungsfähigkeit sich hebt. So erklärt sich auch, daß Bergführer und Bergsoldaten in großen Höhen kräftig bleiben und nicht unter den Beschwerden des Sauerstoffmangels leiden, trotzdem ihre Atmung nicht oder jedenfalls weniger gesteigert ist als die der gelegentlichen Besucher des Hochgebirges.

Wir sind in der Lage, über die Atmung einiger in Ertragung hochgradiger Luftverdünnung besonders bewährter Menschen genaueres beibringen zu können.

Auf dem Monte Rosa-Gipfel untersuchten wir 1901 den mit Prof. Sella heraufgekommenen Bergführer Bianchetti, welcher ohne besondere Beschwerden mit Vittorio Sella den Elbrus (5650 m) bestiegen hatte. Seine Atemmechanik war auf dem Monte Rosa von der unsrigen kaum verschieden, er atmete 8 l pro Minute bei 14 Atemzügen. Im Verhältnis zu seinem mäßigen Sauerstoffverbrauch (249 cm pro Minute) war seine Lungenventilation jedenfalls eine erhöhte. — Die höchste je von Menschen erreichte Höhe (10 800 m) ertrugen Berson und Süring bei ihrer Ballonfahrt am 31. Juli 1901, freilich unter Zuhilfenahme von Sauerstoffatmung. Auch diese beiden „Höhenmenschen“ durften wir wiederholt in bezug auf ihre Atmung untersuchen. Süring zeigt unter normalen Verhältnissen in Berlin eine der Ertragung großer Luftverdünnung vorzüglich angepaßte Atemmechanik. Er macht nur 5—6 Atemzüge pro Minute. Die Atemtiefe betrug im Mittel 1146 cm und erreichte bei einzelnen Atemzügen 1900 cm. Etwas anders Berson, dessen Atemmechanik sich der durchschnittlichen mehr nähert. Er macht ruhig sitzend 8—9, nach längerer Ruhe lesend nur 6 Atemzüge pro Minute bei 4.22 l Minutenvolumen. Die Atemtiefe übersteigt nicht 800 cm. — Auffallend ist, daß er auf der Höhe der Inspiration eine deutliche Pause macht, also länger als gewöhnlich seine Lunge

maximal gefüllt hält. Bei einem Versuche im pneumatischen Kabinett ertrug Berson trotz seiner scheinbar weniger günstigen Atemmechanik stärkere Luftverdünnung als Süring, ebenso war es Süring, der bei der genannten Hochfahrt zuerst das Bewußtsein verlor. —

Wir dürfen auch diese Tatsachen als Beweis dafür ansehen, daß zwar tiefes Atmen für die Ertragung großer Höhen wesentlich ist, daß aber andere Momente, speziell wohl die Güte der Blutversorgung der lebenswichtigsten Zentren, noch ausschlaggebender sind.

Die merkwürdige Tatsache, die wir an Kolmer und Müller fanden, daß nach Aufenthalt in größeren Höhen und nach längerem Training die vorher bemerkte Wirkung geringerer Höhe auf die Atemgröße nunmehr verschwunden war, wird uns so verständlich. Anderweitige Anpassungen an die Luft größerer Höhen konnten sich allmählich ausbilden, die Leistungsfähigkeit derart wachsen, daß für geringere Höhe das Bedürfnis einer Atmungssteigerung nicht mehr bestand.

Natürlich kann eine genügende Ausbildung zweckmäßiger Regulationsvorgänge nur innerhalb gewisser Grenzen stattfinden. Über eine gewisse Höhe hinaus werden sie versagen. H. v. Schrötter hat die Zone innerhalb welcher die Luftverdünnung so groß ist, daß eine zureichende Sauerstoffaufnahme ins Blut auf keine Weise möglich wird, als die der absoluten Anoxyhämie bezeichnet, die erstere als die relativer Anoxyhämie: hierbei kann der Organismus durch Ausgleichsvorgänge den Sauerstoffgehalt des Blutes genügend hochhalten.

So können wir verstehen, warum in sehr erheblichen Höhen ein Rückgang des gesteigerten Atemvolums nicht beobachtet wird. Hier ist die Grenze erreicht, wo die Atmungssteigerung auch in der Ruhe notwendig bleibt, um dem Blute genügend Sauerstoff zuzuführen und den Blutstrom ausreichend zu beschleunigen. Ein gutes Beispiel hierfür bieten die Erfahrungen an Durig und Zuntz (1903). Trotz dreiwöchigen Aufenthaltes auf der Monte Rosa-Spitze blieb das Atemvolum hoch, ja, es stieg sogar bei Zuntz von 6.8 auf 7.9 l, bei Durig von 7.5 auf 8.0 l. Beide fühlten sich subjektiv wohl, ihr Hirn erhielt also genügend Sauerstoff. Die durch Sauerstoffmangel erzeugten, die Atmung steigernden Reize entstammten anderen Organsystemen, deren ungenügende Sauerstoffversorgung den Gesamtorganismus nicht merklich schädigte.

Ein Konstantbleiben des Atemvolumens beim Aufstieg ist aber nicht immer ein günstiges Zeichen. Das sahen wir an Waldenburg, der in 4560 m Höhe keine Steigerung zeigte und dabei schwer unter der Bergkrankheit litt. Solche Fälle beruhen wohl auf Ermüdung oder Erschöpfung des Atemapparates. Einerseits kann vorangegangene Überanstrengung die Leistungsfähigkeit der Muskeln, andererseits mangelhafte Sauerstoffzufuhr die Erregbarkeit des Atemzentrums derart herabsetzen, daß die vorhandenen Atemreize keine steigernde Wirkung mehr ausüben. In diesen Fällen ist das Fehlen einer Atmungszunahme natürlich ungünstig zu beurteilen.

Die Beeinflussung des Atmungszentrums im Hochgebirge. Der Vergleichung der reduzierten Atemvolumina in der Höhe und im Tieflande lag der teleologische Gedanke zugrunde, ob und wie weit die in der Höhe geatmeten Luft-

volumina dem in der Tiefe geatmeten Luftquantum entsprechen, d. h. ob die Atmungssteigerung die Verdünnung kompensiere.

Im übrigen bietet die Betrachtung der reduzierten Atemvolumina kein weiteres Interesse, während die der direkt ermittelten uns tiefergehende Schlüsse gestattet und uns auf die Ursachen der Atmungssteigerung im Höhenklima führt. — Um ein größeres Luftvolum in die Lungen aufzunehmen, müssen diese stärker erweitert werden, die Atembewegungen müssen also umfänglicher vor sich gehen. — Nach den einleitend gegebenen Auseinandersetzungen ist es dazu notwendig, daß das Atemzentrum stärker erregt wird. Dann regt es auch, wenn es sich sonst normal verhält, die Atemmuskeln zu stärkerer Tätigkeit an.

Finden wir also im Höhenklima eine verstärkte Atmung, so können wir schließen, daß das Zentrum in stärkerem Maße als im Tieflande Erregungen erhält. Es liegt zwar noch eine zweite Möglichkeit vor, nämlich die, daß es reizbarer geworden ist als zuvor. Aber von einer gesteigerten Reizbarkeit wissen wir nichts, und es liegt auch kein Moment vor, das auf sie hindeutet. Dagegen ist die Summe der Reize, die auf das Atemzentrum wirken, im Höhenklima erhöht.

Wir haben früher die Atemreize in zwei Kategorien gebracht. Die einen treffen unseren Körper an irgendeiner Stelle und gelangen von dieser aus auf dem Wege der Nerven zum Atemzentrum. Wir nannten die so zustande kommenden Erregungen der Atmung „reflektorische“. Demgegenüber werden die Reize der zweiten Art, die „automatischen“, durch das Blut zum Atemzentrum geführt und greifen es direkt an.

Beiderlei Reizarten erfahren im Höhenklima eine Änderung.

Wenn wir uns der Eigentümlichkeiten des Höhenklimas erinnern, des intensiven Lichtes, der starken Insolation, niederen Lufttemperatur, energischeren Luftbewegung und der besonderen elektrischen Verhältnisse, so wird es uns nicht wundern, daß die Atmung durch stärkere Reizung des Hautorgans und der Sinnesnerven eine Anregung erfahren kann. Vielfache Laboratoriumsversuche, in denen vergleichend im Dunkeln und bei Belichtung (Moleschott, Speck), ferner in kalter Luft oder in kühlem Wasser (Speck, Loewy, Rubner u. a.), endlich auch in Zugluft (Rubner) die Atmung untersucht wurde, haben die steigernde Wirkung der Hautreize und der optischen Reize ergeben. Im Hochgebirge haben Durig und Zuntz in speziellen Versuchen den Einfluß intensiver Belichtung, des Windes, der Kälte und der elektrischen Verhältnisse untersucht. Die Wirkung dieser Klimafaktoren allein reichte aber nicht aus, um die des Höhengaufenthaltes zu erklären.

