

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Höhenklima und Bergwanderungen in ihrer Wirkung auf den Menschen

Zuntz, Nathan

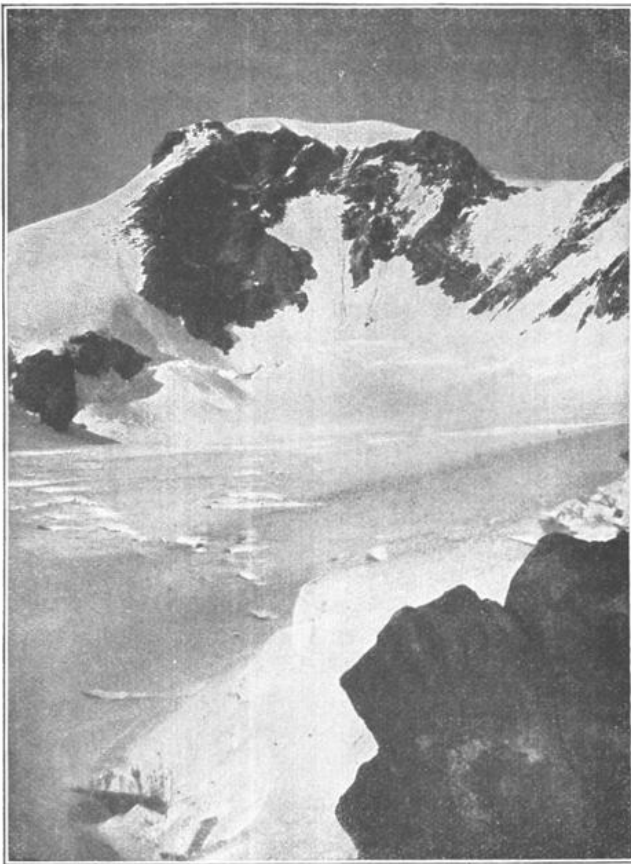
Berlin, 1906

Kapitel X. Die Blutgase unter der Einwirkung der Höhenluft

Kapitel X.

Die Blutgase unter der Einwirkung der Höhenluft.

Wer von einem etwas allgemeineren, naturphilosophischen Gesichtspunkte die in Kapitel VI besprochenen Veränderungen des Blutes im Höhenklima betrachtet, wird vielleicht sagen, daß sie uns nicht überraschen können, da sie ja



Parrotspitze von der Gnifetti-Hütte aus gesehen.

nur einen Einzelfall des großen, überall sich geltend machenden Gesetzes Darwins von der zweckmäßigen Anpassung unserer Funktionen an die äußeren Lebensbedingungen darstellen.

Wie solche Anpassungserscheinungen gerade auf physiologischem Gebiete sich vollziehen, wie sehr ihr Zustandekommen die Grundbedingung für den Fortbestand des Lebens unter wechselnden äußeren Verhältnissen ist, hat Pflüger⁹⁾ in einer gedankenreichen Abhandlung: „Die teleologische Mechanik in der lebendigen Natur“ auseinandergesetzt. — In welcher Beziehung die Zunahme an Blutfarbstoff im Höhenklima eine zweckmäßige Anpassung darstellt, soll im folgenden des näheren entwickelt werden.

Zu diesem Behufe wird es erforderlich sein, die

Rolle der Blutkörperchen als Sauerstoffträger und im Anschluß daran das Verhalten der Gase im Blute überhaupt etwas eingehender zu erörtern. — Diese Erörterung erscheint uns um so notwendiger, als wir auch in Fachkreisen zuweilen noch einer mißverständlichen Auffassung der hier obwaltenden Verhältnisse begegnen.

Die Gesetze der Aufnahme von Gasen in Flüssigkeiten. Als Grundlage aller Betrachtung über die Blutgase müssen wir die physikalischen Beziehungen zwischen Gasen und Flüssigkeiten betrachten. — Henry hat gelehrt, daß jede Flüssigkeit in Berührung mit jedem beliebigen Gase eine gewisse Masse desselben aufnimmt (absorbiert). Die aufgenommene Menge hängt ab von der Natur des Gases und der Flüssigkeit und ist, wenn diese gegeben sind, der Dichte des in Frage stehenden Gases proportional. — Die Dichte eines Gases messen wir durch den Druck, den es auf die Wandungen des Gefäßes, in dem es sich befindet, ausübt, resp. durch die Höhe, bis zu welcher es die Quecksilbersäule des Barometers emporhebt.

Wollen wir in dieser Weise die Dichte des Sauerstoffes in der Atmosphäre ermitteln, so haben wir uns zu erinnern, daß letztere ein Gemisch mehrerer Gase darstellt. In diesem macht der Sauerstoff ca. 21% aus. Wenn daher der Luftdruck, wie am Meeresniveau, 760 mm Quecksilber beträgt, so ist der Druck des Sauerstoffes in dieser Atmosphäre $\frac{21}{100}$ davon, das sind 160 mm Quecksilberdruck.

In Wirklichkeit ist der Sauerstoffdruck aber noch etwas niedriger, da die Luft stets Wasserdampf enthält, der sich am Zustandekommen des Gesamtdruckes beteiligt. Die Menge des Wasserdampfes läßt sich mit Hilfe des in Kapitel II beschriebenen Psychrometers genau feststellen und daraus sein Druck berechnen. Wenn er in unserem Beispiel 10 mm betrüge, so würde der Sauerstoffdruck nun $\frac{21}{100}$ von 750 mm betragen, d. h. 157 mm Quecksilber. Dieser so bestimmte Anteil eines Gases am Gesamtdruck eines Gasgemisches wird als Partiardruck bezeichnet. — Ihm proportional erfolgt die Aufnahme des Gases in eine Flüssigkeit.

Die absolute Menge des von einer Flüssigkeit aufgenommenen Gases läßt sich berechnen, wenn man außer dem Partiardruck den sog. Absorptionskoeffizienten kennt. Dieser sagt uns, wieviel Kubikzentimeter auf 0° reduzierten Gases 1 ccm Flüssigkeit bei 760 mm Druck aufnimmt. Er muß für jedes einzelne Gas und jede Flüssigkeit durch besondere Versuche festgestellt werden.

Der Absorptionskoeffizient ist ferner von der Temperatur abhängig, mit deren Wachsen er abzunehmen pflegt. — Für die wichtigsten Gase und Flüssigkeiten hat Robert Bunsen³⁾ die Absorptionskoeffizienten bestimmt; spätere Untersucher haben seine Angaben vervollständigt und in manchen Einzelheiten berichtigt.

