XX.

Aus dem Pharmakologischen Institut der Universität Tübingen.

14. Zur näheren Begründung des mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung im Höhenklima und der aus demselben sich ergebenden theoretischen und praktischen Folgerungen¹⁾.

Von

Prof. Dr. C. Jacobj.

(Mit 4 Textfiguren und Tafel II.)

Einleitung.

Nachdem in der Mitte des 17. Jahrhunderts Toricelli das Barometer erfunden, Pascal, Perrier, sowie Boyle mittels des Barometers gezeigt hatten, daß mit der Höhe über dem Meere der Luftdruck in gesetzmäßiger Weise abnimmt, und Otto von Guericke die mechanische Wirkung des Luftdruckes demonstriert hatte, haben mit Beginn der Entwicklung des Bergsportes im 18. und 19. Jahrhundert Forscher wie Albrecht v. Haller und Saussure, Alexander v. Humboldt und andere begreiflicherweise den mechanischen Einfluß des mit zunehmender Höhe sich vermindernenden Luftdruckes zur Erklärung der nachteiligen Wirkungen, welche das Höhenklima auf den menschlichen Organismus auszuüben vermag, herangezogen.

Man stellte sich das Zustandekommen dieser Wirkungen so vor, daß mit dem Absinken des Luftdruckes vornehmlich die Blutzirkulation eine Veränderung erfahre und zwar derart, daß in den dem Druck der Luft am unmittelbarsten ausgesetzten Oberflächen des Körpers, z. B. in der Haut, den Schleimhäuten der Nase, des Rachens, sowie in den Lungen es zu einer Ansammlung von Blut in den Gefäßen komme, weil unter Fortfall eines Teiles des normalerweise auf den-

1) Hinsichtlich der den Gegenstand betreffenden umfangreichen Literatur darf wohl auf die angeführten eingehenden Publikationen von Kronecker, Zuntz, Cohnheim, sowie auf die neueste Arbeit von Bürker verwiesen werden.

selben lastenden Druckes diese sich stärker ausdehnen und füllen könnten, ja müßten. Es ließen sich damit auch die in großen Höhen nicht selten beobachteten Blutungen aus Lunge und Nase, sowie die Rötung des Gesichts und verschiedene andere in Einklang mit einer solchen veränderten Blutverteilung stehende Erscheinungen erklären. An der Richtigkeit dieser Auffassung zweifelte deshalb zunächst niemand, wenschon man für größere Höhen auch den Einfluß des sich in der Atmung geltend machenden Luftmangels als wirksamen Faktor selbstverständlich mit in Betracht zog.

Als man dann aber später die Bedeutung des Blutfarbstoffes, d. h. des Oxyhämoglobins für die innere Atmung der Gewebe und den gesamten Ablauf des Stoffwechsels im Organismus näher kennen gelernt und Hufner durch seine grundlegenden Arbeiten die Beziehungen zwischen Sauerstoffpartialdruck und Oxyhämoglobindissoziation klargestellt und gezeigt hatte, daß beim Absinken des Sauerstoffpartialdruckes und also auch beim Absinken des Luftdruckes unter die Hälfte der Norm die Bindungsfähigkeit des Hämoglobins für Sauerstoff entsprechend der von ihm gegebenen Kurve zuerst zwar wenig, dann aber immer schneller abnimmt, war es nun naheliegend, die gerade in sehr großen Höhen von über 5000 m, d. h. bei einem Luftdruck von unter 400 mm Hg fast regelmäßig auftretenden erheblichen Störungen der Funktionen des Organismus vornehmlich auf die hier sich geltend machende unvollkommene Sauerstoffversorgung, die gestörte innere Atmung und den damit abnorm verlaufenden Stoffwechsel zurückzuführen.

Man gelangte dann aber allmählich immer mehr zu der Auffassung, daß auch schon in geringeren Höhen es vornehmlich dieser Faktor sei, welcher die verschiedenen von der Norm abweichenden Lebenserscheinungen, d. h. die Symptome der auch im Höhenklima unserer Alpen auftretenden Höhenkrankheit bedinge. Mit der Zeit wurde dies auch für Höhen unter 3000 m angenommen. Man berechnete, daß eine unvollständige Sättigung des Hämoglobins mit Sauerstoff infolge des unter Mitwirkung der Kohlensäure in den Alveolen über die Hälfte herabgesetzten Sauerstoffpartialdruckes dem Hufnerschen Dissoziationsgesetz entsprechend auch hier noch erfolge¹⁾. Ja man

1) Es beträgt bei 3000 m Höhe der Luftdruck bei 10° C etwa 525 mm Hg, mithin der O-Partialdruck in der Atmosphäre 110 mm Hg und also bei einem Gehalt der Alveolenluft von 4—6% COO und 12—16% O₂ in den Alveolen etwa 63—84 mm Hg, wobei ein Herabgehen der Bindungsfähigkeit des Hbg nach Krogh*) um $2\frac{1}{2}$ — $1\frac{1}{2}$ % unter die Norm sich ergeben würde.

*) Krogh, Skandinavisches Arch. f. Physiol. 1904, Bd. 16, S. 630.

glaubte schließlich, daß eine solche Insuffizienz der Atmung unter Berücksichtigung der Gasdruckverhältnisse in den Alveolen, zumal eben auch im Hinblick auf die gleichzeitig dort in Betracht zu ziehende Kohlensäure bereits in noch geringeren Höhen, z. B. solchen von 1800 und 1500 m in Frage komme und gelangte so zu der Vorstellung, daß dieser Faktor auch schon in den therapeutisch verwerteten modernen klimatischen Höhenkurorten wie Davos, Arosa und im Engadin, ja selbst im subalpinen Klima, wenn auch nicht subjektiv wahrnehmbar, so doch in physiologisch bedeutsamer Weise sich geltend zu machen Gelegenheit finde. Diese letztere Auffassung erhielt vor allem auch durch die immer wieder bestätigte Beobachtung eine Stütze, daß wie beim Aufstieg in größere Höhen, so auch schon beim Übergang aus dem Tiefland in Gegenden mit geringerer Erhebung über dem Meere eine vermehrte Blutbildung stattfindet, deren Auftreten man als kompensatorischen Regulationsvorgang gegenüber der ungenügenden Sauerstoffversorgung infolge des herabgesetzten Partialdruckes des Sauerstoffes in der Atmosphäre auffassen zu sollen glaubte. So entstand schließlich auch in ärztlichen Kreisen die sich allgemein verbreitende Ansicht, daß es die mit dem Absinken des Luftdruckes und Sauerstoffpartialdruckes eintretende Verarmung des Organismus an Sauerstoff auch leichtester Grade im Grunde genommen sei, auf welcher die spezifischen Wirkungen der Luftdruckerniedrigung im Höhenklima überhaupt beruhen, und daß der Sauerstoffmangel der Luft demnach auch für die Heilerfolge, die man in den Höhenkurorten verzeichnete als die eigentliche Ursache angesehen werden müsse, während der mechanischen Wirkung der Luftdruckerniedrigung eine nennenswerte therapeutische Bedeutung nicht zukomme.

In der nachdrücklichsten Weise haben diesen Standpunkt Zuntz und seine Mitarbeiter in dem bekannten großen Werke »Höhenklima und Bergwanderungen« 1906 zum Ausdruck gebracht und durch zahlreiche Versuchsreihen zu begründen gesucht.

Sie sprechen sich S. 85 des genannten Werkes dahin aus, daß die mechanische Wirkung der Luftdruckerniedrigung in neuerer Zeit meist nicht mehr hoch eingeschätzt werde, da man sich sage, daß

Bei 1800 m (Schatzalp) beträgt aber der O-Partialdruck in den Alveolen entsprechend berechnet 73—98 mm Hg, mithin käme hier eine Bindungsverminderung von nur $1\frac{1}{4}\%$ in Betracht, und bei 1500 m (Davos) würde eine verminderte Sauerstoffbindung gegenüber der Norm nur noch bei einem Gehalt der Alveolenluft von 12% O mit $1\frac{1}{4}\%$ vorliegen, während bei 16% O₂ Gehalt der Alveolenluft überhaupt eine nennenswerte Verminderung nicht mehr in Frage käme.

der Luftdruck allseitig wirkend, keine mechanische Wirkung ausüben könne, jedenfalls grobe derartige Wirkungen, wie man sie früher annahm, nicht mehr ernstlich diskutierbar seien. Sie sagen:

»Früher dachte man, die Luftverdünnung bei Übergang in die höheren Regionen der Atmosphäre wirke ähnlich wie Schröpfköpfe oder Verdünnung der Luft in einem Metallzylinder, welcher ein Glied luftdicht einschließt. Blutungen der Schleimhäute im Hochgebirge und mehr noch bei Ballonfahrten hat man auf solche mechanische Einwirkungen, auf ein Ansaugen des Blutes nach der Haut und den Lungen beziehen wollen. Man beachtete dabei nicht genügend, daß die Änderungen des Luftdruckes alle inneren und äußeren Oberflächen des Körpers gleichmäßig treffen. So wenig wie die Flüssigkeit in einem Manometer den Stand ändert, wenn man über beiden Schenkeln die Luft verdünnt oder komprimiert, so wenig ändert sich der Druck, mit welchem das Blut in unsere Haut- oder Lungengefäße eintritt, wenn gleichzeitig alle inneren und äußeren Oberflächen des Körpers einer Änderung des Luftdruckes ausgesetzt werden«.

Auf S. 356 heißt es weiter, indem auf die Auffassungen Hallers und Saussures noch einmal hingewiesen wird:

»Die Unrichtigkeit dieser Anschauungen haben wir bereits dargetan. Es widerspricht den physikalischen Gesetzen, daß, wenn der gesamte Körper sich in verdünnter Luft befindet, also alle Organe und speziell alle Abschnitte des Zirkulationssystems ihrer Wirkung unterliegen, Änderungen der Blutverteilung zustande kommen sollten. Wäre das der Fall, dann müßten doch die Erweiterungen der Gefäße der Haut und der frei liegenden Schleimhäute, sowie die Blutungen aus ihnen besonders da zur Beobachtung kommen, wo die Luftverdünnung erheblich weiter getrieben wurde und viel plötzlich geschah als bei Aufstiegen im Gebirge, nämlich bei Ballonfahrten und beim Aufenthalt im pneumatischen Kabinet«.