Es liegt ferner eine Versuchsreihe vor, in der die Wirkung des Seeklimas auf den Gaswechsel untersucht wurde. Die Versuche sind von Loewy und Müller ausgeführt. (Ort der Versuche war Westerland auf Sylt.) Das Seeklima ist dem Höhenklima ähnlich in der starken Luftbewegung und in der erheblichen Insolation. Natürlich fehlt ihm die charakteristische Eigentümlichkeit der Höhenluft, die Luftverdünnung. Loewy und Müller konnten nun an jeder der drei Personen, an denen sie ihre Versuche anstellten, konstatieren, daß das Atemvolum pro Minute bei absoluter Körperruhe — sie führten ihre Versuche frühmorgens

an den ruhig im Bette liegenden Personen aus — auf Sylt deutlich gegenüber dem in Berlin unter den gleichen Versuchsbedingungen gefundenen erhöht war. Die folgende kleine Tabelle gibt eine Zusammenstellung der gefundenen Werte:

Tabelle 5.

Name	Atemvolum pro Min. in ccm		Zunahme in ccm
	Berlin	Westerland	
Frau Müller . . .	3844.4	4544.4	700.0
Loewy	4466.9	5058.1	591.2
Müller	5189.3	5315.1	126.8

Bei M. ist die Zunahme eine relativ geringe, bei Frau M. und bei L. eine beträchtlichere. Dabei sei ausdrücklich erwähnt, daß diese Mittelwerte sich aus einer größeren Zahl wenig voneinander abweichender Einzelwerte zusammensetzen und insbesondere, daß ein Absinken der Werte vom Beginn bis zum Ende des zwölf-tägigen Aufenthaltes nicht zu bemerken war.

Beim Seeklima kann es sich nur um reflektorisch wirkende Reize handeln, die den steigernden Effekt zuwege bringen, und so werden wir solchen reflektorischen Erregungen wohl auch für das Höhenklima eine Rolle zuweisen müssen.

Daß sie jedoch in denjenigen Höhen, in denen die Symptome der Bergkrankheit offenbar werden, nicht die vorwiegend wirksamen sind, ist sicher. — Ist die Bergkrankheit auf Sauerstoffmangel zurückzuführen, wie wir das ausführlich in einem späteren Kapitel begründen werden, so wird auch das Atemzentrum, das gegen Sauerstoffmangel empfindlicher ist als viele andere Zentren des Nervensystems, von ihm betroffen, und antwortet darauf mit verstärkter Atmung. Es handelt sich hier also um Änderungen der automatischen Erregung des Zentrums.

Die Erscheinungen der Bergkrankheit bedeuten aber einen bereits vorgeschrittenen Grad von Sauerstoffmangel, dessen Beginn in geringere Höhen gesetzt werden muß. Weit mehr als für den Zustand körperlicher Ruhe gilt dies für Muskeltätigkeit im Hochgebirge, bei der schon in mittleren Höhen Sauerstoffmangel in den arbeitenden Muskeln eintreten kann. Geschieht das doch selbst schon im Tieflande bei übermäßiger Arbeit.

Verhalten der Gasspannungen in den Lungenalveolen. Wie bereits erörtert wurde, geben die alveolaren Gasspannungen uns einen Maßstab für die Sauerstoffversorgung. Mit ihnen sind nach Ansicht der meisten Autoren die Spannungen der Gase des arteriellen Blutes in Übereinstimmung. Jeder Gasspannung entspricht für jedes Blut eine ganz bestimmte Gasmenge — Sauerstoff wie Kohlensäure.

Wir wollen deshalb den Gang der Sauerstoff- und der Kohlensäurespannung in den Lungen beim Aufsteigen ins Hochgebirge verfolgen und uns auf Grund dieser Werte Rechenschaft zu geben suchen, wie sich die Größe und Natur der Blutatemreize ändert. — Wir haben aus den in den Anhangstabellen X—XV enthaltenen Werten die Anhangstabelle XXVII A zusammengestellt. Die Abteilung B enthält Werte, die teils auf früheren, teils auf der späteren Expedition gewonnen sind.

Betrachten wir zunächst die Werte für den Sauerstoffdruck. Sie zeigen bei allen einen progredienten, aber individuell ganz verschiedenen Abfall, so daß sie im Gegensatz zu Berlin, wo sie bei uns allen fast auf gleichem Niveau liegen, schon in Brienz deutlich voneinander abweichen. Dasselbe ist auf Col d'Olen der Fall und ist besonders auf dem Monte Rosa-Gipfel ausgeprägt. Am günstigsten ist auf dem Gipfel Müller gestellt, dessen alveolare Sauerstoffspannung immer noch 61 mm beträgt, am ungünstigsten Loewy mit nur 37.7 mm.

Die Ursache dieser Differenzen wird uns klar, wenn wir zugleich mit diesen Werten die Atemmechanik, speziell das Atemvolum pro Minute und die Atemtiefe vergleichen, wie sie in Tabelle 3 verzeichnet sind. Dann erkennen wir, daß die alveolaren Sauerstoffspannungen um so höher liegen, je größer das Atemvolumen und speziell die Atemtiefe sind, je mehr also die Klimareize auf die Atmung eingewirkt haben.

Was die Art der Atmung hier leistet, wie sehr sie die Sauerstoffspannung in den Lungen beeinflußt, ergibt sich deutlich daraus, daß bei Waldenburg, J. Loewy und Leo Zuntz z. B. auf dem Col d'Olen in nur 2900 m Höhe die Sauerstoffspannung in den Lungen nur 57—58 mm beträgt, also niedriger ist als bei Müller in 4560 m Höhe und gerade dem bei N. Zuntz auf zwei Expeditionen auf dem Monte Rosa-Gipfel gefundenen Werte entspricht. — Die Sauerstoffmenge, mit der das Blut sich sättigen kann, ist demnach bei N. Zuntz und Müller in 4560 m Höhe noch so groß wie bei den drei anderen in 2900 m.

Die Bedeutung dieser Zahlen erhellt noch mehr, wenn wir mit Hilfe der in Kapitel X, S. 295 enthaltenen Kurve feststellen, wie sich denn bei diesen Spannungen die Sauerstoffaufnahme ins Blut verhält, und damit die Sauerstoffversorgung des Körpers und im speziellen auch die des Atemzentrums.

Es zeigt sich dann, daß bei Loewy und Kolmer eine erhebliche Verminderung des Sauerstoffgehaltes des arteriellen Blutes auf dem Monte Rosa-Gipfel vorhanden ist. Sie können in ihr Blut nur noch $\frac{3}{4}$ derjenigen Sauerstoffmenge aufnehmen, die es in Berlin binden kann. Die übrigen vermögen ihr Blut in Monte Rosa-Höhe allerdings noch reichlicher mit Sauerstoff zu sättigen, am besten Müller mit $\frac{9}{10}$ der in Berlin aufgenommenen Menge. Jedenfalls wird bei uns allen oberhalb einer Höhe von 3000 m die Sauerstoffzufuhr ins Blut merklich geringer.

Der Seite 318 erwähnte Elbrusbesteiger Bianchetti hatte auf dem Monte Rosa eine Alveolarspannung von 53.6 cm, war also in der Hinsicht nicht besser daran, als einige von uns, die bergkrank waren. Seine große Höhentoleranz ist demnach nicht allein durch seine Atemmechanik erklärbar.

Man könnte nun meinen, daß eine Verminderung der Sauerstoffaufnahme ins Blut um $\frac{1}{4}$ der normalen Menge, wie sie Loewy und Kolmer zeigen, oder um noch geringere Mengen, bis zu $\frac{1}{10}$ herab, wie sie bei den übrigen Mitgliedern unserer Expedition, ebenso bei Durig und Zuntz auf ihrer Expedition vom Jahre 1903 und bei Leo Zuntz vom Jahre 1896 anzunehmen sind, nicht viel besagen kann, da doch die Gewebe von dem arteriellen Sauerstoff so wenig verbrauchen, daß das ihnen entströmende venöse Blut noch reichlich Sauerstoff, im Mittel etwa $\frac{2}{3}$ des im arteriellen vorhandenen, enthält. Bei Loewy und Kolmer würde nun aber auf der Monte Rosa-Spitze das venöse Blut im Mittel nur noch wenig mehr als die Hälfte des Sauerstoffs, den es im Tieflande führt, führen, und wir dürfen nicht vergessen, daß dieses Mittel sich aus Blutanteilen zusammensetzt, die Organen entstammen, welche einen ganz verschiedenen Verbrauch an

Sauerstoff haben. Ist der Verbrauch hoch, wie das in tätigen Organen der Fall ist, so strömt das venöse Blut sehr arm an Sauerstoff ab, ist er gering, so ist es beim Ausfluß noch reich an Sauerstoff. So können leicht einzelne Organe schon Mangel an Sauerstoff leiden, während das venöse Mischblut, das zum rechten Herzen und von ihm aus in die Lungen strömt, noch Sauerstoff enthält.