Wir glauben, die in Betracht kommenden Vorgänge werden durch die von Clausius⁴⁾ auf Grund seiner mechanischen Wärmetheorie entwickelten Anschauungen dem Verständnis nähergebracht. Wir möchten sie deshalb etwas eingehender an der Hand der Clausiusschen Anschauungen erörtern. — Nach Clausius ist der Aggregatzustand der Materie bedingt durch die Intensität der Bewegung der Massenteilchen — Moleküle — im Verhältnis zur Stärke der Anziehung, welche sie aufeinander ausüben. Was wir Wärme nennen, ist nichts anderes als der Bewegungszustand der Moleküle, jede Zufuhr von Wärme steigert die Bewegung. Der absolute Nullpunkt der Temperatur, der von den Physikern auf -273° C. geschätzt wird, ist der Zustand vollkommener Bewegungslosigkeit der Moleküle. — Durch fortschreitende Wärmezufuhr läßt sich jeder Körper aus dem festen Zustande in den flüssigen und weiter in den gasförmigen umwandeln. Letzterer ist derjenige

Zustand der Materie, in welchem die Geschwindigkeit der Bewegung der einzelnen Moleküle so groß ist, daß ihre gegenseitige Anziehung die Bewegung nicht mehr merklich hemmt.

Infolgedessen erfüllen die Gase jeden ihnen gebotenen Raum gleichmäßig und üben auf alle Wände desselben einen gleichen Druck aus. Diesen Druck können wir uns bedingt denken durch die Stöße, welche die einzelnen Moleküle gegen die Wände ausüben.

Wenn Gasmoleküle bei ihren Bewegungen auf die Oberfläche einer Flüssigkeit anprallen, so müssen sie vermöge der ihnen innewohnenden großen Geschwindigkeit die Flüssigkeitsmoleküle auseinanderdrängen und so zwischen sie eintreten. Sie werden ihre Bewegung innerhalb der Flüssigkeit fortsetzen, aber entsprechend der engeren Aneinanderlagerung der Flüssigkeitsmoleküle entsprechend langsamer vorwärtskommen.

Wie langsam das Fortschreiten der in die Oberfläche einer Flüssigkeitsmasse eingedrungenen Gasteilchen vor sich geht, mögen einige von Hüfner⁶⁾ berechnete Zahlenangaben erläutern. Danach wären 336 Tage erforderlich, damit 1 ccm Sauerstoff beim Druck einer Atmosphäre in eine Wassersäule von 1 qcm Querschnitt eintritt. Dabei sind die am weitesten vorgedrungenen Sauerstoffteilchen nur bis zu 5.44 m Tiefe gelangt. Für das Eindringen von 8 ccm Sauerstoff werden schon 60 Jahre erforderlich sein, und die von den am weitesten eingedrungenen Molekülen erreichte Tiefe würde 380 m ausmachen.

Außerordentlich beschleunigen läßt sich der Vorgang der Absorption von Gasen in Flüssigkeiten dadurch, daß man Flüssigkeit und Gas heftig miteinander schüttelt. Hierdurch kommen immer neue Flüssigkeitsteilchen mit dem Gase in Berührung, so daß wenige Minuten ausreichen, um die Gasmenge in die Flüssigkeit eintreten zu lassen, die unter den gegebenen Bedingungen überhaupt aufnehmbar ist. Es tritt dann ein scheinbar stabiler Zustand ein, der aber nur so zu verstehen ist, daß in der Zeiteinheit genau gleichviel Gasteilchen ein- und austreten.

Die Zahl der eintretenden Teilchen muß der die Oberfläche der Flüssigkeit treffenden Anzahl entsprechen, letztere aber ist proportional der Dichte des in Frage kommenden Gases, d. h. dem zuvor definierten Partiardruck desselben. Der Gehalt der Flüssigkeit an Gas hängt aber neben diesem Moment noch von der Dauer des Aufenthaltes der eingetretenen Moleküle in der Flüssigkeit ab. Diese Aufenthaltsdauer muß ihrerseits um so größer sein, je stärker die Anziehung zwischen Flüssigkeits- und Gasteilchen ist. Als Maß dieser Anziehung kann der schon genannte Absorptionskoeffizient dienen. Die Absorptionskoeffizienten sind für die verschiedenen Gase beim Wasser, das uns zunächst interessiert, sehr verschieden. So werden bei Körpertemperatur von 1 ccm Wasser aufgenommen:

an Stickstoff: 0.0125 ccm; an Sauerstoff: 0.024 ccm; an Kohlensäure: 0.56 ccm.

In salzhaltigem Wasser oder in Wasser, welches wie das Blut größere Mengen eiweißartiger Stoffe enthält, sind die Absorptionskoeffizienten niedriger als in reinem Wasser, d. h. es wird unter sonst gleichen Bedingungen weniger Gas absorbiert.

Anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn in der Flüssigkeit Stoffe gelöst sind, die eine chemische Verwandtschaft zu den eintretenden Gasen haben. Dann gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder ist die Verwandtschaft so stark, daß die einmal hergestellte Verbindung zwischen dem gelösten Körper und dem Gas bei der bestehenden Temperatur nur durch chemische Einwirkung wieder getrennt werden kann. Es wird dann soviel Gas chemisch gebunden, daß die im Wasser

gelöste Substanz vollkommen damit gesättigt wird. Außerdem absorbiert noch die Flüssigkeit soviel Gas, wie dem Absorptionskoeffizienten und dem Partiardruck des Gases entspricht. Mit anderen Worten: Die aufgenommene Gasmenge besteht aus einem vom Druck unabhängigen (chemisch gebundenen) und einem mit dem Druck wechselnden (physikalisch absorbierten) Anteil.

Es gibt nun aber einen zweiten Fall, und dieser ist beim Blute verwirklicht. Die gelösten Substanzen haben zwar auch eine chemische Verwandtschaft zum Gase, aber sie ist so gering, daß die entstandene Verbindung sich von selbst wieder zersetzt. Man bezeichnet einen derartigen Vorgang als Dissoziation und ihr unterworfenen Verbindungen als dissoziabile. — Solche Verbindungen können nur bestehen bleiben, wenn dauernd ebensoviel Gasmoleküle zugeführt, wie durch die Dissoziation abgespalten werden.