Bei diesen letzten Darlegungen ist aber offenbar nicht genügend berücksichtigt, daß, auch wenn nachweislich eine Herabsetzung des Luftdruckes an sich eine Erweiterung der oberflächlichen Gefäße zur Folge hätte, dennoch dieser Effekt zunächst nicht ohne weiteres in Erscheinung zu treten braucht, da eine weitgehende nervöse Regulation der Gefäße dem normalen Organismus die Möglichkeit bietet, einer solchen Gefäßerweiterung und abnormen Blutverteilung entgegenzuwirken und sie in ihrem störenden Einflusse zu kompensieren. Eine Gefäßerweiterung mit ihren Folgen wird deshalb nicht ohne weiteres in Versuchen, wie sie Zuntz im Auge hat, in Erscheinung treten müssen. Sie wird fehlen, solange die Regulation normal funktioniert. Dies ist aber zu erwarten, wenn die Druckänderung nur kürzere Zeit anhält und sich nicht gar zu akut vollzieht.

Hinsichtlich der Versuche von Waldenburg und Barlett mit Ein-

atmung verdünnter Luft aus einem Zylinder, welche von Kronecker¹⁾ zum Beweise dafür herangezogen wurden, daß eine Blutstauung im Lungenkreislauf bei Verdünnung der Außenluft eintritt, weist Zuntz darauf hin, daß solche Versuche deshalb durchaus nicht beweisend seien, weil bei denselben der verminderte Luftdruck nur einseitig auf die Lunge wirke. Er sagt dann S. 357: »dafür, daß allein durch den Aufenthalt unter Luftverdünnung Blutstauung in den Lungen auftritt, liegt bis jetzt gar kein Beweis vor, sie ist nach den oben gegebenen theoretischen Vorstellungen, die unsern heutigen physikalischen Kenntnissen entsprechen, garnicht zu erwarten und ist auch im Widerspruch mit den Ergebnissen von Löwys Versuchen, den einzigen²⁾, die bis jetzt über die Blutströmung in verdünnter Luft angestellt worden sind«. (Vgl. A. Löwy: Über Respiration und Zirkulation bei Änderung des Luftdruckes usw. Berlin, 1895.)

Trotz dieser Darlegungen und der denselben entsprechenden, z. Z. allgemein bestehenden Auffassung der Verhältnisse, welche der mechanischen Wirkung der Luftdruckerniedrigung im Höhenklima ungeachtet des reichen Materiales welches Kronecker in der eben erwähnten Arbeit für die alte Ansicht beibringt, so gut wie jede Bedeutung absprechen, habe ich bereits vor mehreren Jahren für eine solche Art der Wirkung der Luftdruckerniedrigung wieder eintreten zu sollen geglaubt³⁾.

In einer kleinen, in der Deutschen Medizinischen Wochenschrift 1907, Nr. 1 gegebenen Darlegung wurde von mir der Standpunkt vertreten, daß entgegen der obigen Auffassung, ein sehr erheblicher Teil der Höhenwirkungen, ja sofern es sich um den Einfluß unseres therapeutisch verwerteten Höhenklimas unter 2000 m handelt, der wesentlichste Teil derselben von physikalischen Wirkungen der Luftdruckerniedrigung abhängen dürfte und nicht auf einen durch den verminderten Sauerstoffpartialdruck veranlaßten Sauerstoffhunger

1) Kronecker, »Die Bergkrankheit«. Berlin und Wien 1903 und Deutsche Klinik 1907, S. 130.

2) Es lagen auch Blutdruckversuche von Dr. E. Aron aus dem Jahre 1896 bereits damals vor, welche gegenüber den sehr komplizierten, schwer zu übersehenden und deshalb keineswegs unzweideutigen Versuchen Löwys, doch für einen Einfluß der Luftdruckerniedrigung auf die Zirkulation sprechen, da hier ein, wenn auch geringer kurzer Blutdruckanstieg, gefolgt von Blutdrucksenkungen unter die Norm, ähnlich wie sie in vorstehender Arbeit auch Nick wieder nachgewiesen hat, konstatiert wurde.

3) Inzwischen ist 1912 auch Heger »Le mal de montagne«, Journal med. de Bruxelles Nr. 46, für die alte mechanische Deutung der Luftdruckwirkung wieder eingetreten.

des Organismus zurückzuführen sei. Für die Begründung dieser Auffassung erscheinen vor allem zwei Gesichtspunkte bedeutsam. Einerseits ist nämlich nicht einzusehen, warum, wenn der Organismus z. B. bei 1800 m Höhe (Schatzalp) ein Bindungsdefizit seines Hämoglobins für Sauerstoff von $1\frac{1}{4}\%$ erleidet, es zu einer kompensatorischen Hämoglobinvermehrung von 8—10% kommen soll, wie sie neuerdings Bürker¹⁾ mit seinen sehr exakten Methoden konstatierte. Es muß dies Zweifel erwecken, ob nicht doch noch andere Faktoren als bloß die Partialdruckverminderung des Sauerstoffes für die Wirkung des Höhenklimas in Betracht kommen. Andererseits erscheint aber auch der oben erwähnte Satz von Zuntz: »Der Luftdruck wirke auf alle äußeren und inneren Oberflächen des Körpers und seiner Teile stets von allen Seiten in gleicher Weise ein, und deshalb könne eine Verminderung des Luftdruckes zu keiner auf einseitiger mechanischer Druckwirkung beruhenden Störung des Gleichgewichts der Teile führen« in seiner Prämisse als den Tatsachen nicht entsprechend und deshalb auch in seiner Folgerung als nicht zutreffend, wie aus den folgenden Darlegungen und Versuchen hervorgehen dürfte.

I. Einfluß der Luftverdünnung auf die Gelenke.

Gegen die Auffassung, daß der Luftdruck auf alle Teile des Körpers in gleicher Weise wirken soll, spricht schon die in der oben erwähnten Mitteilung von mir angeführte Tatsache, daß bekanntlich der Oberschenkelkopf, an welchem bei frei pendelndem Beine das ganze Gewicht desselben hängt, nicht durch Muskel- und Bänderkraft, sondern vor allem durch die Wirkung des Luftdruckes in der Pfanne gehalten wird, wie dies bekanntlich die Gebrüder Weber in ihrer klassischen Arbeit²⁾ in ganz unzweideutiger Weise durch das Experiment nachgewiesen haben.

Dieser Effekt des Luftdruckes aber wäre unmöglich, wenn der Luftdruck in gleicher Weise wie auf den Querschnitt des Schenkelkopfes, auch in der Gelenkpfanne sich geltend machen würde. Schon das Herausfallen des Schenkelkopfes aus der Pfanne bei Anbohren der letzteren, d. h. bei Herstellung der Kommunikation der Gelenkhöhle mit der Außenluft beweist, daß im geschlossenen Gelenk der

1) Bürker, Die physiologischen Wirkungen des Höhenklimas. Zeitschr. f. Biologie, Bd. 61, N. F. 43, S. 379 ff.

2) Vgl. Wilhelm Webers Werke, herausgegeben von der Kgl. Gesellschaft der Wissenschaften. Göttingen. Bd. VI, S. 322 ff. und Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie 1837, Bd. XL, Nr. 1.

Luftdruck nicht auf die Oberfläche des Schenkelkopfes wirksam zu werden vermag.

Es ist aber auch nicht, wie man anzunehmen scheint, die Viskositäts- oder Kapillarattraktionskraft, welche den Schenkelkopf in der Pfanne hält. Dies geht einerseits schon daraus hervor, daß diese durch die kleine Unterbrechung an der Stelle der Bohrung kaum so stark beeinflußt werden würde, andererseits aber dürfte es auch der Modellversuch beweisen, den ich sowohl in Göttingen wiederholt und jüngst auch wieder in der Tübinger medizinischen Gesellschaft demonstriert habe¹⁾. Der Versuch ist folgender, durch die nebenstehende Fig. 1 veranschaulichter.

Figur 1.

Eine mit einem Haken versehene polierte Kugel von etwa der Größe des Oberschenkelkopfes, 4 cm Durchmesser, ist in eine halbkugelförmige künstliche Messinggelenkpfanne absolut genau eingeschliffen. Am obersten Punkt der Gelenkpfanne befindet sich in der Messingfassung eine Bohrung in welche ein eingeschliffenes Rohr mit Hahn eingesetzt werden kann. Über den unteren abgerundeten Rand der Pfanne, welcher mit einer Rinne außen endet, wird ein der Kugel eben gut anliegender, dünnwandiger Fahrradschlauch gezogen und nun die Pfanne mit dem Gummischlauch bei nach unten gerichteter Hahnröhre mit gut luftfreiem Parafin-liq. gefüllt, unter Abfließenlassen eines Teiles des Parafins durch den Hahn, um alle Luft auch aus der Ansatzröhre zu verdrängen. Die Kugel wird darauf unter Auseinanderziehen des Gummischlauches in die Pfanne gepreßt, so daß sie derselben fest anliegt. Darauf wird der Schlauch unter Verdrängen des überschüssigen Parafins der Kugel sich anlegen gelassen, so daß beide Teile miteinander völlig luftfrei verbunden sind. Befestigt man nun das Pfannenstück an einem Träger unter einer Luftpumpenglocke und hängt an dem Hacken der Kugel ein fünf Kilogewicht, an dem oben eine über eine senkrechte Skala hingleitende Feder sich befindet, und stellt die Skala so ein, daß die Federspitze auf dem Nullpunkt steht, so wird beim Auspumpen der Luft das Gewicht zunächst seine Stellung nicht ändern. Es tritt aber eine Senkung ein, wie die Feder zeigt, sobald der Zug des be-

1) Münchn. med. Wochenschr. 1913, Nr. 36.

lastenden und des Kugelgewichtes (5047 g) größer wird als der auf den Kugelquerschnitt wirkende Luftdruck (390 mm Hg), zusammen mit der allerdings geringen Kraft, mit welcher der Schlauch auf die Kugel drückt. Sie sinkt bei 380 mm Hg.