Es wird uns daher auch nicht wundernehmen, daß trotz der scheinbar mäßigen Abnahme des Sauerstoffs im arteriellen Blut doch schon deutliche Zeichen von Sauerstoffmangel im Gehirn, — und das bedeuten ja die Allgemeinerscheinungen der Bergkrankheit, unter denen wir litten — vorhanden waren. Die allgemein, auch in Fachkreisen, verbreitete Ansicht von dem großen Sauerstoffüberschuß, der unseren Körpergeweben mit dem Blut zugeführt wird, dürfte doch nicht ganz zutreffend sein. Gewiß erhalten die Organe, die einen geringen Verbrauch haben, mehr Sauerstoff, als sie benötigen, aber die energisch arbeitenden und daher einen regen Stoffumsatz aufweisenden dürften nicht viel über den Bedarf erhalten. Und auch im sog. Ruhezustande unseres Körpers arbeiten ja einzelne Muskeln, wie das Herz und die Atmungsmuskeln, einzelne drüsige Organe, wie Leber und Nieren, ununterbrochen fort.

Vielleicht noch interessanter als bei Körperruhe ist das Verhalten der Sauerstoffspannung in der Lunge bei Arbeit. Hier zeigt sich an einem neuen Beispiel, wie zweckmäßig der Ablauf unserer Funktionen den jeweiligen äußeren Bedingungen sich anpaßt.

Die vorstehenden Kapitel haben gezeigt, wie sehr der Stoffumsatz und damit auch der Sauerstoffverbrauch bei Muskelarbeit ansteigen. Stundenlang kann der Verbrauch das Vierfache des Ruhewerts betragen! Würde nicht dafür gesorgt sein, daß entsprechend dem Mehrbedarf an Sauerstoff auch eine Mehrzufuhr zu den Lungen stattfindet, so würden wir sehr bald an eine Grenze kommen, wo wir infolge Mangels an Sauerstoff nicht mehr in normaler Weise Arbeit zu leisten imstande wären.

Aber mit steigender Muskelarbeit nimmt auch die Luft- und damit die Sauerstoffzufuhr zur Lunge zu. Es wurde bereits Seite 307 hervorgehoben, daß bei der Arbeit der Muskeln Stoffe gebildet werden, die als Reize auf das Atemzentrum wirken und es zu vermehrter Tätigkeit anregen. Je stärker wir arbeiten, eine um so energischere Atmung haben wir. Durch die neuen Atemreize, die nach Untersuchungen von C. Lehmann wohl als organische Säuren anzusehen sind, werden wir von demjenigen Atemreiz, der bei Körperruhe am einflußreichsten ist, von der Kohlensäure des Blutes unabhängig.

Die Wirkung dieser Reize ist nun so fein geregelt, daß der Sauerstoffgehalt der Lungenluft trotz des vermehrten Verbrauchs ebenso groß, meist sogar höher ist als in der Ruhe. Das Blut hat daher die Möglichkeit, sich unter denselben, häufig sogar unter besseren Bedingungen in der Lunge mit Sauerstoff zu sättigen als bei Körperruhe. — Das ist nicht nur bei vollem Atmosphärendruck im Tieflande der Fall, es zeigt sich ebenso auch im Höhenklima und ist in allen bisher untersuchten Höhenlagen, d. h. bis zu 4560 m Höhe, nachzuweisen gewesen.

Als Maß für die Möglichkeit, das Blut mit Sauerstoff zu sättigen, gilt auch hier die Sauerstoffspannung in den Lungenalveolen. Ihre Werte sind auf der Anhangstabelle XXVIII zugleich mit der Atemtiefe zusammengestellt.

Die Tabelle zeigt uns zunächst die enorme Wirkung der Arbeit auf die

Atemtiefe. Während bei Körperruhe mit jedem Atemzuge (vergl. Tabelle 1 dieses Kapitels) gegen $\frac{1}{2}$ l in die Lunge hinein- und bei der Ausatmung wieder herausgeschafft wird, selten nur bis gegen $\frac{3}{4}$ l, fanden wir bei Arbeit Mengen bis zu 3 l.

So gewaltig diese Atemleistungen an sich sind, mehr noch müssen wir ihre feine Anpassung an den Bedarf bewundern. Mit steigender Arbeit steigen die geatmeten Luftmengen, und zwar in solchem Verhältnis, daß die Sauerstoffspannung in den Lungenalveolen stets noch etwas höher liegt als in gleicher Höhe bei Körperruhe. Der Mehrverbrauch bei Muskelarbeit wird also durch Mehrzufuhr überkompensiert. Diese Überkompensation des Bedarfs ist in größeren Höhen erheblicher als im Flachlande. Das lehrt ein Vergleich der Tabellen XVII—XXII des Anhanges. Nur in Berlin liegt die Sauerstoffspannung in den Lungen bei Ruhe und bei Arbeit auf annähernd gleichem Niveau.

Die folgende kleine Tabelle 6 enthält einen anschaulichen knappen Auszug aus den umfangreichen Haupttabellen. Wir haben in ihr die Minimal- und Maximalwerte zusammengestellt, so daß zugleich ein Überblick über die Breite, in der die Sauerstoffspannungen in der Lunge bei Ruhe wie Arbeit schwanken, erkennbar sind.

Tabelle 6.

Vergleich der Sauerstoffspannungen in den Lungen bei Ruhe und Arbeit mit zunehmender Höhe.

Ort	Sauerstoffspannung in mm Quecksilber	
	bei Ruhe	bei Arbeit
Berlin bezw. Wien . . .	101—109	100—108
Brienz	81—94	90—100
Brienzer Rothorn . . .	62—72	74—81
Col d'Olen	57—69	64—71
Gnifetti-Hütte	54—56	57—64
Monte Rosa-Spitze . . .	38—61	55—63

Eine geringere Bedeutung in physiologischer Hinsicht kommt dem Verhalten der alveolaren Kohlensäurespannung beim Aufenthalt im Hochgebirge zu. Es würde kaum notwendig sein, darüber in ausführliche Auseinandersetzungen einzutreten, wenn sie nicht durch Mosso in den Mittelpunkt der Erklärung der Bergkrankheit gerückt worden wäre.

Die Akapnie. Mosso hat in einer großen Zahl von Publikationen und in vielfältig variierten Versuchen die Annahme zu stützen gesucht, daß der Mangel an Kohlensäure im Blute, die Akapnie, die Ursache der Bergkrankheit sei. Wir haben schon in Kapitel X diese Frage berührt und haben dort zunächst theoretisch erörtert, daß — entgegen Mossos Annahme — die Höhe an sich keinen Einfluß auf den Kohlensäuregehalt des Blutes haben kann.

Was ihn zu ändern vermag, ist allein eine Änderung der Atemmechanik. Eine Einschränkung der Atmungstätigkeit läßt ihn ansteigen, eine Verstärkung der Atmung, besonders eine mit Vertiefung der einzelnen Atemzüge einhergehende, vermindert ihn. Und

wenn im Höhenklima sich meist eine Verminderung der Menge der Blutkohlenäure und ihrer Spannung findet, so beruht dies eben darauf, daß beim Höhengaufenthalt meist eine Atmungssteigerung zu beobachten ist.

Nur in bedeutenderen Höhen kann noch unter einer anderen Bedingung die Kohlenäuremenge des Blutes sinken. Auch diese haben wir bereits im Kapitel „Blutgase“ in ihrer Bedeutung gewürdigt. In jenen Höhen nämlich, in welchen die Sauerstoffzufuhr bereits unzureichend wird, kommt es infolge des Sauerstoffmangels zu einem krankhaft veränderten Stoffwechsel, bei dem sich saure Produkte bilden. Diese verdrängen die Kohlenäure aus dem Blute zu einem größeren oder geringeren Teile. Auch hier ist also die Kohlenäurearmut des Blutes das Sekundäre, die Folge, nicht die Ursache der Bergkrankheit.

Zudem ist die Menge der Kohlenäure im Blute nicht das Maßgebende, vielmehr deren Spannung, denn diese regelt den Kohlenäuregehalt der die Nervenzellen direkt umspülenden Gewebssäure. Bei Gegenwart von sauren Substanzen im Blute wird aber nur die Menge, nicht die Spannung der Kohlenäure herabgesetzt, letztere im Gegenteil eher gesteigert.

Auf Grund dieser Überlegungen kann man eine ursächliche Bedeutung der Akapnie für die Bergkrankheit nicht zugeben und eine Betrachtung der Anhangstabellen X—XXII illustriert zahlenmäßig das Unzutreffende dieser Anschauung.

Zunächst möchten wir jedoch auf einige Versuche hinweisen, aus denen am klarsten hervorgeht, daß die Höhe an sich keine Herabsetzung der Kohlenäuremenge und -spannung im Blute hervorruft. Sie sind von Mossos Bruder Ugolino an einigen Bergsoldaten, die die Expedition im Jahre 1894 mitmachten, angestellt. Diese waren die Höhenluft gewöhnt und ihre Atmung änderte sich beim Aufstieg zur Höhe nicht wesentlich. Bei ihnen bleibt die Kohlenäurespannung der Ausatemungsluft zwischen Gressoney (1600 m) und dem Monte Rosa-Gipfel (4560 m) gänzlich unverändert.