Die Größe der Abspaltung aber wächst mit der Intensität der Bewegung in den Molekülen, d. h. mit der Temperatur. Je höher also die Temperatur, um so schneller zerfällt die Verbindung, um so mehr Gasmoleküle müssen in der Flüssigkeit zum Ersatz bereit sein, wenn der Zerfall ausgeglichen werden soll. — Die Menge der Gasmoleküle in der Flüssigkeit hängt nun, wie früher erwähnt, von der Menge der die Oberfläche der Flüssigkeit treffenden Moleküle des fraglichen Gases ab, d. h. von dem Partiardruck des letzteren. Dieser muß daher, wenn die dissoziabile Verbindung bestehen soll, mit der Temperatur wachsen.

Eine derartige dissoziabile Verbindung geht der Sauerstoff mit dem Hämoglobin der roten Blutzellen, die Kohlensäure mit verschiedenen Bestandteilen des Blutes ein.

Aufnahme und Bindung des Sauerstoffes im Blute. Wenden wir uns zunächst zu der Verbindung des Hämoglobins mit dem Sauerstoff, dem sog. Oxyhämoglobin. Dasselbe ist, wie Donders gezeigt hat, unter 0° C. eine stabile chemische Verbindung. Dieser stabile Zustand hat natürlich für das Leben keine Bedeutung, da selbst der Kaltblüter im Winterschlaf nicht bis zur Gefrier-temperatur abgekühlt ist. Oberhalb 0° wird die Verbindung eine dissoziabile.

Im stabilen Zustande bindet 1 Mol. Hämoglobin (= 14133 g) 1 Mol. Sauerstoff (= 32 g). Das macht pro Gramm Hämoglobin 2.26 mg Sauerstoff = 1.34 ccm Sauerstoff gemessen bei 0° und 760 mm. *) — Erwärmt man eine solche stabile Oxyhämoglobinlösung über 0° C., so beginnt sie sich zu zersetzen, und wenn man den frei gewordenen Sauerstoff aus der Lösung entfernt, so schreitet die Dissoziation bis zur vollständigen Zersetzung des Oxyhämoglobins fort. Die Entfernung des Sauerstoffes aus der Flüssigkeit geschieht dadurch, daß man die Flüssigkeit in einen Raum bringt, den man dauernd frei von Sauerstoff erhält. Das kann entweder dadurch geschehen, daß man ein beliebiges fremdes Gas hindurchleitet oder daß man den Raum mit Hilfe einer kräftigen Luftpumpe gasfrei hält. Letzteres Verfahren wenden wir an, um den im Blut enthaltenen Sauerstoff

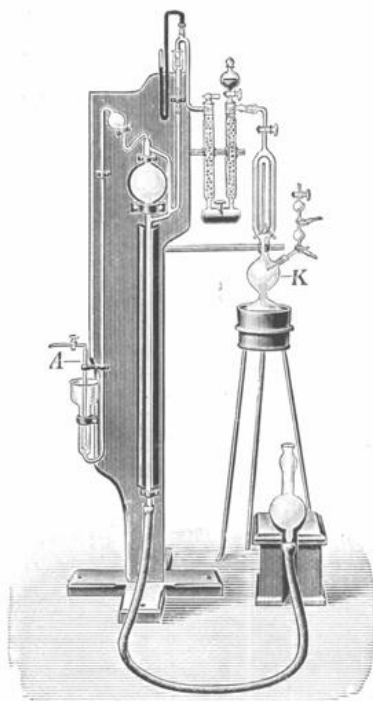
*) Gegen diese Auffassung sind in jüngster Zeit Bedenken erhoben worden (Bohr). Für unsere weiteren Ausführungen sind sie, selbst wenn sie sich als berechtigt erweisen sollten, ohne Belang.

quantitativ zu bestimmen. Man bringt das zu analysierende Blut in einen großen Glaskolben, den man vorher mittels einer Quecksilberpumpe luftleer gemacht hat. Nebstehende Abbildung zeigt die Anordnung des Apparates. Sobald das Blut in den luftleeren Ballon *K* eintritt, entweichen unter heftigem Schäumen die Gase aus ihm (neben Sauerstoff reichlich Kohlensäure und wenig Stickstoff). Man treibt sie in das links in der Abbildung sichtbare Gassammelrohr *A* und bestimmt ihre Menge und Natur nach bekannten chemischen Methoden. — Man überzeugt sich bei diesem Auspumpen des Blutes leicht, daß die Gase um so schneller entweichen, je höher die Temperatur des Blutkolbens gehalten wird.

Bringt man eine Oxyhämoglobinlösung mit einem Sauerstoff enthaltenden Gasraume in Berührung, so wird der Effekt der Dissoziation beschränkt, um so mehr, je höher der Sauerstoffgehalt des Raumes, d. h. je höher der Partiardruck des Sauerstoffes ist. Für den durch Dissoziation abgespaltenen tritt neuer Sauerstoff an das Hämoglobin heran. Je reicher der Raum an Sauerstoff ist, d. h. je höher dessen Partiardruck, desto schneller wird jedes sauerstofffreie Hämoglobinmolekül wieder zu Oxyhämoglobin regeneriert, desto näher kommt also die Lösung dem Sauerstoffgehalt der stabilen Verbindung, natürlich ohne ihn je vollkommen erreichen zu können.

Die Beziehungen zwischen dem Sauerstoffgehalt des Bluthämoglobins und dem Sauerstoffdruck in einem mit ihm in Berührung stehenden Luftraum sind vielfältig untersucht worden. Von diesen Untersuchungen interessieren uns nur die bei der Temperatur des menschlichen Körpers ausgeführten. Sie haben ergeben, daß in Berührung mit einer reinen Sauerstoffatmosphäre der Blutfarbstoff über 99% des in der stabilen Verbindung enthaltenen Sauerstoffes aufnimmt. In Be-

rührung mit atmosphärischer Luft von 760 mm Druck, in welcher der Partiardruck des Sauerstoffes nur noch 150 mm^{*)} beträgt, ist diese Menge nur noch 88%, d. h. 1.18 ccm Sauerstoff auf 1 g Hämoglobin. Das ist also die höchste Sauerstoffmenge, welche das Hämoglobin aus unserer Atmosphäre faktisch aufnehmen kann. — Wir wollen deshalb diese Zahl als Ausgangspunkt nehmen und mit ihr die Sauerstoffmengen vergleichen, welche das Hämoglobin bei niedrigerem Partiardruck zu binden vermag. Der Bequemlichkeit halber werden wir diese Zahlen in Prozentsen der bei 150 mm Druck gebundenen Menge