Die Kugel sinkt bei weiterem Auspumpen unter Dehnung des Schlauches, welcher sich zugleich in den beim Überspannen des Schlauches von der Kugel zum Pfannenstück bleibenden, Parafin gefüllten Raum tiefer einpreßt, um $\frac{1}{2}$ —1 Millimeter herunter, wobei nun Parafin aus diesem Raum in den Gelenkspalt zwischen Kugel und Pfanne tritt. Sobald die Luft in die Glocke wieder eintreten gelassen wird und ihr Druck mit der Zugkraft des Gewichtes gleichgeworden ist, sehen wir die Feder wieder auf dem Nullpunkt der Skala. Die Kugel liegt also wieder der Pfanne, wie zu Beginn des Versuches fest an, und das Parafin füllt wieder den äußeren vom Schlauch überspannten Raum zwischen Kugel und Pfannenstück wie anfangs.

Daß bei der Fixierung der Kugel weder Kapillaritäts- noch Viskositätskräfte nennenswert in Betracht kommen, dürfte daraus hervorgehen, daß, um ein Sinken der Kugel bei geöffnetem Hahn herbeizuführen, nur eine Belastung von etwa 135 g erforderlich ist. Es handelt sich also offenbar vor allem um das Wirksamwerden des Luftdruckes, und die Bewegung tritt ein, weil die Zugkraft des Gewichtes, die Kraft des Luftdruckes überwindend, zu einer Massenverschiebung zu führen die Möglichkeit hat. Auf die praktischen Folgen, welche sich aus dieser Beeinflussung der Gelenke im Höhenklima ergeben, indem mit Nachlassen der Pressung die Gelenkbewegungen erleichtert werden, wurde in der Deutsch. med. Wochenschrift von mir bereits hingewiesen.

II. Einfluß der Luftverdünnung auf den kleinen Kreislauf.

Ein weiterer Beweis für das Unzutreffende der Auffassung, daß auf alle inneren Flächen des Körpers der umgebende Luftdruck in gleicher Weise wirksam sei, liegt aber in der allbekannten Tatsache, auf welche gleichfalls schon hingewiesen wurde¹⁾, daß sich bei Eröffnung des Thorax die Lunge zusammenzieht, was nicht eintreten könnte und dürfte, wenn bei geschlossenem Thorax auf die Pleura pulmonalis wirklich der Luftdruck in gleicher Weise wie auf die innere Fläche der Lungenalveolen sich geltend machte. Daß bei der Eröffnung des Thorax eine so wesentliche Veränderung im Spannungszustande der Lunge erfolgt, beweist, daß eine der elastischen Retraktionskraft des Lungengewebes einseitig von innen entgegenwirkende Kraft vorhanden sein muß, welche die Lunge im geschlossenen Thorax ausgespannt erhält. Diese Kraft ist der Luft-

1) Münchn. med. Wochenschr. 1913, Nr. 36.

druck. Es wurde dies auch in dem Modellversuch der erst erwähnten Mitteilung¹⁾ an der Hand des Schemas, das hier als Fig. 2 nochmals wiedergegeben sein möge, bereits dargetan.

Der in der Glaskugel aufgeblasene Gummiballon B bleibt hier dadurch, daß der Druck der Luft von außen auf seine Oberfläche nicht wirksam werden kann, trotz der Dehnung, in der er sich befindet, ausgespannt, weil die Kraft des Luftdruckes, welcher einseitig

Figur 2.

Figur 3.

Figur 4.

von der Innenfläche auf den Ballon einwirkt, größer als seine elastische Retraktionskraft ist²⁾. Analoge Verhältnisse liegen aber auch bei der Lunge vor.

Gerade der von Zuntz herangezogene Vergleich mit dem Manometer lehrt am besten, daß es sich bei der Lunge um analoge Verhältnisse wie bei unserem Modell handelt. Während in der Tat an einem Manometer mit beiderseits offenen Schenkeln sich der Stand der beiden Quecksilberniveaus, wenn in dem umgebenden Raume die Luft verdünnt wird, nicht ändert, sofern wirklich auf beiden Seiten der gleiche Druck in gleicher Weise zur Wirkung gelangt, erfährt, wenn wir den einen Manometerschenkel mit dem Pleuraraum verbinden, das Quecksilber eine starke Ansaugung, ebenso wie bei unserem Modell, wo auch das Manometer einen negativen Druck zeigt. Bringen wir nun freilich dieses Modell oder, wenn die Durchführung des analogen Versuches ohne andere störende Momente möglich wäre, den mit dem Manometer versehenen Thorax unter eine Luftpumpenglocke, so zeigt sich bei Verminderung des Luftdruckes eine weitere Veränderung in der Stellung des Manometers zunächst nicht mehr, denn hier hat eben die durch die elastische Kraft des Lungengewebes,

1) Vgl. Deutsche medizinische Wochenschrift 1907, Nr. 1.

2) Die Verhältnisse entsprechen denen am Schenkelkopf, welcher auch vom Luftdruck an die Gelenkpfanne angepreßt wird, solange nicht die Zugkraft des Beingewichtes größer als die Druckkraft des Luftdruckes ist.

bzw. des Gummiballons bedingte Saugwirkung dazu geführt, daß der Einfluß des Atmosphärendruckes von außen durch Hebung des Quecksilbers um den der Retraktionskraft entsprechenden Druckwert verringert worden ist. Wir haben hier zunächst ein Gleichgewicht der Kräfte, bei welchem auf der einen Seite der Atmosphärendruck minus Retraktionskraft der Lunge, auf der andern Seite der gleiche Atmosphärendruck minus der Zugkraft der angesaugten Quecksilbersäule, welche eben die Retraktionskraft des Ballons oder der Lunge durch Ansaugung des Manometers bewirkt hat, steht. Dieses Gleichgewicht der Kräfte bleibt nun allerdings dauernd konstant. Das Manometer und der Ballon ändern ihre Stellung auch zunächst nicht, solange der Atmosphärendruck größer ist als die Retraktionskraft des Ballons. Wird nun aber bei zunehmender Luftverdünnung die Retraktionskraft des Ballons größer als die Kraft des äußeren Luftdruckes, so saugt sie in der Glaskugel einen luftleeren Raum, d. h. ein Barometervakuum, ebenso wie es in einem einseitig geschlossenen Vakuummanometer entsteht. Das der Kugel eingefügte angesaugte Manometer zeigt dabei aber einen um soviel niedrigeren Stand gegenüber dem Vakuummanometer im umgebenden luftverdünnten Raum, als der elastischen Retraktionskraft des gespannten Ballons entspricht.

Die auf der beigegeführten Tafel, Fig. 1 u. 2 gegebenen beiden photographischen Aufnahmen mögen die extremen Endstadien, wie sie in einem entsprechenden, von mir angestellten Versuche vorlagen, veranschaulichen. Bei dem betreffenden Versuch betrug die Differenz der beiden Vakuummanometer, entsprechend der elastischen Retraktionskraft des Ballons, 10 mm Hg, d. h. es entstand in der Kugel das erste Vakuum bei einem Stand seines angesaugten Manometers von 40 mm Hg, als gleichzeitig der Druck in der umgebenden Glocke auf 50 mm Hg abgesunken war. Als dieser auf 40 mm sank, stand das Manometer der Kugel 30 mm; bei 30 mm Außendruck in der Glocke, das der Kugel bei 20 mm und sofort, bis das Manometer der Kugel 0 mm, das der Glocke 10 mm Hg zeigte. Es gelingt dieser Versuch allerdings nur dann, wenn die Kugel mit absolut luftfreiem Wasser gefüllt ist und eine kleine Menge Platinmoor von etwa Stecknadelkopfgröße enthält. Läßt man nun die Luft wieder in die Glocke eintreten, so verschwindet das Vakuum, und der Ballon kehrt in seine ursprüngliche gedehnte Stellung zurück¹⁾.

Dieser Versuch dürfte den dynamischen Einfluß der vom Luftdruck völlig unabhängigen elastischen Kraft des Gummiballons unzweideutig zur Anschauung bringen und zeigen, daß elastische Kräfte den Effekt des Luftdruckes sehr erheblich zu beeinflussen vermögen. Es ergibt sich aber daraus, daß in einem Gebilde, das von elastischen

¹⁾ Zum Auspumpen der Glocke wurde eine Kapselluftpumpe von Gaede benutzt.

Massen umschlossene, einer Volumensänderung fähige Räume enthält, bei Änderung des Luftdruckes in der Umgebung, vom äußeren Luftdruck abweichende Druckwerte im Innern werden entstehen können und müssen, die sich untereinander und mit dem umgebenden Luftdruck dann allerdings wieder ins Gleichgewicht setzen, aber bei jedem Wechsel des äußeren Luftdrucks zu Druckwechseln in den einzelnen Teilen, eventuel zu Änderungen ihrer Volumina führen werden. Die Kraft des in elastischer Spannung sich befindenden Lungengewebes und der mit demselben verbundenen Pleura pulmonalis, sowie der zwischen diesem elastischen Gewebe liegenden Blutgefäße mit ihren elastischen Wänden ist demnach ein sehr wichtiger und beachtenswerter Faktor, eben weil die vom Luftdruck völlig unabhängige Elastizitätsenergie aller dieser Teile sich im oben erwähnten Sinne geltend machen wird. Diese Elastizitätskräfte sind aber hinsichtlich des Lungengewebes, wie der Gefäße individuell verschieden und wechseln je nach dem Alter und unter pathologischen Verhältnissen, z. B. bei Emphysem und dergleichen¹⁾, nicht unerheblich. Ebenso ist aber auch die Kontraktionskraft der Atemmuskeln und des Herzmuskels, sowie die Größe des von letzterer mit abhängigen Blutdruckes gleichfalls vom Luftdruck unabhängig, so daß, je nach dem Druck in den Gefäßen und der Tiefe der Atemzüge, die Wirkung des Luftdruckes sehr verschieden durch diese elastischen Momente beeinflußt werden wird. Es beweisen dies auch der wechselnde negative, zwischen 5 und 30 mm schwankende Druckwert im Pleuraraum, sowie die mit der Atmung synchronen Schwankungen der Blutdruckkurve.