Tabelle 7.

Kohlensäurespannung in der Expirationsluft.

Ort	Barometerdruck mm	Kohlensäurespannung in der Expirationsluft in mm Quecksilber bei		
		Jachini	Solferino	Sarteur
Gressoney	650	20.82	18.71	21.88
Gressoney	650	20.82	22.23	18.35
Alpe Indra	620	21.44	20.73	20.03
Alpe Indra	620	21.79	13.71	
Capanna Linty . .	510	18.42	18.76	19.81
Capanna Gnifetti .	480	21.26	24.35	17.49
Capanna Margherita .	430	18.63	20.51	19.64
Capanna Margherita .	430	18.29	19.00	19.30

Allerdings wurden Mossos Soldaten auf der Monte Rosa-Spitze nicht bergkrank. Aber dieser Einwand kann hier nicht erhoben werden, wo es vorerst nur darauf ankommt zu zeigen, daß mit der Höhe an sich nicht regelmäßig Verminderung der Kohlenäurespannung eintritt.

Auch wird Mossos Ansicht widerlegt durch Versuche im pneumatischen Kabinett. In der verdünnten Luft des Kabinetts blieb fast bei allen Untersuchten die Kohlenäurespannung in den Lungenbläschen so gut wie ungeändert, selbst bei Verdünnungen, die annähernd der Monte Rosa-Spitze entsprachen. Das ergibt die Zusammenstellung auf der Anhangstabelle XVI und der hier folgenden Tabelle 8. Eine erheblichere Abnahme der Kohlenäurespannung zeigt eigentlich nur N. Zuntz, zugleich mit stärkerem Ansteigen des Atemvolumens. — Die

Tabelle 8 erweist aber weiter, daß auch bei vollem Barometerdruck die Schwankungen der Kohlensäurespannung so erhebliche sein können, daß ihre niedrigsten Werte tiefer liegen als bei einem Luftdruck von 450 mm.

Tabelle 8.

Name	Barometer-	Atemtiefe	Atemgröße pro Minute	Kohlensäure-
	druck			spannung in
	mm Quecks.	cem	cem	den Lungen- alveolen mm Quecks.
L. Zuntz	{ 758	695	4862	40.07
	{ 758	625	5000	38.39
"	{ 448	953	5244	39.29
	{ 448	900	4950	36.38
Versuchsperson W. . .	{ 767	322	5483	41.37
	{ 763	307	5225	39.10
	{ 760	328	4915	36.02
"	{ 596	242	5325	48.77
	{ 597	282	5075	44.30
	{ 586	267	5607	39.30
	{ 580	228	4959	48.37
"	{ 441	293	6143	37.77
	{ 438	274	5490	38.95

Besonders sei betont, daß bei den stärksten Verdünnungen W. schon Mangel an Sauerstoff litt, denn es machte sich deutliche Benommenheit und Schlafsucht geltend!

Wenden wir uns nunmehr zurück zu den Versuchen, die sich auf den Aufenthalt im Gebirge beziehen, und betrachten wir zunächst, wie sich die Verhältnisse bei Körperruhe gestalten (Anhangstabellen X—XV).

Es ist richtig, daß in der überwiegenden Zahl der Einzelversuche eine mit der Höhe fortschreitende Abnahme der Kohlensäurespannung in der Lunge zu konstatieren ist. Eine Ausnahme macht nur Waldenburg. Bei Zuntz sinkt sie von 38.5 mm in Brienz bis 32.6 mm auf dem Rothorn und bis 27.2 mm auf dem Monte Rosa-Gipfel; bei Caspari von 46.6 bis 40.3 und 25.4 mm. Aber ein Vergleich mit dem Verhalten der Atmungsvolumina in der Tabelle 2 dieses Kapitels oder in den Anhangstabellen X—XV ergibt weiter, daß mit dem Sinken der Kohlensäurespannung ein Steigen der Atemvolumina parallel geht; je niedriger jene, um so höher diese. Bei Waldenburg ist auch das Verhalten der Atmungsgröße abweichend von den übrigen. Sie zeigt nur auf dem Col d'Olen die Andeutung einer Steigerung. Es ist nicht zweifelhaft, daß die Atmungssteigerung das Primäre, die Abnahme der Kohlensäurespannung das Sekundäre ist.

Zudem bestehen aber gar keine Beziehungen zwischen den Symptomen der Bergkrankheit und der Höhe der Kohlensäurespannung. Waldenburg z. B. war auf dem Monte Rosa erheblich krank und gerade bei ihm zeigt sich gegenüber Berlin gar keine Erniedrigung der Spannung; auch Loewy litt nicht unerblich und doch ist bei ihm die Kohlensäurespannung kaum niedriger als auf

dem Briener Rothorn. Durig fühlte kaum etwas von Bergkrankheit, und doch sinkt bei ihm die Kohlensäurespannung erheblich ab. Zuntz war auf der ersten Expedition von 1901 deutlich bergkrank, wenn auch weniger als Caspari und Müller, die niedrigere Kohlensäurespannungen hatten als er. Dabei lag damals seine Kohlensäurespannung höher als im Jahre 1903, wo Zuntz sich bei Körperruhe fast ganz normal fühlte!

So schwer es ist, vom Verhalten der Kohlensäure aus die Erscheinungen zu erklären, so leicht eröffnet sich uns das Verständnis, wenn wir nicht die Kohlensäure, sondern den Sauerstoff ins Auge fassen. Je höher die Kohlensäurespannung in den Lungen, um so niedriger das Atemvolum, um so geringer auch die Sauerstoffzufuhr. Daher bedeuten die Erscheinungen der Bergkrankheit bei hoher Kohlensäurespannung und andererseits das Wohlbefinden bei niedriger, daß im ersteren Falle eine geringe Sauerstoffzufuhr, im letzteren dagegen eine reichliche stattgefunden hat. So erst kommen wir zu einer annehmbaren Erklärung der Erscheinungen. — Allerdings darf man nicht in jedem Falle einen Parallelismus zwischen der Höhe der alveolaren Sauerstoffspannung und dem Auftreten der Bergkrankheit erwarten. Denn erstere ist wohl ein wesentlicher, jedoch nicht der allein in Betracht kommende Faktor der Sauerstoffzufuhr zu den Geweben. Von Bedeutung ist auch der Gehalt des Blutes an Hämoglobin und die Schnelligkeit des Blutumlaufes, und beide unterliegen ebenfalls individuellem Wechsel.

Wenn der Kohlensäurereiz beim Aufenthalt im Hochgebirge sich verringert, so müßte die Atmung schwächer werden. Da sie jedoch in ihrer Intensität gesteigert ist, so müssen an die Stelle der Kohlensäure andere Reize getreten sein, und die Reizsumme muß sogar die im Tieflande übertreffen. Ist dem aber so, so ist dadurch die Akapnie, die ja in allen Fällen gesteigerter Atmung besteht, im Tieflande ebenso wie im Hochgebirge gewissermaßen unschädlich gemacht. Denn es kommt ja nicht darauf an, daß das Atemzentrum gerade durch Kohlensäure gereizt wird, wenn ihm nur überhaupt ausreichende Reize zugeführt werden.

Von der Größe der neben der Kohlensäure wirksamen Reize kann man sich eine Vorstellung machen, wenn man nach dem Vorgange von v. Schrötter und Zuntz berechnet, wieviel Luft geatmet wird für jeden Millimeter Kohlensäurespannung in den Lungen. — Nehmen wir z. B. die Ruheversuche an Waldenburg in der Anhangstabelle X. Waldenburg atmete in Brienz pro Minute 4.848 l und hatte dabei eine Kohlensäurespannung in den Lungen von 44.53 mm. Dann kommen auf jeden Millimeter Kohlensäure $\frac{4.848}{44.53} = 108.9$ ccm. Die auf diese Weise berechneten Werte sind in Stab 14 der Anhangstabellen X—XVI zusammengestellt.

Die Tabellen zeigen, daß in individuell verschiedenem Grade die pro Millimeter Kohlensäurespannung geatmete Luftmenge mit der Höhe ansteigt. Bei allen Teilnehmern der Expedition von 1901 liegt sie auf dem Briener Rothorn höher als in Brienz, noch höher auf Col d'Olen, um auf der Monte Rosa-Spitze exzessiv zu werden, wobei allein Waldenburg eine Ausnahme macht. Sie steigt bis auf das Dreifache der Werte in Brienz an. So kommen z. B. bei Caspari auf 1 mm Kohlensäurespannung in Brienz 103 ccm Atemluft, auf dem Rothorn 140 ccm, auf dem Monte Rosa 333.6 ccm.