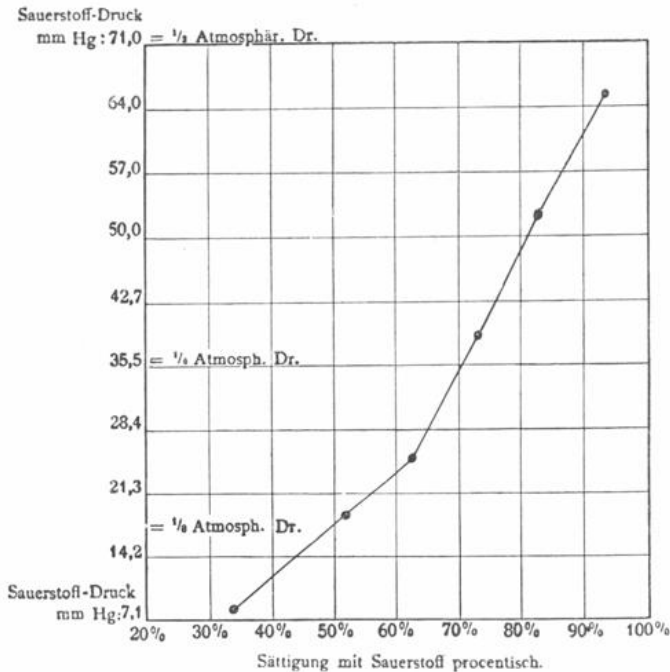


Blutgaspumpe.

^{*)} Von dem Totaldrucke = 760 mm sind als Spannung des Wasserdampfes bei 37° C. 47 mm abzuziehen. Von dem restierenden Druck = 713 mm kommen 21% = 150 mm auf den Sauerstoff.

ausdrücken. Das Nähere ergibt das beistehende Diagramm, dessen Horizontale die eben definierte procentische Sättigung des Hämoglobins, dessen Senkrechte den zugehörigen Sauerstoffdruck angibt.

Aus dem Diagramm geht hervor, daß zunächst der Sauerstoffgehalt des Hämoglobins sehr langsam abnimmt. Bei einem Sauerstoffdruck von 71 mm Quecksilber, d. h. bei dem halben Druck unserer Atmosphäre werden noch über 92% derjenigen Menge aufgenommen, die bei vollem Atmosphärendruck aufnehmbar sind. Mit sinkendem Sauerstoffdruck wird dann die Sauerstoffabgabe des Hämoglobins immer umfänglicher. Bei 35,5 mm Sauerstoffdruck = $\frac{1}{4}$ Atmosphärendruck



Graphische Darstellung der Beziehung von Sauerstoffdruck zu Sauerstoffsättigung im Blute.

beträgt die Menge nicht mehr ganz 70% und bei $\frac{1}{8}$ Atmosphärendruck nur noch etwas mehr als 50%. —

Der Hämoglobingehalt des menschlichen Blutes wechselt zwar in recht weiten Grenzen, doch können wir als Mittel für Gesunde 14 g Hämoglobin auf 100 ccm Blut annehmen. Diese werden, dem eben Gesagten zufolge, $14 \times 1,18 = 16,5$ ccm Sauerstoff aufnehmen können. Zu dieser Menge käme nun noch die entsprechend dem Absorptionskoeffizienten im Blute gelöste. Dieselbe ist um etwa $\frac{1}{10}$ geringer als die vom gleichen Volum Wasser aufgenommene (Bohr) und beträgt etwa 0,4 ccm.

Bei $\frac{1}{2}$ Atmosphärendruck würden danach 100 ccm Blut noch $0,92 \times 16,5 + \frac{1}{2} 0,4$ ccm = 15,4 ccm, bei $\frac{1}{4}$ Atmosphärendruck noch 11,6 ccm enthalten.

Beim ersten Betrachten dieser Zahlen könnte es scheinen, daß die Bindung

des Sauerstoffes bei $\frac{1}{4}$, ja auch noch bei $\frac{1}{8}$ Atmosphäre eine so reichliche sei, daß ein Mangel an Sauerstoff nicht entstehen könne. Denn selbst bei $\frac{1}{8}$ Atmosphäre = 95 mm Barometerdruck ist immer noch die Hälfte des normalen Sauerstoffgehaltes am Hämoglobin vorhanden. Wir wissen nun durch mannigfache Versuche, daß während eines Blutumlaufes in den Geweben unseres Körpers nicht die Hälfte der in den Schlagadern vorhandenen Sauerstoffmenge verbraucht wird, sondern weniger.

Im Mittel enthalten 100 ccm des aus den Geweben abströmenden venösen Blutes 10.4 ccm Sauerstoff. Es werden also, da das zu den Geweben strömende arterielle Blut, wie vorstehend berechnet, 16.9 ccm enthält, 6.5 ccm während eines Kreislaufes verbraucht. Sonach müßte, wenn die Schlagadern selbst nur die Hälfte der unter normalen Verhältnissen in ihnen enthaltenen Sauerstoffmenge führten, immer noch etwas unbenutzt übrigbleiben. Und trotzdem treten schon beim Aufenthalt zwischen $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{3}$ Atmosphärendruck das Leben bedrohende Erscheinungen auf und schon weit oberhalb $\frac{1}{2}$ Atmosphäre machen sich bei vielen Menschen Beschwerden geltend, die auf mangelhafte Sauerstoffzufuhr — wie sich später zeigen wird — bezogen werden müssen.

Diesen scheinbaren Widerspruch konnte man sich früher nicht erklären. Wir kennen heute die Lösung des Rätsels. An einer späteren Stelle wird auf die hier in Betracht kommenden Verhältnisse näher eingegangen werden.

Hier sei zum Verständnis folgendes erwähnt. Für die Sauerstoffaufnahme in unser Blut kommt es nur indirekt auf den Sauerstoffgehalt in der uns umgebenden Atmosphäre an. Denn unser Blut tritt ja auf seinem Wege vom rechten zum linken Herzen gar nicht mit dieser in Berührung, vielmehr mit der Luft, die sich in den Lungenbläschen befindet. Diese Luft ist weit ärmer an Sauerstoff als die Atmosphäre. Sie enthält unter normalen Verhältnissen nur gegen 15 % Sauerstoff, so daß der Sauerstoffdruck in den Lungen nur noch 15 % von 713 mm beträgt, das sind etwa 105 mm Quecksilber. Dadurch ist eine Verminderung der Sauerstoffaufnahme seitens des Hämoglobins bedingt; aber diese ist eine so minimale, daß sie praktisch nicht ins Gewicht fällt. Bindet ja selbst bei 71 mm Sauerstoffdruck das Hämoglobin immer noch, wie erwähnt, über 92 % der bei normalem Atmosphärendruck aufnehmbaren Sauerstoffmenge. Beim Aufenthalt in verdünnter Luft sinkt die Menge und damit der Druck des Sauerstoffs in der Lunge schnell auf niedrige Werte herab. Dabei finden sich jedoch erhebliche individuelle Unterschiede, so daß bei gleicher Luftverdünnung der Sauerstoffdruck in den Lungen bei dem einen viel niedriger liegen kann als bei einem anderen.