Kommen solche elastische Kräfte nun aber in einem einander entgegengesetzten Sinne, wie dies bei der Lunge und ihren Gefäßen der Fall ist, zur Wirkung, so werden sie sich mit dem Luftdruck und untereinander in gegenseitige Gleichgewichtslage einstellen, wie dies für die Verhältnisse des Schemas, das hier als Fig. 3 gleichfalls noch einmal wiedergegeben sein möge, in der erwähnten Publikation gezeigt worden ist.

Unter dem Einfluß einer Luftdruckerniedrigung, welche ein solches System²⁾ gleichmäßig trifft, wird eine Veränderung hinsichtlich der Lage der beiden Membranen a und b allerdings zunächst nicht eintreten, aber nur in den oben erwähnten Druckgrenzen, dahingegen nicht bei Absinken des Luftdruckes auf Null, wie versehentlich in der obigen Publikation gesagt wurde. Vielmehr wird hier ebenso wie bei der nur

1) Aus solchen individuellen Verschiedenheiten dieser Elastizitätsfaktoren ergeben sich aber auch eine ganze Reihe von Unterschieden im Einfluß, welchen das Höhenklima auf verschiedene Individuen ausüben vermag, wie dies an anderer Stelle gezeigt werden wird.

2) Vgl. Fig. 3, S. 431.

mit dem Ballon und Manometer versehenen Kugel in Fig. 2 eine Änderung des Standes der beiden Membranen unter Entspannung derselben bei schließlich zur Vakuumbildung führenden Druckerniedrigung eintreten.

Es ändern sich aber die Verhältnisse sehr wesentlich, wenn wir, wie das in der Lunge der Fall ist, zwischen diese unter beiderseitiger Luftdruckwirkung sich im Gleichgewicht befindlichen elastischen, gedehnten Flächen ein elastisches Rohrsystem einschalten, welches von Flüssigkeit (Blut) unter konstantem Druck von Innen durchströmt, sein Volumen zu ändern vermag, oder wie es vereinfacht im Schema Fig. 4 dargestellt ist, ein System, bei welchem statt durch Röhren durch den zwischen der Membran und der Glaswand befindlichen Spaltraum unter konstantem Druck aus einem Reservoir Flüssigkeit fließt. Hier vergrößert sich, wie der Versuch zeigt, bei Herabsetzung des auf der Membran lastenden Luftdruckes unter Ansaugung von Flüssigkeit bei Beschleunigung des Zu- und Verlangsamung des Abflusses, sogleich der Spaltraum, bzw. das Rohrsystem bis zur neuen Gleichgewichtslage der elastischen Membran unter entsprechender Retraktion derselben, bzw. Erweiterung der Röhren, worauf dann nach Wiedereinstellung des Gleichgewichts der elastischen Teile der Strom in gleicher Weise wie vorher durch das System hindurchfließt. Der einzige Unterschied im Strom nach Einstellung des neuen Gleichgewichtes der elastischen Teile besteht darin, daß jetzt die im Spaltraum, bzw. dem Röhrsystem enthaltene Flüssigkeitsmenge eine größere ist und infolgedessen bei wieder eingetretener gleicher Zu- und Abflußmenge wie vorher, die in der Zeiteinheit einströmende Flüssigkeitsmenge jetzt länger im Spaltraum, bzw. Rohrsystem, als vor der Luftverdünnung verweilt.

In gleicher Weise werden sich aber die Gefäße der Lunge erweitern und stärker mit Blut füllen müssen bei Herabsetzung des auf die innere Alveolenwand und das Zwerchfell wirkenden Luftdruckes. Bei solcher Vergrößerung der von den Lungengefäßen aufgenommenen Blutmenge und bei dem hierdurch bedingten längeren Verweilen des Blutes in der Lunge wird sich dann aber auch eventuell der Gasaustausch bei gleichen Ventilationsbedingungen der Alveolen gründlicher vollziehen können. Allerdings muß gleichzeitig berücksichtigt werden, daß der Alveolenraum entsprechend der stärkeren Füllung der Gefäße etwas verengert und die Dehnbarkeit des gesamten Lungengewebes gleichzeitig etwas verringert werden wird. Hiermit würde das im Höhenklima auftretende Absinken der Vitalkapazität und ebenso das Steigen der Atemfrequenz sich wohl in Einklang bringen lassen. Man könnte sich aber auch noch eine

ganze Reihe sonstiger Erscheinungen im Höhenklima auf Grund einer solchen Veränderung der Lungenzirkulation erklären, und auch mancher therapeutische Erfolg ließe sich auf diese Veränderung im Lungenkreislauf zurückführen. So dürfte z. B. klar sein, daß, wenn als Folge der allgemeinen Lungengefäßweiterung eine relativ bessere Durchblutung aller Lungenpartien erfolgt, in Fällen, wo krankhafter Weise oder durch angeborenen Habitus einzelne Lungengebiete, wie z. B. die Lungenspitzen, oder nach einer Pleuritis die unteren Lungenpartien ungenügend von Blut durchströmt werden, diese Wirkung des Höhenklimas prophylaktisch und eventuell wie im letzteren Falle, therapeutisch sich als nutzbringend erweist.

Sowohl von Zuntz, als auch von Seiten der Kliniker¹⁾, welche die Unterdruckatmung oder die sogenannte Saugmaske in ihren verschiedenen Formen therapeutisch verwenden, wird die geschilderte Einwirkung auf die Lungenzirkulation bei Verdünnung bloß im Gebiet der Atemluft durchaus anerkannt. Man glaubt aber einen gleichartigen Effekt bei Aufenthalt des Gesamtkörpers in verdünnter Luft und also auch im Höhenklima als nicht in Frage kommend betrachten zu dürfen, eben weil man davon ausgeht, daß, wie Zuntz ja sagt, eine Luftdruckänderung keine Wirkung äußern könne, wenn sie auf alle Teile unseres Körpers in gleicher Weise einwirke, d. h. wenn der ganze Körper sich unter demselben Luftdruck befinde.

Nun hängt aber, wie wir soeben gezeigt haben, die stärkere Füllung der Lungengefäße bei allgemeiner Luftdruckerniedrigung keineswegs davon ab, daß als Folge der Luftdruckverminderung sich etwa auf die äußere und innere Oberfläche der Lunge ein verschiedener großer Druck geltend macht, vielmehr wird sie lediglich dadurch bedingt, daß der vom Innern der Gefäße auf ihre Wand wirkende Blutdruck eine Verminderung des Widerstandes des von außen auf die Gefäßwand ihm entgegenwirkenden Luftdruckes erfährt. Wir sind dabei zunächst nicht auf die Frage eingegangen, inwieweit es sich bei dieser Verminderung der Luftdruckwirkung auf die Gefäßwände um ein Wirksamwerden von der alveolaren Innenfläche aus handelt, inwieweit eventuell auch ein solches von der äußeren pleuralen Lungenoberfläche aus mit in Frage kommt.

Alle unsere bisherigen Darlegungen weisen nun aber darauf hin, daß der äußere Luftdruck auf die Lungengefäße sich von der Pleura

1) Vgl. z. B. Waldenburg, Die pneumatische Behandlung der Respirations- und Zirkulationskrankheit. Berlin 1875, Hirschwald S. 263; Kuhn, Münchn. med. Wochenschr. 1907, S. 785. Deutsch. med. Wochenschr. 1906, Nr. 37; Bruns, Münchn. med. Wochenschr. 1910, Nr. 42. Deutsch. med. Wochenschr. 1911, Nr. 48.

pulmonalis weit weniger als von der Innenfläche der Lungenbläschen aus wird geltend machen können. Wirkt er doch auf letztere beiderseitig unmittelbar ein, während eine Wirkung auf die Pleura pulmonalis durch die zahlreichen Lagen von Fascien, Muskeln und sonstigen Geweben, welche in ihrer nicht unbeträchtlichen elastischen Anspannung, ihrem Tonus vom Luftdruck unabhängig sind, sowohl von der Pleura costalis als von der Pleura diaphragmatica und der Bauchhöhle her abgeschwächt wird, wie wir dies später auch noch eingehender begründen werden. So kann es fraglich erscheinen, ob im Verhältnis zu der Einwirkung von den Alveolen aus eine Herabsetzung des Luftdruckes auf die Lungengefäße bei Einwirkung auf den Gesamtkörper, von dem Zwerchfell und den Thoraxwänden aus, sich überhaupt nennenswert geltend machen kann. Man wird vielmehr zu der Überzeugung gedrängt, daß unter den gegebenen Bedingungen der in den Lungengefäßen herrschende Druck und das Volumen dieser Gefäße als nur einseitig von der Alveoleninnenfläche aus vom allseitig wirkenden Luftdruck beeinflußt zu betrachten ist.

Danach könnte es nun allerdings erscheinen, als ob dann die Wirkung einer den Körper in seiner Gesamtheit treffenden Luftdruckerniedrigung die Lungen und den kleinen Kreislauf in gleicher Weise beeinflussen müßte, wie eine nur auf das Gebiet der Atemluft beschränkte Luftdruckverminderung. Das ist aber keineswegs der Fall, vielmehr gestalten sich die Verhältnisse in beiden Fällen durchaus verschieden.

Bei der letztgenannten Art der Einwirkung der Luftdruckverminderung wird die Art der Beeinflussung der Blutgefäße selbstverständlich zunächst an sich im Prinzip eine gleichartige wie unter den im vorhergehenden betrachteten Verhältnissen der doppelseitigen Druckverminderung sein müssen, da in beiden Fällen sich die Gefäße auf Grund des geringeren, auf ihre Wand von außen wirkenden Druckes stärker mit Blut füllen.