Dasselbe ist der Fall in den Versuchen an Zuntz (1903). Auch hier beträgt die pro Millimeter Kohlensäurespannung geatmete Luftmenge auf dem Col d'Olen fast das Doppelte als im Tieflande, um auf der Monte Rosa-Spitze bis gegen das Fünffache anzusteigen. Das

gleiche ergaben auch die Versuche im Luftballon, die 1902 v. Schrötter und Zuntz ausführten. Welcher Art die Reize sind, die hier der Kohlensäure zur Seite treten, wird in dem die Wirkung des Sauerstoffmangels behandelnden Kapitel XVIII ausführlich erörtert werden.

Wir haben bis jetzt die Kohlensäurespannungen bei Körperruhe betrachtet. Wir wollen an der Hand der schon benutzten Tabelle XXVIII des Anhangs noch kurz ihr Verhalten bei Muskelarbeit erörtern.

Die Dinge liegen hier prinzipiell genau so wie bei Körperruhe, nur ist zu beachten, daß, wie schon öfter betont, durch die Muskelarbeit selbst ähnlich wie in stark verdünnter Luft besondere Atemreize entstehen, die neben der Kohlensäure wirksam sind. Das sehen wir schon im Tieflande, wo die Kohlensäurespannung bei Arbeit bei uns allen, mit Ausnahme von Waldenburg, gegenüber der bei Körperruhe herabgesetzt ist, dasselbe auch an allen Punkten des Hochgebirges. Dabei ist die alveolare Kohlensäurespannung bei Muskelarbeit gegenüber der bei Körperruhe meist um so mehr erniedrigt, je höher man sich befindet.

Berechnen wir auch hier die Luftmenge, die auf 1 mm Kohlensäurespannung in den Lungen kommt, so finden wir, daß sie weit erheblicher ist als bei Körperruhe und mit zunehmender Höhe immer weiter ansteigt. Das Plus kommt auf die durch die Muskelarbeit und den Sauerstoffmangel entstehenden neuen Reize.

Die alveolare Kohlensäurespannung liegt bei Zuntz während des Bergaufmarschierens in Brienz bei 36.7 mm, auf dem Rothorn bei 28.3 mm, auf dem Monte Rosa bei 20.6 mm. Bei Caspari beträgt sie 39.0 : 32.0 : 21.5. Auf 1 mm Kohlensäurespannung kommen beim Marschieren bei letzterem: 887.8 ccm Atemluft in Brienz, 1129 ccm auf dem Rothorn, über 1900 auf dem Monte Rosa! 1903 stieg bei Zuntz das Atemvolumen pro Millimeter Kohlensäure beim Marschieren auf dem Schneefeld unter dem Monte Rosa-Gipfel sogar auf 2914 ccm.

Die Summe der das Atemzentrum treffenden Reize wächst also mit zunehmender Höhe in steigendem Maße.

Die vorstehenden Untersuchungen über das Verhalten der Sauerstoff- und Kohlensäurespannungen in den Lungenalveolen haben uns in weit exakterer Weise, als das die einfache Betrachtung der pro Minute geatmeten Luftmengen vermochte, einen Einblick gewinnen lassen in die Art und Weise und den Umfang, in dem das Atemzentrum Anregungen von dem es durchströmenden Blut aus erhält.

Wir gingen an diese Untersuchungen zur Prüfung der Frage, wie weit beginnender Sauerstoffmangel die schon vor Ausbruch deutlicher Bergkrankheitssymptome einsetzende Atemsteigerung erklären könne. Wir fanden, daß er in Höhen über 3000 m als Atemreiz wirksam werden kann. Aber zu einem sicheren Ergebnis, ob er unterhalb dieser Höhe sich schon geltend mache, vermögen unsere Versuchsergebnisse uns nicht zu führen. Daß er eine ausreichende Erklärung auch der in mittleren Höhen zur Beobachtung kommenden Effekte zu bieten vermag, soll in Kapitel XVIII dargelegt werden.

Man hat noch einen anderen Grund geltend gemacht, um die Wirkung des Höhenklimas auf die Lungenventilation nicht mit einem geringen Grade von Sauerstoffmangel in Verbindung zu bringen, das ist die Tatsache, daß die Steigerung der Atemgröße im pneumatischen Kabinett,

in dem ja die Wirkung der Luftverdünnung und damit der verminderten Sauerstoffzufuhr rein zur Geltung kommt, meist erst bei viel höherem Grade der Verdünnung einsetzt, als die, bei welchen sie im Hochgebirge zustande kommt. Sehr zahlreiche Versuche mit sauerstoffarmer Luft, die besonders Speck und Loewy ausführten, ergaben dasselbe. Erst bei viel erheblicherer Sauerstoffverarmung stiegen die Atemvolumina zu Werten an, die im Gebirge schon bei mäßiger Luftverdünnung erreicht wurden.

Man kann jedoch gegen den Vergleich der Kabinettversuche und der Atmung sauerstoffarmer Luft mit den Versuchen im Hochgebirge den Einwand erheben, wie das Aron getan hat, daß erstere nur kurze Zeit dauern, bei letzteren dagegen der Aufenthalt in der sauerstoffarmen Atmosphäre Tage und Wochen ununterbrochen anhält. Es ist sehr gut möglich, daß bei einem geringen Grade von Sauerstoffmangel erst ganz allmählich sich die Stoffe im Körper bilden, die den erregenden Effekt auf die Atmung ausüben. Der Mangel an Sauerstoff wirkt ja nicht als solcher auf das Nervensystem, vielmehr durch abnorme Produkte der Lebenstätigkeit der Zellen. Unter solchen Umständen könnten natürlich bei kurzdauernden Versuchen die Effekte nicht zur Beobachtung kommen, während sie im anderen Falle ausgeprägt sind.

Veränderungen der Atmungsform im Hochgebirge. Die scheinbar so einfache Tatsache, daß im Höhenklima das pro Minute geatmete Luftvolumen anwächst, hat uns zur genaueren Untersuchung des Atemzentrums und der in ihm wirksamen Reize geführt. Weitere Einsicht in sein Verhalten gibt uns das Studium der Atmungsform, des Atmungstypus.

Mosso war der erste, der auf Veränderungen der Atmungsform im Hochgebirge hingewiesen hat und dem wir die eingehendsten Untersuchungen über diesen Gegenstand verdanken. — Wie schon in den einleitenden Bemerkungen zu diesem Abschnitt hervorgehoben wurde, kann man durch Benutzung der graphischen Methodik erkennen, daß unsere Atmung sich nicht aus einer gleichmäßigen Folge gleichartiger Atemzüge zusammensetzt. Vielmehr wechselt die Zeit, innerhalb der die einzelnen Atemzüge aufeinanderfolgen, und deren Tiefen in allerdings geringem Maße. Stärker prägt sich der Wechsel im Schlafe aus. Hier kann man feststellen, daß insbesondere die Tiefe der Atemzüge allmählich ab- und wieder zunimmt, so daß zusammengehörige Gruppen entstehen, Perioden, die Mosso, der zuerst auf sie hingewiesen hat, zu der Bezeichnung „periodische Atmung“ veranlaßten. Mosso betont, daß bei dieser periodischen Atmung im Schlafe die Phase der Einatmung kürzer als die der Ausatmung sei, während im wachen Zustande das zeitliche Verhältnis gerade umgekehrt ist. Auch soll das Zwerchfell im Schlafe etwas erschlaffen, so daß es bei der Erweiterung des Brustraumes während der Einatmung in diesen hineingezogen wird. Diese Erscheinung ist also eine ganz normale und wird von Mosso auf eine geringere Erregbarkeit des Atemzentrums im Schlafe bezogen. Mosso spricht direkt von einem Schlafe des Atemzentrums, „sonno del centro respiratorio“.

Beim Aufenthalt im Gebirge nun kommt diese periodische Atmung gleichfalls und in viel charakteristischerer Weise als im Tieflande zur Ausbildung und zwar nicht nur im Schlafe, sondern schon im Wachen.

Mosso konnte sie bereits in Höhen unterhalb 3000 m beobachten, deutlicher in 3600 m Höhe und am intensivsten auf der Monte Rosa-Spitze in 4560 m, wo sie fast bei jedem Menschen vorhanden und so ausgesprochen ist, daß sie schon bei einfacher Betrachtung des Brustkorbes erkannt wird. Nicht bei jeder Person ist die

Form der periodischen Atmung im Höhenklima die gleiche und auch bei derselben Person wechselt sie, besonders während des Schlafes. Sie ist wohl von dessen Tiefe abhängig.

Als erste Erscheinung, die das Bild einleitet, kann man eine kurze Pause nach jeder Ausatmung erkennen. Dann sieht man, wie die Atemzüge ungleich werden; sie werden allmählich flacher, um wieder langsam bis zur ursprünglichen Tiefe anzuwachsen. Weiter werden die normalen Atemzüge von einer Reihe ganz flacher Respirationen unterbrochen, endlich können letztere in einen richtigen längeren Atemstillstand übergehen.

Für alle diese Typen gibt Mosso in seinem Buche: „Der Mensch auf den Hochalpen“, und besonders in einer neueren Schrift,¹⁴⁾ die allein der periodischen Atmung gewidmet ist, zahlreiche Beispiele in Form von Kurven.