Das bedeutet aber, daß bei gleichem atmosphärischen Druck die Sauerstoffmenge, die das Hämoglobin an sich ketten kann, eine ganz verschiedene sein muß. Bei dem einen kann vielmehr Sauerstoff aufgenommen werden als bei einem zweiten! — Je mehr Sauerstoff aber ins Blut gelangt, um so größer ist der Widerstand gegen die Folgen der Luftverdünnung, um so mehr wird der Eintritt der als Bergkrankheit bekannten Beschwerden hinausgeschoben. — Wir haben also hiermit einen der Faktoren, die die individuell verschiedene Widerstandskraft gegen die Wirkungen der dünnen Luft erklären.

Über die Ursachen der individuellen Differenzen des Sauerstoffdrucks in den Lungen wird im Kapitel Atmungsmechanik eingehender berichtet werden.

Auch wir sechs, die wir uns für unsere Untersuchungen verbündet hatten, zeigen schon erhebliche Unterschiede des in den Lungen vorhandenen Sauerstoffdruckes bei gleicher Höhe, d. h. also in gleichem äußeren Luftdrucke.

Die nachstehende kleine Tabelle gibt die in Betracht kommenden Werte und zeigt zugleich, wie groß die Unterschiede des Sauerstoffdruckes in den Lungen und in der umgebenden Luft sind.

Sauerstoffdruck in der Lunge in verschiedener Höhe.

Ort	Höhe m	Barometer- druck mm Quecks.	Sauerstoff- druck der Luft mm Quecks.	Sauerstoffdruck in d. Lungenbläschen mm Quecks. bei:					
				Waldenburg	Kolmer	Caspari	Müller	Loewy	Zuntz
Berlin	54	758	157	105.7	101.0		105.0	103.4	104.0
Brienz	500	715	148	84.5	94.0	80.7	88.5	86.7	91.8
Brienzer Rothorn .	2130	585	121	68.5	66.6	64.3	62.0	66.7	71.9
Col d'Olen	2900	525	110	57.1			60.7	68.1	68.7
Monte Rosa-Spitze	4560	425	89		46.0	49.0	61.0	37.7	57.0

Während der Sauerstoffdruck der Luft auf dem Brienzer Rothorn in 2130 m Höhe 121 mm beträgt, liegt er in den Lungen nur noch zwischen 62 mm als niedrigstem Wert bei Müller und 72 mm als höchstem bei Zuntz. Auf Col d'Olen ist der Druck des Luftsauerstoffes 110 mm Quecksilber, der in der Lunge 57 bis 69 mm, und auf der Monte Rosa-Spitze schwankt letzterer zwischen 37.7 mm als Minimum (bei Loewy) und 61 mm als Maximum (bei Müller), während der Sauerstoffdruck der Atmosphäre noch 89 mm ausmacht.

Selbst auf der Monte Rosa-Spitze, auf der der Luftdruck längst noch nicht $\frac{1}{2}$ Atmosphäre beträgt, vielmehr annähernd noch $\frac{3}{5}$, hätte der Blutfarbstoff, wenn man einfach den herrschenden Luftdruck in Betracht zieht, noch ca. 92 % derjenigen Sauerstoffmenge aufnehmen müssen, welche er bei vollem Atmosphärendruck aufnehmen konnte. Das zeigt ein Blick auf das vorstehende Diagramm. In Wahrheit dagegen war die Möglichkeit der Sauerstoffaufnahme wesentlich geringer; denn entsprechend dem in der Lunge herrschenden Sauerstoffdruck konnte Loewy z. B. mit 37.7 mm Sauerstoffdruck nur 72 %, Kolmer mit 46 mm etwa 78 % des normalen Sauerstoffquantums im Blute binden. — Müller allerdings vermochte (bei 61 mm Sauerstoffspannung in den Lungen) sein Blut noch zu 90 % zu sättigen. —

Nachdem früher schon Untersuchungen über den Sauerstoffgehalt des Blutes bei Hunden, die sich in verdünnter Luft befanden, ausgeführt waren (Paul Bert,¹⁾ Fränkel und Geppert^{4a)}, aber zu differenten Ergebnissen geführt hatten, sind in den letzten Jahren Versuche an Hunden und Kaninchen über die Sauerstoffmenge im Blute beim Aufenthalte im Hochgebirge selbst ausgeführt worden. Sie stammen von Mosso und seinem Schüler Marro⁸⁾ und ergeben, daß beim Aufenthalt auf der Monte Rosa-Spitze die Abnahme des Blutsauerstoffes nachweisbar ist und den nach unserer Curve zu erwartenden Werten entspricht. Mossos Versuche zeigen aber weiter, daß die verminderte Aufnahme maskiert werden kann. — Bei

etwas längerem Aufenthalte fand Mosso sie nämlich gleich der im Tieflande. Das erklärt sich aus den im Kapitel VI besprochenen Regulationsvorgängen. Allmählich nimmt die Hämoglobinmenge beim Höhengaufenthalt zu, und damit muß die vom Blut aufnehmbare Sauerstoffmenge wachsen. Die von einem Kubikzentimeter Blut gebundene Sauerstoffmenge kann schließlich gleich der im Tieflande werden, während sie, auf gleiche Blutfarbstoffmengen bezogen, oben natürlich geringer bleibt als unten.

Nach den oben angeführten Zahlen und Auseinandersetzungen hätte man erwarten sollen, daß wir alle auf der Monte Rosa-Spitze noch frei von Beschwerden des Sauerstoffmangels gewesen wären. Denn bei keinem von uns führte das arterielle Blut so wenig Sauerstoff, daß er dem Verbrauch seitens der Gewebe nicht mehr genügt hätte, vielmehr mußte sogar das aus den Geweben in die Venen übertretende Blut noch Sauerstoff enthalten. Tatsächlich hatten wir aber alle mehr oder weniger ausgesprochene Krankheitserscheinungen, die, wie später ausführlich begründet werden soll, auf Sauerstoffmangel bezogen werden müssen. Dieser scheinbare Widerspruch erklärt sich, wenn man bedenkt, daß der mittlere Sauerstoffgehalt des Venenblutes aus einer Mischung von sauerstoffreicheren und sauerstoffärmeren Anteilen resultiert, die den verschiedenen Organen des Körpers entstammen. Es kann also sehr wohl in einzelnen Organen schon Sauerstoffmangel bestehen, wenn das Venenblut in seiner mittleren Zusammensetzung noch erhebliche Sauerstoffmengen enthält. Sicher nachgewiesen ist, daß das aus tätigen Muskeln ausströmende Blut erheblich sauerstoffärmer als der Durchschnitt ist, und daß bei einigermaßen angestrenzter Muskeltätigkeit sogar das gesamte Venenblut in seinem Sauerstoffgehalt erheblich reduziert wird. (Alexander Schmidt, Zuntz-Hagemann.)