Bei nur einseitiger Luftdruckverminderung in der Lunge kommt aber als ein neues und sehr wesentlich die Verhältnisse veränderndes Moment hinzu, daß hier der von außen wirksam werdende Überdruck des normalen Atmosphärendruckes auf die Körperoberfläche zu einer Kompression der als Ganzes leicht beweglichen Thoraxwand und zu stärkerer Einwölbung des Zwerchfells in die Brusthöhle führt, so daß es schon bei sehr geringem, wenige Zentimeter Wasser betragenden Überdruck zu einer erheblichen Verkleinerung des Brustraumes unter gleichzeitiger Volumensverminderung der Lungen kommt¹⁾.

1) Vgl. Osk. Bruns, Die künstliche Luftdruckerniedrigung über den Lungen. Münchn. med. Wochenschr. 1910, Nr. 42.

Diese Verkleinerung des Brustraumes und der Lungen, welche bei allseitiger Luftdruckverminderung in der pneumatischen Kammer und im Höhenklima fehlt, führt zu einer Behinderung der Längsentfaltung der Gefäße in der Alveolenwand, zur Verkürzung und Verbreiterung der Strombahn und Verkleinerung der Alveolenräume durch Kompression, abgesehen noch von der stärkeren Gefäßfüllung durch Ansaugung. Die alveoläre Hyperämie wird, gegenüber der im Höhenklima und in der pneumatischen Kammer, bei Unterdruck noch dadurch weit stärker ausfallen, daß das Blut der unter relativ höherem Druck von außen gestellten Gefäße des großen Kreislaufes den unter geringerem Druck stehenden Lungengefäßen zugetrieben wird. Trotz des erheblich größeren Blutreichtums der Lunge beim Unterdruck, findet aber das Blut hier doch wesentlich ungünstigere Bedingungen für seinen Gaswechsel als bei allseitiger Druckerniedrigung, weil eben die Alveolräume nicht nur durch die weit stärker geschwellten Gefäße, sondern auch noch durch die Verminderung des Gesamtvolumens der Lunge infolge der Brustraumverkleinerung verengt werden. Es wird also die Unterdruckatmung zwar die Blutzufuhr zu beiden Herzen, auch die Arbeit des rechten Herzens begünstigen und erleichtern und den Blutdruck steigern können, in ihrem Effekt für die innere Atmung der Gewebe aber wird sie im Sinne einer starken Atembehinderung wirken.

Bei allseitiger Luftdruckverminderung kommen diese Nachteile für den Gaswechsel nicht in Frage, da nach unseren Ausführungen keinesfalls eine Volumensverminderung des Brustraumes eintreten kann; vielmehr, wenn man der Theorie entsprechend, als Folge der Entlastung auch der Thoraxwände überhaupt eine Volumensänderung annehmen wollte, dann eher eine geringe, der verstärkten Blutfüllung parallel gehende Vergrößerung der Lungen zu erwarten wäre.

Bei allseitiger Luftverdünnung hängt der Grad der Lungenhyperämie aber nicht bloß von der absoluten Größe der Druckverminderung als solcher ab, wie es bei der Unterdruckatmung der Fall ist, vielmehr wird hier der Effekt wesentlich mit von der auf der venösen Seite disponiblen und vom rechten Herzen der Lunge zugeführten Blutmenge beeinflußt. Hierin aber liegt ein weiterer Grund, weshalb die Hyperämie der Lunge bei allgemeiner Herabsetzung des Luftdruckes, selbst wenn diese 100 oder 200 mm Hg und mehr beträgt, nie eine so hochgradige werden wird; auch die Stärke der Füllung der Lungengefäße nicht der mit einer bestimmten Herabsetzung des Luftdruckes an sich verbundenen Entlastung der Gefäßwände zu entsprechen braucht.

Während nämlich bei Unterdruckatmung eine stärkere Entleerung der Gefäße des großen Kreislaufes nach der Lunge hin auf Grund des den Gesamtkörper treffenden Überdruckes erfolgt, so daß hier dem rechten Herzen zur Füllung der sich erweiternden Gefäße des kleinen Kreislaufes stets reichlich Blut zur Verfügung steht, tritt bei allseitiger Druckverminderung, wie die Versuche Nicks¹⁾ zeigen, gleichzeitig auch an den oberflächlichen Stromgebieten des großen Kreislaufes, Neigung zu stärkerer Füllung ein, so daß damit die Blutzufuhr zum rechten Herzen eventuell eine Herabsetzung erfährt, die dann ihrerseits die alveoläre Hyperämie weniger zum Ausdruck gelangen lassen wird.

Die hier in Betracht kommenden oberflächlichen Stromgebiete erfahren aus gleichem Grunde wie die Lungengefäße eine Erweiterung bei Luftdruckverminderung, sofern nicht vom Gefäßzentrum aus eine solche stärkere Füllung unter regulatorischer Verengerung ihres Lumens verhindert wird. Bei kürzerer Dauer allseitiger Luftdruckerniedrigung steht unter normalen Bedingungen bei guter Funktion des Gefäßnervenzentrums eine solche Regulation sogar mit einer gewissen Überkompensation zu erwarten. In letzterem Fall wird dann der Effekt hinsichtlich der Blutfüllung der Lunge sich relativ günstig gestalten können.

Bei längerer Dauer der allseitigen Druckerniedrigung, wie sie beim Übergang und Verweilen in größeren Höhen in Frage kommt, wird sich eventuell infolge der stärkeren, anhaltenden Inanspruchnahme des zentralen nervösen Gefäßregulationsapparates an diesem nach längerer Zeit Ermüdung einstellen können, da er ja andauernd einen gesteigerten Gefäßtonus der oberflächlichen Stromgebiete zu unterhalten hat, falls es nicht zum Absinken des Blutdruckes kommen soll. Sobald infolge solcher Ermüdung die regulatorische Kompensation des Tonus nicht mehr vollständig aufrecht erhalten werden kann, wird das Blut wieder mehr in die oberflächlichen Gefäße abfließen und dann die Füllung der Lungengefäße wieder entsprechend schwächer ausfallen. Unter sonst normalen Bedingungen kann aber bekanntlich bei einem gesunden Individuum ein erhöhter Tonus auch ausgedehnter Gefäßgebiete vom Gefäßnervenzentrum aus mit großer Energie relativ lange Zeit hindurch aufrecht erhalten werden, wie dies ja auch nach umfänglicheren Blutverlusten der oft noch stundenlang nahezu auf normaler Höhe erhaltene Blutdruck zeigt.

1) Vgl. d. Arch. Bd. 76, S. 401.

Da nun aber auch sehr bald unter dem Einfluß des sich geltend machenden Blutmangels eine kompensatorische Blutvermehrung einsetzt, welche schon nach einigen Tagen die sowohl für eine entsprechende Füllung des kleinen wie des großen Kreislaufes nötige Blutmenge zur Verfügung stellt, so wird der nervöse Regulationsapparat immer mehr von seiner gesteigerten Tätigkeit entlastet, bis schließlich sich die Gesamtblutmenge dem stärker gefüllten Lungenkreislauf angepaßt hat. So werden wir denn doch die alte Auffassung einer auf mechanischer Grundlage durch die Luftdruckverminderung im Höhenklima bewirkten Lungenhyperämie wiederum als zutreffend anerkennen dürfen und müssen.

Ja, wir werden eine solche Beeinflussung des Lungenkreislaufes geringen Grades auch schon zu erwarten haben, wenn wir auch nur einige hundert Meter steigen und uns damit der Wirkung eines, wenn auch nur um wenig verminderten Luftdruckes aussetzen, bei welchem eine Veränderung der Sauerstoffspannung sicher noch nicht in Frage kommt, wohl aber der mechanische Effekt der Druckverminderung.

III. Einfluß der Luftdruckerniedrigung auf den großen Kreislauf.

Daß durch allseitige Luftdruckverminderung und zwar bloß auf mechanischem Wege, die Blutverteilung im großen Kreislauf tatsächlich verändert werden kann und unter bestimmten Bedingungen verändert wird, was bei den 1907 mit unzulänglichen Mitteln ausgeführten Versuchen gesichert nachzuweisen mir nicht möglich war, dürften jetzt die Ergebnisse der von Herrn Nick angestellten und in vorstehender Arbeit wiedergegebenen Versuche gezeigt haben. Hinsichtlich der Anordnung der Versuche, der Einzelheiten ihrer Ergebnisse und der aus diesen gezogenen nächsten Schlüsse muß auf die Arbeit selbst verwiesen werden.

Nachdem aber einmal, wie eingangs erwähnt, gewichtige Zweifel an der prinzipiellen Möglichkeit eines mechanischen Einflusses der Luftdruckverminderung auf die Blutzirkulation geltend gemacht und allgemein¹⁾ akzeptiert worden sind, erscheint es doch auch nötig zu versuchen, die physikalischen Grundlagen klar zu stellen, welche die von H. Nick und mir beobachteten Erscheinungstatsachen zu erklären die Möglichkeit bieten. Es möge deshalb gestattet sein, auf diese

1) Vgl. die Darlegungen von O. Cohnheim »Alpinismus« *Ergebn. d. Physiol.*, Bd. 12, S. 646—647 und Morawitz »Einfluß des Höhenklimas auf die Menschen« *Verhandl. d. 22. Jahresvers. des Allg. deutsch. Bäderverbandes 1914*, S. 2.

Frage näher einzugehen und dabei einen das Verständnis, wie ich glaube, erleichternden schematisch-physikalischen Versuch und die sich aus demselben ergebenden Gesichtspunkte hier kurz mitzuteilen.