Wir wollen vier von ihnen wiedergeben. Die erste zeigt sehr deutlich die Atempausen zwischen jedem Atemzug (Figur 3), die zweite den Übergang tiefer

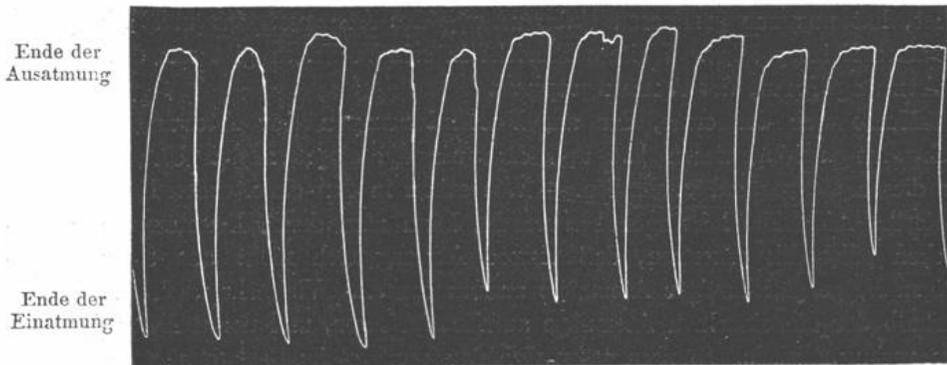


Fig. 3. Atempausen nach jeder Expiration (nach Mosso).

Atmungen in flache (Figur 4) und dieser wieder in tiefe, die dritte den Wechsel von Perioden tiefer mit solchen ganz flacher Atmung (Figur 5). Die vierte zeigt die Atmungstätigkeit des Professors Galeotti, eines Begleiters Mossos, während des Schlafes auf der Monte Rosa-Spitze (Figur 6). Verzeichnet ist hier die Brustkorb- atmung. Linie 1 gibt sie vor Beginn des Schlafes, Linie 2 bei Beginn desselben, Linie 3 während tieferen Schlafes, Linie 4 bildet die Fortsetzung von 3.

Die auf Linie 4 verzeichnete Form der periodischen Atmung ist seit $\frac{3}{4}$ Jahrhunderten bekannt. Sie wurde zuerst von zwei englischen Ärzten: Cheyne und Stokes, beschrieben und trägt deren Namen. Die Cheyne-Stokessche Atmung kommt bei einer Reihe von Krankheiten zur Beobachtung und ist meist von übler Vorbedeutung. Ihr Auftreten im Hochgebirge hat diese Vorbedeutung dagegen nicht.

Im Verlaufe seiner Studien ist Mosso nun dazu gekommen, die bei Schlafenden beobachtete periodische Atmung im Tieflande von der im Gebirge zu trennen. Er gibt an, daß man bei der periodischen Atmung im Höhenklima die im Verhältnis zur Inspiration sehr lange Expiration nicht finde, auch nicht die schon erwähnte Erschlaffung des Zwerchfells, daß dafür aber ein Symptom auftrete, das im Tieflande nicht bestehe, nämlich gleichzeitige Änderungen in der Frequenz des Herzschlages und im Blutdruck. Die Figur 5 gibt auf ihrer unteren Linie das

Verhalten der Herztätigkeit graphisch wieder. Man kann daran neben dem Wechsel in der Häufigkeit des Herzschlages besonders gut die Schwankungen des Blutdruckes erkennen. Gegen Ende der Perioden der

kleinen Atmungen sieht man die untere Linie, deren Höhe den Blutdruck anzeigt, stark ansteigen, mit dem Beginn der großen Atmungen abfallen. Die genannten Differenzen in der Art der periodischen Atmung sind für Mosso der Grund für eine ganz verschiedene Erklärung.

Die Cheyne-Stokessche Atmung, die unter pathologischen Verhältnissen einsetzt, hat eine große Zahl von Erklärungsversuchen gezeitigt. Alle stimmen in dem Punkte überein, daß eine abnorm geringe Erregbarkeit des Atemzentrums als Grundlage angenommen wird. Für die im Flachlande vorkommende Periodizität in der Schlafperiode greift auch Mosso auf eine Herabsetzung der Reizbarkeit des Atemzentrums gegen die normalen Blutreize zurück. Aber für die periodische Atmung, die im Hochgebirge auftritt, will er diese einfache Annahme nicht gelten lassen, obwohl doch hier in der verminderten Sauerstoffzufuhr ein Moment gegeben ist, das wohl geeignet wäre, das Zentrum in seiner Erregbarkeit zu

schädigen. Mosso meint, daß in Höhen von 3000 m — und hier beobachtete er ja schon die Erscheinung — ein Sauerstoffmangel nicht vorhanden sei. Wäre er die Ursache, so müßte Sauer-

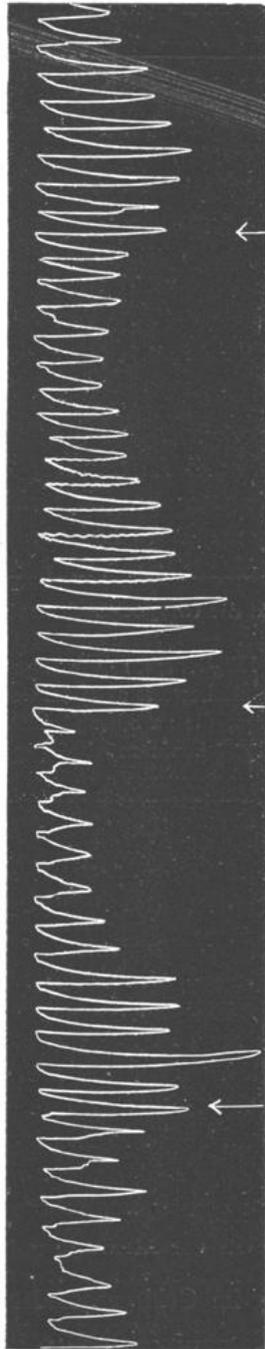


Fig. 4. Wechselseitige Atemtiefen (nach Mosso).

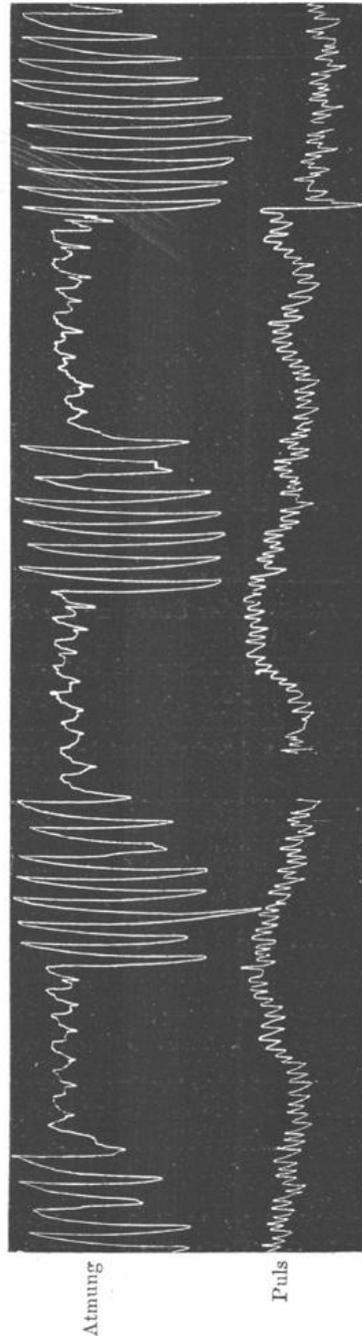


Fig. 5. Abwechselnde Perioden tiefer und flacher Atmung (nach Mosso).

stoffeinatmung günstig wirken und die Cheyne-Stokessche Atmung beseitigen. Das bestreitet Mosso, trotzdem er sich selbst an zweien seiner Begleiter von der Wirksamkeit von Sauerstoffatmungen auf Puls und Atmung auf der Monte Rosa-Spitze überzeugete. Die periodische



Fig. 6. Allmählicher Übergang der Atmung in die Cheyne-Stokessche Form (nach Mosso).

Atmung wurde allerdings bei einigen anderen Mitgliedern seiner Expedition durch Sauerstoffinhalation nicht beseitigt. Dieses negative Resultat beweist aber darum nichts, weil sehr wohl möglich ist, daß Schädigungen des Atemzentrums, die zu einer Herabsetzung der Erregbarkeit geführt haben, nicht schon durch kurzdauernde Sauerstoffzufuhr rückgängig gemacht werden können.