Die vorstehend entwickelten Anschauungen stützen sich auf Untersuchungen von Paul Bert¹⁾, mehreren Schülern Pflügers, Loewy und Zuntz²⁾ und Chr. Bohr³⁾. Ihnen scheinen die Ergebnisse zahlreicher Versuchsreihen von Hüfner^{4a)} zu widerstreiten. Hüfner fand eine viel geringere Dissoziation des Oxyhämoglobins, so daß in seinen Versuchen selbst bei einem Sauerstoffdruck von nur 25 mm entsprechend 119 mm Barometerdruck das Hämoglobin noch zu 91% gesättigt war, und selbst noch bei 10 mm Sauerstoffdruck 80% Sauerstoff gebunden hielt.

Hieraus schloß Hüfner, daß auch auf den höchsten Berggipfeln der Erde und in den höchsten bis jetzt mit dem Luftballon erreichten Höhen es nicht die ungenügende Sauerstoffbindung ans Hämoglobin sein könne, welche das Leben bedrohe. — So kam Hüfner zu der Annahme, daß bei starken Luftverdünnungen der Sauerstoffmangel daher rühre, daß der Sauerstoff nicht schnell genug durch die Lungenwandung in das Blut übertreten könne. — Zum Verständnis der Vorgänge beim Übertritt von Gasen aus der Lunge ins Blut sei daran erinnert, daß der Luftraum der Lungenbläschen von den Blutkapillaren durch die Wand eben dieser Kapillaren und eine sie deckende zarte Zellschicht getrennt ist. Diese Scheidewand hat im ganzen eine Dicke von etwa 0.004 mm und wird durch ein wasserdurchtränktes Gewebe gebildet. Hüfner hat nun die Geschwindigkeit des Durchtritts von Gasen durch derartige wässerige Schichten untersucht. Er fand in Bestätigung älterer Befunde, daß sie dem Partiardruck des fraglichen Gases proportional geht. Bei aus reinem Wasser bestehender Scheidewand würde nach seinen Bestimmungen eine Partiardruckdifferenz von wenigen Millimetern ausreichen, um den erforderlichen Sauerstoff ins Blut zu schaffen. Hüfner nahm aber an, daß die Lungenkapillarwand, da sie ja neben Wasser noch feste Bestandteile enthält, dem Gasdurchtritt einen größeren Widerstand, den er auf das Zehnfache schätzt, biete. Wäre diese Annahme richtig, so würde in der Tat schon auf der Monte Rosa-Höhe der Sauerstoffdruck in der Lunge unzureichend werden,

dem Blute eine ausreichende Sauerstoffmenge zuzuführen. — Loewy und Zuntz konnten aber durch direkte Versuche an Froschlungen zeigen, daß das Lungengewebe dem Gasdurchtritt sogar einen noch geringeren Widerstand entgegengesetzt als reines Wasser.

Die Gasdiffusion durch die Lunge kommt also zur Erklärung der unzureichenden Sauerstoffversorgung des Blutes im Hochgebirge kaum in Betracht. — Andererseits ist heute auch genügend klargelegt, weshalb Hüfner die Dissoziation des Oxyhämoglobins soviel geringer als die obengenannten übrigen Autoren fand. Hüfner benutzte nämlich aus dem Blute rein dargestellten kristallisierten Blutfarbstoff. Die Reindarstellung führt aber zu einer Änderung seiner Eigenschaften, speziell seines Verhaltens zum Sauerstoff. Schon der Austritt des Oxyhämoglobins aus den Blutzellen führt zu einer Zunahme der Festigkeit seiner Sauerstoffbindung.

Das Verhalten der Kohlensäure und der Alkaleszenz des Blutes im Höhenklima. Eine gleich wichtige Rolle wie der Blutsauerstoff spielt die im Blute enthaltene Kohlensäure. Auch sie ist in ihm nicht nur physikalisch gelöst, vielmehr ebenso wie der Sauerstoff zugleich in lockerer, leicht trennbarer, also dissoziabler Verbindung enthalten. Während aber der Sauerstoff allein vom Hämoglobin gebunden wird, haftet die Kohlensäure an mehreren Blutbestandteilen: an dem Natron des Blutes in Form von kohlensaurem Natron, an Eiweißalkaliverbindungen der Blutflüssigkeit, an Eiweißstoffen der Blutzellen, und auch das Hämoglobin vermag Kohlensäure zu binden. Ihre Menge — ermittelt mit Hilfe der vorher beschriebenen Pumpe — beträgt im Blute der Schlagadern ca. 30 ccm in 100 ccm Blut, in den Blutadern ca. 35 ccm. Sie verhält sich umgekehrt wie der Sauerstoff, der in den Venen in geringerer Menge enthalten ist als in den Arterien. Beim Durchgange durch die Lunge verliert das Blut einen Teil seiner Kohlensäure; diese tritt durch die Wand der Blutkapillaren der Lunge hindurch in die Lungenbläschen und wird mit der Expirationsluft nach außen entleert. Dabei zeigt sich, daß der Umfang der Atmung, und besonders die Tiefe der Atemzüge von großer Bedeutung für die Menge der aus dem Blute abdunstenden Kohlensäure ist; je umfänglicher die Atmung, um so mehr Kohlensäure wird vom Blute abgegeben, um so mehr verarmt dasselbe an Kohlensäure. — Nun ist aber die Blutkohlensäure bei Körperruhe der wesentlichste Reiz für die der Atmung vorstehenden Nervenzellen und reguliert so durch Beeinflussung der Atmung selbst ihre Fortschaffung aus dem Körper. Durch viele, schnell hintereinander ausgeführte tiefe Atemzüge kann das Blut soviel Kohlensäure verlieren, daß die noch vorhandene nicht mehr ausreicht, die nervösen Zentralorgane der Atmung — die sog. Atemzentren — zur Tätigkeit anzuregen. Dann steht die Atmung für mehr oder weniger lange Zeit still (Apnoë). Es ist das eine Beobachtung, die jeder leicht an sich selbst machen kann.