Daß die Kraft des Luftdruckes und ebenso eine Verminderung derselben, auch wenn sie von allen Seiten sich gleichmäßig auf die Körperoberflächen geltend macht, dennoch im Inneren des Körpers nicht überall in gleicher Weise zur Wirkung gelangt, hat seinen Grund, wie aus den vorhergehenden Betrachtungen bereits sich ergeben haben dürfte, einerseits darin, daß durch feste Teile, wie die Knochen hindurch, der Luftdruck sich nicht unmittelbar geltend zu machen vermag, so daß er z. B. auf die Gelenkflächen nur von der Seite des beweglichen Teiles her wirksam werden, mithin auch nur durch ihm in dieser Richtung entgegenwirkende Kräfte, wie z. B. die Schwerkraft in seinem Einfluß verringert werden kann, andererseits aber darin, daß im Körper selbst auch noch andere, vom Luftdruck unabhängige Kräfte wie die Elastizität, Muskel- und osmotische Kraft usw., der Kraft des Luftdruckes gleichfalls entgegenwirken, so daß an den verschiedensten Teilen, entsprechend dem jeweiligen Wirksamwerden solcher Gegenkräfte, der Effekt des Luftdruckes verändert wird.

Alle diese Kräfte als solche und in ihren Größendifferenzen zueinander können aber erst dann und nur in dem Umfang mechanisch in Erscheinung treten, wenn und soweit sie aus dem Zustande der potentiellen Energie in kinetische Energie überzugehen vermögen. Diese Möglichkeit ist aber nur gegeben unter der Voraussetzung gleichzeitig eintretender Massenverschiebungen oder Volumensänderungen.

Die Umfänglichkeit solcher Massenverschiebungen und Volumensänderungen wird aber bei der verschiedenen Beschaffenheit und verschiedenen Anordnung der Körpergewebe in den verschiedenen Teilen des Körpers eine sehr wechselnde sein. So werden sich z. B. flüssige Massen wie das Blut innerhalb der Gefäßbahnen leicht verlagern können, während flächenhaft ausgespannte Gewebe Massenverlagerungen und Volumensänderungen in bestimmten Richtungen infolge geringer Beweglichkeit ihrer Teile und wegen ihrer geringen Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und selbst Gase, unter Umständen sehr eng begrenzen, ja, wie z. B. bei den Gelenkwänden, nahezu ausschließen können¹⁾.

Hierbei kommt noch in Betracht, daß selbst da, wo eine geringe Durchlässigkeit solcher Membranen, wie z. B. an der Pleura zweifel-

1) Deshalb kann ein Auseinanderweichen der Schlußflächen auch nur unter Vermehrung der Synovialflüssigkeit eintreten, welche letztere nur langsam erfolgen wird, vgl. S. 430

los vorliegt, dennoch während des Lebens infolge von Resorptionsvorgängen die wirklich eintretenden geringen Verlagerungen von Massen rückgängig gemacht und so ausgeglichen werden, daß ein mechanischer Effekt doch nicht hervortritt.

Gehen wir nun von diesen Gesichtspunkten aus, so ist klar, daß ein mechanischer Effekt der Luftdruckerniedrigung, in unserem Fall am großen Kreislauf, nur unter der Voraussetzung wird eintreten können, erstens daß Verhältnisse vorliegen, welche bedingen, daß der Luftdruck bei einem Wechsel sich nicht auf alle Teile des Gefäßsystems in gleichem Maße geltend zu machen vermag, weil z. B. seiner Kraft andere Kräfte entgegenwirken, so daß hierdurch Stromgebiete von ungleicher Druckbelastung entstehen; sowie zweitens, daß die gleichzeitige Möglichkeit vorliegt, daß Massen (Blut) auf Grund dieser Druckunterschiede von Gebieten höheren Druckes in solche niedrigeren Druckes sich zu bewegen Gelegenheit haben. Es werden sich dann diejenigen Stromgebiete niedrigerer Druckbelastung stärker als die höherer Belastung füllen müssen, wenn wir zunächst den Tonus der Gefäßwände als konstant annehmen. Nun wurde wiederholt schon bei Besprechung der Verhältnisse des Lungenkreislaufes auf die große Bedeutung der elastischen Kraft der dehnbaren und kontraktile Gewebe als auf ein dynamisches Moment hingewiesen, das in seiner Größe unabhängig von dem Luftdruck, auch die Wirkung einer Luftdruckverminderung auf andere zu ihm entsprechend gelagerte Teile zu beeinflussen, d. h. herabzusetzen imstande ist. Daß, wenn schon eine einzelne solche gespannte Membran wie bei unserem obigen Kugelversuch¹⁾ durch ihre elastische Kraft einen Druckunterschied zu bewirken vermag, wenn der Luftdruck nur von einer Seite auf sie einwirkend, sie aus ihrer elastischen Gleichgewichtslage zu drängen genötigt ist, mehrere, ja zahlreiche solche übereinander gelagerte Membranen, auch wenn jede einzelne nur schwach auf Spannung in Anspruch genommen wird, in erhöhtem Maße hierzu befähigt sein werden, dürfte nicht zu bezweifeln sein.

Nun sind aber die Gefäße des Körpers von der Oberfläche nach dem Innern zu, je tiefer sie liegen, von um so zahlreicheren solchen elastischen Schichten von Membranen, Faszien, Sehnen, Muskeln usw. bedeckt, welche von der Peripherie nach dem Zentrum des Rumpfes, bzw. der Achse der Extremitäten hin in mannigfachster Form und Anordnung Spalträume überspannen, in welchen die Gefäße verlaufen.

1) Vgl. Fig. 2, S. 431 und Taf. I, Fig. 2.

Die Spannung dieser verschiedenen Gewebe hängt zwar zum Teil mit von der Füllung der Gefäße und dem in ihnen herrschenden Druck, aber doch auch unmittelbar von dem Tonus der Muskeln und der Spannung der Faszien und der elastischen Gewebeelemente, sowie von der osmotischen Spannung der Gewebe als solchen ab und stellt an oberflächlichen Geweben das dar, was man als den Turgor derselben bezeichnet.

Schon dieser normale Turgor der oberflächlichen Gewebe stellt an sich ein gewisses, der Wirkung einer Luftdruckerniedrigung auf die tieferen Gewebe Widerstand leistendes Moment dar. Die Spannung aller dieser verschiedenen, elastischen Widerstand leistenden Teile des Körpers wird sich bei einem gleichmäßig bestehenden Luftdruck mit demselben und untereinander in eine Gleichgewichtslage einstellen, welcher sich auch das Gefäßsystem und die Blutverteilung in demselben regulatorisch anpaßt. Ja, es muß sich dieser Einstellung zweifellos auch die Gesamtmenge des Blutes anpassen, welche der Körper zu seinem normalen Funktionieren gebraucht. Bekanntlich ist ja die normale Gesamtmasse des Blutes keineswegs hinreichend, um alle arteriellen Gefäßgebiete gleichmäßig mit einem so starken Strom, wie er für die volle Funktionsentfaltung jedes einzelnen Organes nötig ist, zu versorgen, und sie darf es auch nicht sein, da sonst eine regulatorische Herabsetzung des Blutstromes in den einzelnen Teilen, wie sie zur Erholung und assimilatorischen Restitution der ermüdeten Organe nötig ist, ausgeschlossen wäre¹⁾.

Aus diesen Verhältnissen ergibt sich die Notwendigkeit, daß durch den nervösen Gefäßregulationsapparat, jeweils unter Erweiterung der Arterien der funktionierenden Organe und entsprechender Einschränkung des Stromes in den ruhenden Organen unter Verengerung ihres Querschnittes, eine entsprechende ungleiche Verteilung der Blutmassen im Gefäßsystem erfolgt. Dabei wird das Blut stets in die Gebiete geringeren Widerstandes in größerer Menge als in jene größeren Widerstandes strömen. Nun ist aber klar, daß der Widerstand, den ein Gefäßgebiet dem unter Druck stehenden Blutstrom bietet, durch seinen Querschnitt gegeben ist, der seinerseits abhängt von dem Tonus der Wand, sowie dem auf die Wand von innen und dem auf sie von außen einwirkenden Druck, mithin muß, wenn der Tonus der Wand und der Innendruck gleich bleiben, der Außendruck aber abnimmt, unter solcher Verminderung des Widerstandes von außen eine Erweiterung der Strombahn eintreten.

1) Vgl. Jacobj, Schlafmittel. Württembg. Med. Korrespondenzbl. 1909.

Daß nun aber wirklich infolge der elastischen Widerstandskräfte der übergelagerten Gewebsschichten die Wirkung einer Luftdruckverminderung auf die Gefäße von der Oberfläche des Körpers nach der Tiefe, wie schon erwähnt, abnehmen muß, läßt sich an der Hand des in beifolgender Abbildung wiedergegebenen schematischen Versuches (vergl. Tafel I, Figur 3 und 4) auch experimentell physikalisch, wie mir scheint, in unzweideutiger Weise zeigen.

Wir haben hier, wie die photographische Aufnahme unserer Versuchsanordnung zeigt, sieben kugelförmige, je mit drei Ansatzröhren versehene, untereinander verbundene Glasräume. Während alle Teile des Systems mit ausgekochtem Wasser gefüllt sind, enthalten die aufrecht stehenden Röhren jeder Kugel an ihrem oberen Ende je eine Luftblase. Diese Blasen lassen sich von den oben befindlichen Hähnen aus genau gleich groß machen. Die beiden seitlichen Röhren der Mittelkugel Nr. 4 enden in zwei kurze, am Ende geschlossene Gummiröhren, und diese sind mittelst Gummikorken mit den nächsten links und rechts angesetzten Kugeln durch die seitlichen Tuben so verbunden, daß die blind endenden Schläuche in ihrer ganzen Ausdehnung frei in die Kugeln 3 und 5 hineinragen. In genau der gleichen Weise sind wieder die Kugeln 2 und 6 mit den Kugeln 3 und 5, und die Kugeln 1 und 7 mit 2 und 6 verbunden. Die nach links und rechts gewandten Röhren der letzten Kugeln 1 und 7 enden aber ebenfalls mit gleichen, am Ende geschlossenen Schläuchen frei in den Raum. Alle diese Schläuche sind von gleicher Elastizität, Wandstärke und dem gleichen Kaliber, auch genau von gleicher Länge, so daß alle sieben Räume untereinander und von der äußeren Umgebung durch elastische Membranen getrennt sind, welche bei gleicher Belastung gleiche Dehnungsbedingungen bieten. Der Luftdruck hat somit Gelegenheit, sich auf den Inhalt der Kugel 4 sowohl, wie auch auf den aller anderen Kugeln von beiden Seiten her geltend zu machen, soweit es nämlich jeweils die trennenden elastischen Membranen zulassen. Da das ganze System bis auf die gleich großen Luftblasen in den oberen Kugelröhren mit ausgekochtem Wasser gefüllt ist, so werden etwaige in den verschiedenen Kugelräumen auftretende Druckdifferenzen durch entsprechend ungleiche Veränderung des Volumens der Luftblasen genau zum Ausdruck gelangen können und müssen.