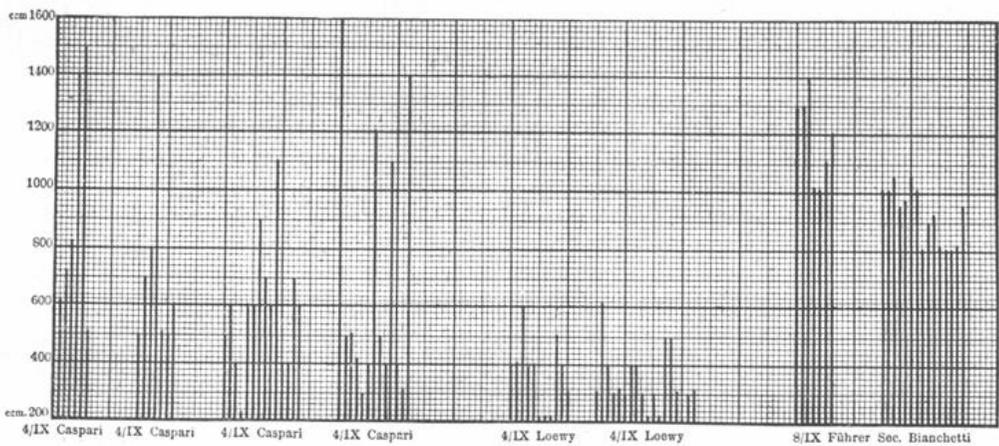


Fig. 7. Graphische Darstellung des Wechsels der Atemtiefe auf dem Monte Rosa.

Mosso führt die periodische Atmung im Gebirge auf den Mangel an Kohlensäure im Blute zurück, die S. 302 besprochene Akapnie. Einen Beweis für die Richtigkeit seiner Meinung sieht Mosso in der Tatsache, daß Einatmung von Kohlensäure die periodische Atmung zum Verschwinden bringt. Diese Tatsache schließt

aber nicht das Vorhandensein einer Schwächung des Atemzentrums aus. Wir haben bereits erörtert, daß die Kohlensäure einen starken Reiz für dasselbe abgibt und es zu energischer Tätigkeit anregt. Läßt man kohlenensäurehaltige Luft an Stelle normaler einatmen, so wird die Kohlensäure instande sein, auch ein geschwächtes Atemzentrum zu normaler Tätigkeit anzuregen. Mossos eigene Versuche beweisen sogar die verminderte Funktionsfähigkeit des Zentrums, denn, wenn er den Kohlensäurereiz so abstufte, daß er in Turin der gleiche war wie auf der Monte Rosa-Spitze, so war die Wirkung auf die Atmung in der Höhe geringer als im Tieflande. Man kann also höchstens sagen, daß im Höhenklima die Summe der das Atemzentrum treffenden Reize im Verhältnis zu seiner herabgesetzten Erregbarkeit zu gering ist, um eine normale Atmungsform hervorzubringen. Das gelingt aber durch Verstärkung dieser Reize, so z. B. durch Kohlenäureeinatmung.

Auch wir selbst sind auf der Monte Rosa-Spitze der Cheyne-Stokesschen Atmung bei uns allen begegnet. An Stelle der Kurven, die wir mit Hilfe unseres Atmungsgürtels aufnahmen, wollen wir einige Beispiele auf dem vorstehenden Diagramm zusammenstellen, das den Vorzug hat, zugleich die quantitativen Verhältnisse genau wiederzugeben. Die einzelnen senkrechten Striche bedeuten die aufeinanderfolgenden Atemzüge, ihre Tiefe zeigen die links stehenden Zahlen (ccm) an. Die Striche sind zwar in gleicher Entfernung voneinander gezeichnet, jedoch folgten sich die einzelnen Atemzüge nicht in gleichen Zeitabständen.

Man sieht wie bei Caspari und Loewy die Atemzüge stark in ihrer Tiefe wechseln, bei Caspari zwischen 300 und 1600 ccm, bei Loewy zwischen 200 und 600 ccm. Demgegenüber sind sie bei dem Bergführer Bianchetti viel gleichmäßiger, so wie man es in der Norm im Tieflande zu sehen gewöhnt ist.

Wir wollen auf Beibringung weiteren Materiales verzichten. Die Erscheinung der Cheyne-Stokesschen Atmung scheint in Höhen wie die Monte Rosa-Spitze etwas Gewöhnliches zu sein. Auch Durig und Zuntz beobachteten sie und bringen einige Zahlenbeispiele dafür.

Die Abnahme der Erregbarkeit des Atemzentrums im Hochgebirge läßt sich noch mittels einer anderen Versuchsanordnung erkennen, die wir gleichfalls Mosso verdanken, nämlich durch Bestimmung der Zeitdauer, während der man willkürlich die Atmung unterbrechen kann.

Hält man plötzlich mit der Atmung inne, so verarmt das Blut sehr schnell an Sauerstoff und sein Kohlensäuregehalt steigt rasch an. Dementsprechend wachsen also die Atemreize rapide und es kommt ein Moment, wo sie stark genug sind, den Willen zu überwinden. Dann setzt die Atmung unwillkürlich wieder ein. Die Dauer der willkürlichen Atmungssuspension ist für verschiedene Personen verschieden, für dieselbe Person annähernd gleich.

Im Hochgebirge nun erwies sie sich in Mossos Versuchen bei den meisten Personen verkürzt. Das ist erklärlich, da ja doch der Sauerstoffvorrat in der Lunge in verdünnter Luft geringer ist als in dichterem und es schneller zu Sauerstoffmangel kommen muß. Mosso verzeichnete dies Verhalten graphisch, und die beiden folgenden Kurven geben einen seiner Versuche wieder. In Abbildung 8 dauert der Atemstillstand, der besonders deutlich an der die Bewegungen der Bauchwand aufschreibenden Linie A ausgeprägt ist, 29 Sekunden, auf Abbildung 9 nur 11 Sekunden. Erstere ist in Turin, letztere auf der Monte Rosa-Spitze aufgenommen. In anderen Versuchen sank die Zeit von 28—47 Sekunden im Tieflande auf 16—20 Sekunden im Hochgebirge. Einige Personen konnten dagegen umgekehrt im Hochgebirge den Atem länger anhalten

als im Tieflande, so Galeotti. Die willkürliche Atmungsunterbrechung dauerte bei ihm in Turin nur 8 Sekunden, auf der Monte Rosa-Spitze 12—14 Sekunden. Wenn das trotz des früher einsetzenden Sauerstoffmangels geschieht, so kann die Erklärung nur darin gesehen werden, daß die Erregbarkeit des Atemzentrums gegenüber den Blutreizen gesunken ist.

Die Vitalkapazität. Im Laufe dieses Kapitels haben wir wiederholt von der Atemtiefe gesprochen, d. h. von der Luftmenge, die mit einem einzelnen Atemzuge geatmet wird. Dabei hatten wir nur die normale, vom Willen nicht beeinflusste Atmung im Auge. Man kann aber mit einem Atemzug weit mehr Luft fördern.

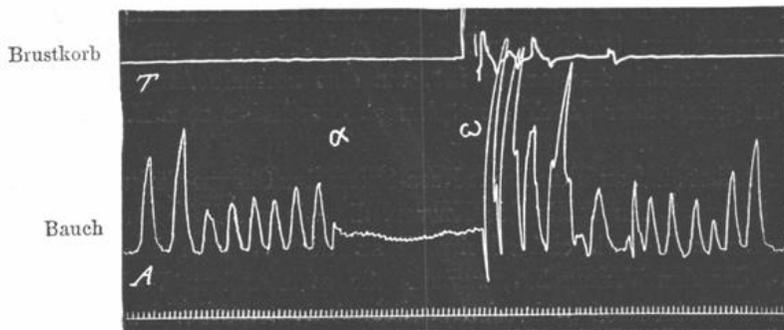


Fig. 8. Dauer der willkürlichen Atmungssuspension (α — ω) in Turin (nach Mosso).

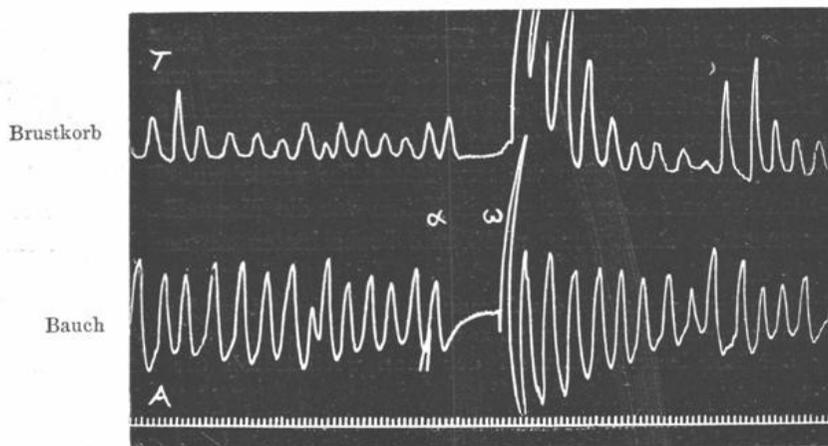


Fig. 9. Dauer der willkürlichen Atmungssuspension (α — ω) auf dem Monte Rosa (nach Mosso).