Während für die Menge des Blutsauerstoffes sich eine gesetzmäßige Abhängigkeit vom Luftdruck ergeben hat, nämlich eine Abnahme mit sinkendem Luftdruck, kann ein solcher Zusammenhang für die Kohlensäure des im Körper kreisenden Blutes nicht bestehen.

Wir haben vorstehend eingehend erörtert, daß für die Absorption eines Gases in einer Flüssigkeit nur der Partiardruck des betreffenden Gases bestimmend ist. Nun aber hängt der Partiardruck der Kohlensäure in der Lungenluft allein von der ihr aus dem Blute zugeführten Kohlensäuremenge ab, da der Kohlensäuregehalt der eingeatmeten Luft (0.03 %) so gering ist, daß er keine Rolle spielen kann. — Es wird

daher der Kohlensäuredruck in den Lungenbläschen um so geringer sein, je größer die Luftmenge ist, auf welche die in den Lungen abgegebene Kohlensäure sich verteilt. Diese Luftmenge aber ist bedingt durch die Intensität der Atmung. Je mehr Luft ein- und ausgeatmet wird, um so niedriger muß die Kohlensäurespannung in den Lungenbläschen sein und, mit ihr sich ausgleichend, der Kohlensäuregehalt des Blutes.

Eine direkte Beziehung zwischen Barometerdruck und Kohlensäuredruck in den Lungen besteht also nicht. Findet man im Hochgebirge den Kohlensäuredruck in den Lungen erniedrigt, so geschieht dies, weil und soweit andere Momente die Atmung verstärken.

Solange die Bildung der Kohlensäure in den Geweben konstant bleibt, steigt und fällt, dem Kohlensäuredruck in den Lungen entsprechend, nach dem, was wir früher über dissoziabile Verbindungen gesagt haben, auch die Menge der Kohlensäure im Blute. Sie ist jedoch außerdem noch abhängig von der Menge der im Blute befindlichen, die Kohlensäure bindenden Substanzen, wie die Sauerstoffmenge von der Hämoglobinnmenge abhängig ist.

Die Menge dieser Substanzen läßt sich einigermaßen durch Ermittlung des Säurebindungsvermögens des Blutes feststellen.

Dieses Säurebindungsvermögen prüft man mit Hilfe von sog. Farbstoffindikatoren. Benutzt man für solche Untersuchungen den ältesten und bekanntesten Indikator, das Lackmus, das durch Stoffe, die sauren Charakter haben, rot, durch Stoffe, die den Charakter von Laugen (Alkalien, Basen) haben, blau gefärbt wird, so findet man, daß Blut das Lackmus bläut. Blut hat also den Charakter einer Base. Den Grad der Basizität oder der Alkaleszenz, wie man sagt, kann man nach dem Vorgange von Zuntz und Loewy prüfen, wenn man feststellt, wieviel Säure einem bestimmten Quantum Blut hinzugefügt werden muß, um die alkalische Reaktion gerade aufzuheben, d. h. um blaues Lackmuspapier gerade schwach zu röten.

Für 100 ccm normalen Blutes ist zur Aufhebung der alkalischen Reaktion eine Säuremenge notwendig, die 350—450 mg Ätznatron entspricht. Das ist also der Alkaleszenzgrad des normalen Blutes.

Nun hat Galeotti⁵⁾ gelegentlich der letzten Expedition Mossos auf den Monte Rosa am Blut von Hunden, Kaninchen, Affen und Menschen Bestimmungen des Alkaleszenzgrades zunächst in Turin, dann in der Margherita-Hütte, in 4560 m Höhe, ausgeführt und gefunden, daß die Blutalkaleszenz oben um 36—47 ‰ geringer war als unten.

Dieser Befund ist sehr wichtig. Er beweist, daß irgendwelche sauren Substanzen im Blute kreisen, die einen Teil des vorhandenen Alkalis mit Beschlag belegt, neutralisiert hatten.

Treten solche sauren Substanzen im Blut auf, so ist das immer ein Zeichen krankhafter Vorgänge, die sich im Körper abspielen. Diese Stoffe entstehen nicht im Blute selbst, werden vielmehr unter pathologischen Bedingungen in den Organen des Körpers erzeugt und treten aus ihnen ins Blut über. Hier verbinden sie sich mit einem Teil des vorhandenen Alkalis unter Verdrängung der Kohlensäure, die zuvor an diesem Alkali haftete. Die Kohlensäure wird frei, geht in die Lungen über und wird mit der Atmung aus dem Körper ausgeschieden.

Das Blut muß also an Kohlensäure verarmen.

Durch eine große Zahl von Untersuchungen ist dargetan worden, daß das Auftreten saurer Substanzen im Blute imstande ist, fast die gesamte Kohlensäure aus dem Blute auszutreiben und das Blut unfähig zu machen, Kohlensäure aufzunehmen. Bringt man Kaninchen dünne Säurelösungen in den Magen, oder spritzt sie Hunden in die Blutgefäße ein, so enthält danach das arterielle Blut anstatt seiner 30 % Kohlensäure unter Umständen nur noch 3—5 %. Dieser geringe Kohlensäuregehalt ist stets das Symptom einer schweren Erkrankung, die mit einer Reihe typischer Krankheitserscheinungen einhergeht und als Säurevergiftung bezeichnet wird. — Aber nicht nur Säuren selbst, sondern auch viele andere Gifte führen zu den Erscheinungen der Säurevergiftung. So Phosphor, Arsen, verschiedene Metalle, wie Eisen, Antimon u. a.

Ebenso wie bei der Einwirkung dieser Gifte bildet unser Körper bei einigen sog. Stoffwechselkrankheiten saure Stoffe, und es entwickelt sich dann das Bild der Säurevergiftung mit ihren bedrohlichen Erscheinungen.

Daß sehr hochgradiger Sauerstoffmangel eine krankhafte Säurebildung hervorruft, ist in Versuchen an Tieren schon vor längerer Zeit gezeigt worden. Es gelang sogar, die Säuren, die durch die Nieren aus dem Blut ausgeschieden wurden, im Harn direkt nachzuweisen. Es ergab sich, daß es sich um eine organische Säure, und zwar Milchsäure, handelte. Die Entdeckung Galeottis zeigt, daß es gar keines übermäßig hohen Sauerstoffmangels bedarf, um eine mäßige Säurevergiftung entstehen zu lassen.