Bringen wir nun dieses System unter eine Luftpumpenglocke und verdünnen in derselben die Luft, so sehen wir, wie die Luftblasen sich, je mehr sie nach der Mitte zu liegen, um so weniger vergrößern. Ja, wenn alle Verhältnisse in der eben angegebenen Weise genau gleich herzustellen gelang, sehen wir, wie die Größe der Blasen in den vertikalen Röhren gesetzmäßig mit der Verminderung des Außendruckes und mit der Entfernung von beiden Enden, d. h. in gesetzmäßigem Verhältnis zu den zwischengeschalteten, bei unseren Versuchsbedingungen nahezu gleiche Elastizitätsverhältnisse besitzenden Membranen, abnimmt, wobei die Blase der mittelsten Kugel 4 so gut wie unbeeinflusst bleibt. Eine Verbindung der unteren Niveaus der Blasen ergibt dabei zwei von beiden Seiten zur Mitte ansteigende Schenkel von gesetzmäßig gekrümmter Form, wie es

unsere Abbildung 4 zeigt, d. h. es nimmt die Druckwirkung der Außenluft gesetzmäßig in den Kugeln von der Peripherie nach der Mitte hin, infolge der durch sie in Spannung versetzten Membranen ab. Wir sahen auch, wie die Vorwölbung der gespannten Membranen, von dem Ende nach der Mitte hin, immer geringer wird. Lassen wir nun wieder Luft in die Glocke eintreten, so ziehen sich die Luftblasen und ebenso die Membranen, erstere auf ihr anfänglich gleiches Volumen, letztere in ihre ursprüngliche Ruhelage wieder zusammen, wie es unsere Abbildung 3 vorführt.

Wir erhalten aber auch ein gleichartiges Resultat, wenn wir eine horizontal liegende, weite Röhre mit beiderseits nach oben aufgebogenen Enden, welche an ihrer oberen Wölbung kleine, gleich große, halbkugelförmige Vorwölbungen besitzt, so mit zäher Flüssigkeit, (dickflüssigem Kautschuk) füllen, daß in jeder Vorwölbung eine gleich große Luftblase sich befindet. Bringen wir diese Röhre unter Luftverdünnung, so dehnen sich auch hier die Luftblasen von den Enden nach der Mitte hin immer weniger aus, weil der zu überwindende Widerstand der die Röhre füllenden elastischen Masse nach der Mitte hin mit ihrer Schichtdicke wächst.

Ja, würde man aus einer homogenen, elastischen, durchsichtigen Masse eine Kugel herstellen, in welcher sich gleich große Luftblasen von der Peripherie nach dem Zentrum angeordnet finden, so würden auch diese bei Herabsetzung des Luftdruckes, je zentraler sie liegen, eine um so geringere Volumenzunahme zeigen.

Diese Versuche dürften beweisen, daß die Wirkung einer Erniedrigung des äußeren Luftdruckes bei einem System symmetrisch oder auch konzentrisch angeordneter, einer Volumensänderung fähiger Hohlräume, welche von außen nach innen durch gespannte Membranen oder elastische Massen getrennt sind, auf die zentralen Teile um so geringer zur Geltung gelangen wird, je mehr Kraft zur Dehnung der übereinander gelagerten Membranen oder elastischen Massen verbraucht wird. Ist dies aber der Fall, so werden auch in unserem Körper, je nach der Anordnung der Gewebe, in entsprechend modifizierter Weise die Wirkungen des Luftdruckes auf die Blutgefäße und deren Inhalt, je tiefer die Gefäße unter der Oberfläche liegen und je besser die Gewebsspalten, in denen sie verlaufen, nach der Peripherie hin durch überspannende Membranen abgeschlossen sind, sich um so geringer geltend machen, d. h. es werden die oberflächlichsten Gefäße der Luftdruckerniedrigung am umfänglichsten und schnellsten sich anpassend, unter Aufnahme von Blut erweitern, während, je tiefer und abgedeckter die Gefäße liegen, sie um so weniger durch die Luftdruckschwankung beeinflußt werden.

Gelingt es also, den Einfluß des die Verteilung des Blutes auf die in Frage kommenden Stromgebiete regulierenden nervösen Apparates ohne zu starke Herabsetzung des Blutdruckes auszuschalten, so werden sich dann, entsprechend diesen physikalischen Verhältnissen, die oberflächlichen Gefäße bei einer Luftdrucksenkung stärker füllen müssen als die tiefer liegenden. Es werden sogar eventuell ganz zentral verlaufende Arterien, z. B. solche, welche zwischen von Faszien überspannten Knochen liegen oder im Knochen selbst verlaufen, in ihrem arteriellen Druck und in ihrer Füllung von Luftdruckschwankungen hinsichtlich einer unmittelbaren Einwirkung auf ihre Wandspannung von außen so gut wie unbeeinflußt bleiben können. Die von Herrn Nick bei seinen Versuchen in der vorstehenden Arbeit an den Gefäßen der Froschschwimmhaut beobachteten Veränderungen stehen mit dem Ergebnis der eben beschriebenen schematisch-physikalischen Versuche und den sich aus ihnen ergebenden Schlußfolgerungen somit im besten Einklang. Es ist klar, daß gerade die Gefäße der Schwimmhaut ganz besonders günstige Verhältnisse für das Hervortreten solcher Oberflächenwirkung bieten, da sie ja von beiden Seiten unmittelbar unter der Haut liegen. Es ist auch klar, warum, wenn die Veränderungen an den Gefäßen deutlich hervortreten sollen, darauf geachtet werden muß, daß die Schwimmhäute möglichst wenig beim Ausbreiten angespannt werden, worauf ja auch Nick ausdrücklich hinweist.

Nach dem im Vorhergehenden Dargelegten müssen die erweiternden Wirkungen der Luftdruckerniedrigung auf solche oberflächliche Gefäße aber auch um so deutlicher sich zeigen, je weniger die Gefäßnervenzentren ihren regulatorisch ausgleichenden Einfluß geltend zu machen vermögen. In der Tat lassen ja auch diejenigen Versuche Nicks, bei welchen es gelang, den Einfluß des Gefäßnervenzentrums durch Kurare bei noch eben gut erhaltener Zirkulation möglichst weit auszuschalten, eine anhaltende Gefäßerweiterung am deutlichsten hervortreten. Den kompensatorischen Ausgleichsvorgang bei noch regulierendem Gefäßnervensystem zeigen uns aber jene Versuche Nicks, bei welchen unter Überkompensation sichtbare Verengerung der Gefäße zunächst eintritt, worauf dann sich in Bälde die Gefäße nach geringem Nachlassen ihres Tonus unter die Norm auf dieselbe wieder einstellen. Diese Versuche lehren aber auch, daß der ganze Regulationsvorgang, sofern der Gefäßnervensystem gut funktioniert, sehr schnell abläuft. Bei nur kurz anhaltender Luftdruckerniedrigung braucht deshalb ein äußerlich wahrnehmbarer Effekt weder unter dem Bilde einer Hyperämie der oberflächlichen

Teile, etwa unter Rötung der Haut oder der Schleimhäute, hervortreten, noch wird sich auch zunächst die Beeinflussung der Zirkulation in einer Blutdruckänderung ausgesprochen und anhaltender geltend machen müssen. Trotzdem keine länger anhaltenden und äußerlich wahrnehmbaren Veränderungen an der Zirkulation selbst zu konstatieren sind, bedingt doch die Luftdruckerniedrigung eine wichtige Veränderung, nämlich eine solche in der Funktion des nervösen Gefäßapparates, durch welche dieser unter Umständen recht stark in Anspruch genommen wird, da er den Tonus der Gefäßmuskeln der oberflächlichen Gefäße um so viel höher eingestellt zu erhalten hat, als der Verminderung der Kraft, mit welcher die verdünntere Luft auf die Außenseite der Gefäße drückt, entspricht.

Unter solchen Umständen werden die negativen Resultate leicht erklärlich, welche Loewy¹⁾ bei seinen Versuchen erhielt, bei denen er die Blutstromgeschwindigkeit am Tiere bei normalem und vermindertem Luftdruck in der pneumatischen Kammer untersuchte. Es erscheinen diese Versuche, wie schon erwähnt, in ihrer Anordnung zu kompliziert und dadurch zu schwer zu übersehen, als daß bei ihnen gesichert eine so kurze und geringe Veränderung in der Zirkulation durch die Luftdrucksenkung, wie wir sie konstatierten, hätte hervortreten können.

Daß bei schnellem Wechsel des Luftdruckes für kurze Zeit der Blutdruck tatsächlich beeinflusst werden kann, zeigen ja die Nickschen Versuche. Freilich ist dabei zu berücksichtigen, daß die Herabsetzung des Luftdruckes in einer großen pneumatischen Kammer für Menschen, wie sie Loewy anwandte, nicht so schnell erreicht werden kann, wie es in unserer kleinen, für den Frosch konstruierten pneumatischen Kammer von etwa $\frac{5}{4}$ Liter Inhalt möglich war, und wo eine halbe Minute genügte, um den Druck auf die Hälfte der Norm herabzusetzen.