Nach beendeter ruhiger Einatmung läßt sich durch willkürliche Erweiterung des Brustkastens noch ein ganz erhebliches Luftquantum einziehen, ca. $1-1\frac{1}{4}$ l, und nach ruhiger Ausatmung auch noch $1-1\frac{1}{4}$ l Luft durch willkürliche Verkleinerung des Brustraumes auspressen. Es ergibt sich so eine Luftmenge, die man durch eine der maximalen Einatmung folgende maximale Ausatmung aus der Lunge herausbefördern kann. Auf die Bedeutung dieser Luftmenge hat zuerst der englische Arzt Hutchinson aufmerksam gemacht, und sie mit dem auch heute noch gebräuchlichen Namen Vitalkapazität belegt.

Hutchinson wies darauf hin, daß die Vitalkapazität, die sich ja leicht an der Atemgasuhr bestimmen läßt, eine physiologisch wichtige Größe ist, die mit der Körperlänge des Individuums in Beziehung steht. Einer bestimmten Körperlänge kommt eine bestimmte Vitalkapazität zu. Bei gesunden Männern mittlerer Größe beträgt sie ca. 3500 ccm, bei kleinen kann sie auf 2500 ccm sinken, bei sehr großen kann sie bis gegen 5000 ccm steigen. Ein erhebliches Zurückbleiben hinter diesen Mittelwerten deutet auf abnorme Verhältnisse hin, besonders auf eine Schwäche der Atmungsmuskulatur. Denn der Umfang der Vitalkapazität wird hauptsächlich bestimmt von der Kraft der Atemmuskeln. Dazu kommen aber weiter die Widerstände, die sich der Ausdehnung oder Verkleinerung des Brustkorbes entgegenstellen, und auch deren Abweichung von der Norm kann zu Änderungen der Vitalkapazität führen.

So hat die Vitalkapazität ein praktisch ärztliches Interesse gewonnen und wird vielfach zur Feststellung der Funktionsfähigkeit der Atmungsorgane, z. B. von den Ärzten der Lebensversicherungsgesellschaften benutzt.

Es hat sich nun gezeigt, daß beim Übergange in verdünnte Luft, sowohl beim Aufenthalt im pneumatischen Kabinett wie beim Aufstieg ins Hochgebirge, eine Änderung der Vitalkapazität eintritt (vergl. S. 86). Für die Luftverdünnung im pneumatischen Kabinett hat das zuerst v. Vivenot¹⁹⁾ gefunden. Bei ihm ist die Verminderung relativ bedeutend, sie beträgt ca. 12⁰/₀. Bei den späteren Untersuchern ist sie viel geringer; bei Schyrmunski¹⁷⁾ 3.4—5.4⁰/₀, bei J. Lazarus 7.3⁰/₀, bei v. Liebig 4.6—6.4⁰/₀, also im Durchschnitt 4—6⁰/₀.

Demgegenüber ist die Abnahme der Vitalkapazität im Hochgebirge viel bedeutender.

Schumburg und Zuntz stellten wohl als erste im Jahre 1895 Beobachtungen darüber an. Sie fanden, daß die Vitalkapazität schon in Zermatt, gegenüber Berlin, über 10⁰/₀ herabgesetzt war, um am dritten Aufenthaltstage wieder zu den Berliner Werten anzusteigen. Noch stärker, um fast 25⁰/₀, war sie gleich nach einer Besteigung des Monte Rosa-Sattels vermindert. Aber die Autoren weisen darauf hin, daß im Hochgebirge noch ein zweiter Faktor auf eine Änderung der Vitalkapazität hinwirkt, nämlich die Ermüdung. Wie sehr gerade letztere ins Gewicht fällt, geht aus dem Abfall der Vitalkapazität von 3.2 auf 2.6 l bei Schumburg und von 4.0 auf 3.2 l bei Zuntz nach ermüdendem Steigen hervor.

Gleiche Beobachtungen machten wir 1896. Bei A. Loewy war 48 Stunden nach dem Aufstieg auf den Col d'Olen kein Unterschied gegen Berlin zu finden, bei J. Loewy und Leo Zuntz betrug er 10—15⁰/₀, verschwand aber am dritten Tage. Die Abnahme war also eine vorübergehende. Bei allen dreien konnte aber wieder eine Herabsetzung durch mehrstündiges Auf- und Abklettern, und zwar wiederum vorübergehend, hervorgerufen werden.

Zahlreiche Daten haben auch wir auf unserer letzten Expedition gesammelt. Sie zeigen dasselbe: vorübergehende Abnahme der Vitalkapazität nach dem Aufstieg zur Höhe, mehr noch nach anstrengenden Märschen und ein allmähliches Wiederansteigen. Von ihrer Wiedergabe im einzelnen wollen wir absehen, da sie Neues nicht bieten.

Da im Hochgebirge zwei Faktoren, Luftverdünnung und Ermüdung, beim Abfall der Vitalkapazität eine ursächliche Rolle spielen, kann uns die Tatsache,

daß er hier bedeutender als im pneumatischen Kabinett ist, nicht wundernehmen. Das wesentlichere Moment ist dabei jedenfalls die Ermüdung. Es ist verständlich, daß ermüdete und damit weniger leistungsfähige Atmungsmuskeln den Brustkorb weniger ausgiebig erweitern und verengern werden, als nicht ermüdete.

Aus welchem Grunde aber die Luftverdünnung als solche zu einer Abnahme der Vitalkapazität führt, darüber ist in Kapitel III genügend gesprochen worden. Es wurde dort ausgeführt, daß die Ausdehnung der Darmgase in der verdünnten Luft als das wirksame Moment anzusehen ist.

Als Gesamtergebnis dieses Kapitels können wir die Tatsache einer erregenden Wirkung des Höhenklimas auf den Atmungsvorgang betrachten. Für ihre Erklärung bedeutsam ist es, daß sie sich bei Körperarbeit in stärkerem Maße geltend macht und in geringeren Höhenlagen deutlich wird als bei Körperruhe. — Das Zentralorgan der Atmung gerät in Höhen über 3000 m leicht in einen Zustand verminderter Lebensenergie, seine Erregbarkeit nimmt ab, und es treten eigentümliche Atmungsformen auf, wie sie ähnlich im Tiefland nur bei manchen schweren Erkrankungen zur Beobachtung gelangen. — Auch für das Verständnis der individuellen Disposition zur Bergkrankheit erwies sich die Untersuchung der Atemmechanik als wichtig, insofern sie uns über den einen wesentlichen Faktor für die Sauerstoffversorgung der Gewebe, nämlich über den Sauerstoffvorrat in den Lungenbläschen und die Breite seiner individuellen Schwankungen, Aufklärungen brachte.

Literatur.

- ¹⁾ A. Aggazzotti: *Laborat. scient. internat. du Mont Rosa*. Turin 1904.
- ²⁾ E. Aron: *Festschrift für F. Lazarus*. Berlin 1899.
- ³⁾ A. Durig und N. Zuntz: *Laborat. scient. internat. du Mont Rosa*. Turin 1904 und *Archiv für Anatomie und Physiologie. Physiol. Abteilung* 1904.
- ^{3a)} Einthoven: *Wirkung der Bronchialmuskeln*. *Pflügers Archiv*. Bd. 51. S. 367.
- ⁴⁾ J. Geppert und N. Zuntz: *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*. Bd. 42.
- ⁵⁾ A. Jaquet und J. Stähelin: *Archiv für experiment. Pathol. und Pharmakol.* Bd. 46.
- ⁶⁾ A. Jaquet: „Über die physiologische Wirkung des Höhenklimas“. Basel 1904.
- ^{6a)} J. Lazarus: *Reflexe auf die Bronchiallumina*. *Archiv für Physiologie*. 1891.
- ⁷⁾ A. Loewy, J. Loewy und Leo Zuntz: *Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol.* Bd. 66.
- ⁸⁾ A. Loewy: *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*. Bd. 58.
- ⁹⁾ A. Loewy und F. Müller: *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*. Bd. 103.
- ¹⁰⁾ Marcet: *Proceedings of the royal soc. of London* XXVIII.
- ¹¹⁾ Mermod: *Bull. de la soc. vaudoise des scienc. natur.* XV.
- ¹²⁾ A. Mosso: „Der Mensch auf den Hochalpen“. Leipzig 1899.
- ¹³⁾ Derselbe: *Archiv für Physiologie. Supplement* 1886.
- ¹⁴⁾ Derselbe: „La respirazione periodica“. Turin 1905.
- ¹⁵⁾ Panum: *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*. Bd. 1.
- ¹⁶⁾ v. Schrötter und N. Zuntz: *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*. Bd. 103.
- ¹⁷⁾ Schumburg und Zuntz: *Ebenda*. Bd. 63.
- ^{17a)} Schyrmunski: *Über den Einfluß der verdünnten Luft usw.* *Dissert.* Berlin 1877.
- ¹⁸⁾ Veraguth: „Le climat de la haute Engadine“. Paris 1887.
- ¹⁹⁾ v. Vivenot: „Wirkungen der verdichteten Luft“. Erlangen 1868.