Ihr Zustandekommen erklärt sich folgendermaßen. Beginnt der den Körperzellen zur Verfügung stehende Sauerstoff nicht mehr zur normalen Durchführung der Verbrennungsprozesse im Körper auszureichen, so kann das in Zerfall geratende Material nicht vollkommen verbrannt werden. Wie in einem schlecht ziehenden Ofen das Brennmaterial nicht bis zu seinen Endprodukten verbrannt wird, vielmehr abnorme, komplizierter zusammengesetzte, brenzliche Stoffe entstehen, so ist es auch in unserem Körper. Es bilden sich bei Sauerstoffmangel Substanzen, die nicht vollkommen verbrannt sind, Zwischenprodukte, die bei normaler Verbrennung weiter zerstört werden, hier aber bestehen bleiben und vor ihrer Ausscheidung aus dem Körper im Blute kreisen.

Wir sind schon auf eine Reihe chemischer Befunde eingegangen, die einen direkten Hinweis auf Störungen des Stoffumsatzes in über 4000 m Höhe geben und die die Schlüsse, welche wir aus der verminderten Blutalkaleszenz auf den Stoffwechsel gezogen haben, in schöner Weise zu stützen geeignet sind.

Die Alkaleszenzverminderung des Blutes, die Galeotti auf der Spitze des Monte Rosa gefunden hat, muß, wie erwähnt, mit einer Abnahme des Kohlensäuregehaltes des Blutes einhergehen. Mosso und sein Schüler Marro⁸⁾ haben an Hunden diese Tatsache direkt festgestellt. Sie bestimmten die Blutkohlensäuremenge zuerst in Turin, sodann auf der Monte Rosa-Spitze und fanden in der Tat eine, wenn auch nicht sehr erhebliche Herabsetzung in der Höhe.

Es ist nicht sicher zu sagen, wie weit ihr Ergebnis auf der Sauerstoff-

armut der Höhenluft beruht, und wie weit es auf eine auf dem Monte Rosa gesteigerte Atmung, die, wie Kapitel XI zeigen wird, meist zur Beobachtung kommt, zu beziehen ist. Denn daß verstärkte Atmung allein schon imstande ist, die Kohlensäure aus dem Blute auszutreiben, ist ja bereits erörtert worden.

Wir sehen also, daß im Hochgebirge aus zwei Gründen die Kohlensäure des Blutes vermindert sein kann, einerseits infolge der verstärkten Atmung, die bei fast allen an den Aufenthalt im Hochgebirge nicht gewöhnten Personen sich ausbildet, andererseits als Symptom der Säurebildung, die sich allmählich einstellt.

Das Verhalten der Kohlensäure des Blutes im Hochgebirge hat in den letzten Jahren zu lebhaften Diskussionen Anlaß gegeben. Mosso^{8a)} hat angenommen und durch Versuche zu begründen gesucht, daß die Höhe an sich Einfluß auf den Kohlensäuregehalt des Blutes habe. Er sollte sich mit zunehmender Höhe vermindern. Mosso hat die Beschwerden, die im Höhenklima einsetzen, mit dem Mangel an Kohlensäure im Blute in Zusammenhang gebracht und durch ihn zu erklären versucht. Er bezeichnet den Zustand abnorm geringen Kohlensäuregehaltes des Blutes als Akapnie (von *καπνος*, der Rauch = Verbrennungsprodukt, also eigentlich Rauchlosigkeit) und sieht in ihr die Ursache der Bergkrankheit.

Die Mossosche Lehre hat in alpinistischen Kreisen viel Verbreitung gefunden. Es sind jedoch erhebliche Bedenken gegen ihre Richtigkeit und gegen die Stützen, die Mosso ihr zu verleihen gesucht hat, geäußert worden, und auch wir müssen uns diesen Bedenken anschließen.

Richtig ist nur die Tatsache, daß im Hochgebirge häufig eine Kohlensäureverminderung im Blute vorhanden ist. Aber einerseits besteht, wie schon hervorgehoben wurde, keine direkte Beziehung zwischen der Höhe und dem Kohlensäuregehalt des Blutes, andererseits ist ein ursächlicher Zusammenhang zwischen dem Mangel an Kohlensäure und den Symptomen der Bergkrankheit von Mosso nicht erwiesen. Wir werden im Kapitel XI vielmehr an Beispielen zeigen können, daß er nicht vorhanden ist.

Da wir in den späteren Kapiteln noch häufig auf die Akapnie zu sprechen kommen, mag dieser Hinweis zunächst genügen. —

Wenn wir auf das zurückblicken, was uns die Untersuchungen des Blutes im Höhenklima gelehrt haben, so müssen wir gestehen, daß die gewonnenen Ergebnisse weit über den engen Rahmen dessen hinausreichen, was derartige Untersuchungen erwarten lassen können. Wir haben zunächst an einem Beispiel, so klar und durchsichtig, wie man es unter den komplizierten Verhältnissen des lebendigen Organismus sehr selten findet, feststellen können, auf welche Weise sich unser Körper zu helfen weiß, um ihn bedrohenden Schädigungen mit Erfolg zu begegnen. Wir sahen weiter, wie das Blut gewissermaßen einen Spiegel für krankhafte Veränderungen, die an den Lebensvorgängen der Körperzellen ablaufen, darstellt. Sein Verhalten weist uns auf weitere Forschungen über die Natur dieser Änderungen hin und gibt uns eine bestimmte Richtschnur für unser Vorgehen.

So sind die Untersuchungen des Blutes im Höhenklima der Ausgangspunkt für bedeutsame Erweiterungen unserer allgemeinen physiologischen Auffassungen geworden.

Literatur.

- 1) P. Bert: „La pression barométrique.“ Paris 1878.
2) Chr. Bohr: Zentralblatt für Physiologie. XVII. 1904.
3) R. Bunsen: „Gasometrische Methoden.“ Braunschweig 1877.
4) Clausius: „Gesammelte Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie.“ Braunschweig 1867.
4a) Fränkel u. Geppert: „Über die Wirkungen der verdünnten Luft auf den Organismus.“ Berlin, Hirschwald.
5) Galeotti: „Laboratoire scient. international du Mont Rosa. Travaux de l'année 1903.“ Turin 1904. S. 1.
6) Hüfner: Archiv f. Anatomie u. Physiologie. Physiol. Abteilung 1897.
6a) Hüfner: ebenda 1891.
7) Loewy u. Zuntz: Archiv f. Anatomie u. Physiologie. Physiol. Abteilung 1904.
8) A. Mosso u. G. Marro: Arch. ital. de biologie XLI. S. 357.
8a) A. Mosso: Der Mensch auf den Hochalpen. Leipzig 1899.
9) E. Pflüger: Pflügers Arch. f. d. gesamte Physiol. Bd. XV. S. 57.
-