Es wird nach dem Gesagten aber auch begreiflich erscheinen, daß die Wirkungen der Druckerniedrigung auf die Zirkulation, sowohl im Höhenklima und in der pneumatischen Kammer, als bei Ballonfahrten und zumal bei schnellem Druckwechsel sehr verschieden bei verschiedenen Menschen ausfallen werden, je nachdem das einzelne Individuum einerseits über eine größere oder geringere Blutmenge verfügt, andererseits sein nervöser Regulations- und sonstiger Gefäßapparat schnell und ausgiebig oder träge und mangelhaft

1) Loewy, Dr., *Respiration und Zirkulation bei Änderung des Druckes*. Berlin 1895, S. 108 ff.

reagiert und funktioniert. Auch ist ohne weiteres verständlich, daß bei einem unter dem Einfluß einer durch Anpassung in ihrer Wirkung noch nicht ausgeglichenen Luftverdünnung stehenden Individuum stärkere Körperbewegung den Eintritt von Zirkulationsstörungen besonders begünstigt. Kommt es doch bei Bewegungen zu erheblicher Verstärkung des Blutstromes durch die tätigen Muskeln, wodurch dem regulierenden Gefäßnervenapparat der erforderliche Ausgleich der Blutverteilung ganz besonders erschwert wird, so daß er, ihn nach allen Seiten zu erreichen, unter Umständen außerstande sein wird. In diesem Falle kann es dann zum Absinken des Blutdruckes und eventuell zu anämischen Störungen in einzelnen Funktionsgebieten, wie man sie ja im Bilde der Höhenkrankheit beobachtet, kommen, auch wenn das Absinken des Sauerstoffpartialdruckes an sich solchen Effekt noch nicht bedingen würde. — Man wird sich aber auch nicht wundern können, wenn gelegentlich in derartigen Fällen infolge einer sehr energischen überkompensatorischen Tätigkeit des Regulationsapparates es an der äußeren Haut sogar statt zu der an sich zu erwartenden Erschlaffung der Gefäße und Hyperämie, vielmehr zum Erblassen der Haut kommt. In diesem Fall würden wir eben ähnliche Verhältnisse haben, wie sie Niek bei seinen Versuchen an Fröschen beobachtete, deren Gefäßregulation noch nahezu normal erhalten war, und bei denen er konstatieren konnte, daß zunächst sogar eine nicht unerhebliche Verengung der Gefäße eintrat, die allerdings hier nur kurz dauerte, aber sogar zu Blutdrucksteigerung führen kann, wie er nachwies und auch schon Arons¹⁾ Versuche zeigen.

Die Erscheinung eines solchen, offenbar auf regulatorischer Überkompensation beruhenden auffallenden Erblassens der Haut habe ich an Bekannten und mir selbst einmal kurze Zeit nach Ankunft im Engadin, wo also noch keine Anpassung erfolgt war, bei der Besteigung des Piz Languard auf der letzten Strecke von 300 m sehr schön zu beobachten Gelegenheit gehabt; es schwand diese Hautanämie sofort, als nach kurzem Aufenthalt auf der Spitze man zu einer Höhe von 3000 m wieder abgestiegen war und rastete.

IV. Erklärung einiger physiologischer Erscheinungen im Höhenklima auf mechanischer Wirkungsgrundlage.

Fragen wir nun, ob und inwieweit sich die verschiedenen Wirkungen des Höhenklimas auf Grund der im Vorhergehenden dargelegten physikalischen Verhältnisse als auf mechanischem Einfluß

1) Dr. E. Aron, Virchows Archiv Bd. 143, S. 410.

der Luftdruckerniedrigung beruhend, auffassen lassen, so dürfte, wie wir gleich zeigen werden, in der Tat wohl die Möglichkeit vorliegen, alle im Höhenklima unter 2000 m auftretenden und als Folgen der Luftdruckerniedrigung anzusehenden Erscheinungen allein auf Grund des geschilderten mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung ohne Schwierigkeit zu erklären. Sowohl für den günstigen und störenden Einfluß dieses Höhenklimas auf den normalen Menschen, als auch für die erfolgreiche therapeutische Verwendung desselben bei den verschiedensten Krankheiten läßt sich die mechanische Seite der Wirkung der Luftdruckerniedrigung als der wesentliche Faktor ansprechen. Es wäre also auch nicht mehr nötig, die doch wohl von den meisten Ärzten bisher mit einem gewissen Gefühl innerer Unbefriedigtheit¹⁾ akzeptierte Deutung beizubehalten, daß die Erfolge unserer Höhenkurorte vor allem auf einem, wenn auch nicht subjektiv sich bemerkbar machenden ungenügenden Sauerstoffgehalt der Luft, d. h. auf einer schwachen Erstickung beruhen.

Aber auch bei größeren Höhen dürften neben dem hier ja zweifellos vor allem bedeutsamen Absinken des Sauerstoffpartialdruckes mit seinen sich für die innere Atmung und den Chemismus des Organismus ergebenden Konsequenzen die geschilderten Folgen des mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung doch auch mit von Bedeutung sein, so daß für eine wirklich sachgemäße vollständige Erklärung der Gesamterscheinungen auch hier dieser Faktor nicht wird entbehrt werden können. Festzustellen, inwieweit unter verschiedenen Bedingungen der eine, inwieweit der andere Faktor in solchen größeren Höhen jeweils überwiegend in Betracht kommt, wird selbstverständlich Schwierigkeiten bieten, und wird besonderer Untersuchungen bedürfen.

Es möge aber trotz des engen Rahmens, in welchem eine Darstellung wie die vorliegende sich zu halten hat, doch gestattet sein, in Kürze zu versuchen, die Erklärung wenigstens einiger der wichtigsten Wirkungen des Höhenklimas auf Grund des von uns dargestellten mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung zu geben.

Blutveränderung.

Als die bedeutsamste der im Höhenklima auftretenden Erscheinungen wird zurzeit wohl die Veränderung betrachtet, welche das

1) Daß auf Grund der zurzeit herrschenden Anschauungen, d. h. bei Ignorierung des mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung, für das Zustandekommen der Mehrzahl der therapeutischen Erfolge des Höhenklimas jede physiologische Erklärung fehlt, gibt neuerdings sowohl Cohnheim, a. a. O. S. 654, als Morawitz, a. a. O. S. 5 unumwunden zu.

Blut in seiner Zusammensetzung und zwar schon beim Übergang des Menschen aus dem Flachland in Höhenlagen wie die von Davos und Arosa von 1500—1800 m erfährt. Daß diese Veränderungen, welche sowohl in einer Vermehrung der roten Blutkörperchen und des Hämoglobingehaltes, als auch in dem Auftreten verschiedener (Entwicklungs-) Bildungsvorstufen der roten Blutkörperchen bestehen, in gesetzmäßiger Aufeinanderfolge nach dem Übergang in die erwähnten Höhen auftreten, ist in neuester Zeit wieder durch die äußerst sorgfältigen und unter schärfster Kritik der angewandten Methoden von Bürker¹⁾ ausgeführten Untersuchungen zweifellos bewiesen.

Bürker kommt zu dem Ergebnis, daß bei der Blutveränderung es sich offenbar um zwei zeitlich und dem Wesen nach verschiedene Vorgänge handelt. Nämlich einerseits um eine sofort mit dem Höhenwechsel einsetzende, starke Vermehrung der Blutkörperchen und des Hämoglobins, welche noch besonders durch ein stärkeres Auftreten von Bildungsvorstufen der Blutkörperchen charakterisiert ist, und von ihm auf ein akutes Inzirkulationstreten bereits vorhandener, an den Bildungsstätten zurückgehaltener Blutreserven zurückgeführt wird, andererseits, um eine sich dann später anschließende, bis zur Erreichung der neuen Einstellung allmählich abnehmende, gesteigerte Blutneubildung.

Beide Vorgänge betrachtet Bürker als durch den Reiz ausgelöst, welchen, infolge des mit der steigenden Höhe verminderten Sauerstoffpartialdruckes der Luft die ungenügende Sauerstoffversorgung auf die Bildungsstätten des Blutes ausübt.

Es fragt sich nun aber, lassen sich die vorliegenden Erscheinungstatsachen nicht auch, unabhängig von der doch immerhin im Verhältnis zur Blutvermehrung geringen Herabsetzung des Sauerstoffpartialdruckes in den Alveolen, auf Grund der mechanischen Wirkung der Luftdruckerniedrigung erklären, welche zu den geschilderten Veränderungen der Blutverteilung und des Blutstromes führen. Es ist zunächst klar, daß der gleiche Reiz des Sauerstoffmangels, wie er auf die Gewebe bei unvollkommener Sättigung des Bluthämoglobins in den Lungen zur Wirkung kommt, auch ebensowohl wird entstehen können und müssen, wenn bei gleich bleibenden Verhältnissen des Gaswechsels in der Lunge die Zeit, in der eine bestimmte Blutmenge die Lunge passiert, zunimmt, wie es bei unverändertem Blutbestand des Körpers, wie erwähnt, durch eine Erweiterung der Lungenstrombahn an sich schon der Fall sein wird. Nun kommt aber hinzu,

1) Bürker, Die physiologischen Wirkungen des Höhenklimas. Zeitschr. f. Biologie Bd. 61, N. F. 43, S. 379 ff.

daß auch im großen Kreislauf unter der mechanischen Wirkung der Luftdruckerniedrigung die oberflächlichen Gefäßgebiete zu stärkerer Füllung neigen. Es wird also eine gewisse Blutmenge in diesen beiden Stromgebieten länger verweilen, da bei der verbreiterten Strombahn auch die Stromgeschwindigkeit herabgeht, und so der Zirkulation und damit der inneren Atmung entzogen.

Wir hätten somit hier den gleichen Effekt, wie ihn eine Blutentziehung oder sonstige Einschränkung der Ausnützung des vorhandenen Hämoglobins zur Sauerstoffübertragung in die Gewebe mit sich bringt.

In der Tat haben ja auch z. B. die Versuche Bürkers mit künstlichem Pneumothorax, und diejenigen von O. Bruns¹⁾ mit der Unterdruckatmung, bei welcher der mechanische Faktor als wesentlich ja allgemein anerkannt wird, eine gleichartige Veränderung im Blutbilde ergeben. Freilich bleibt dabei unerklärt, wie der Reiz des Sauerstoffmangels in den Geweben zu dem plötzlichen Inzirkulation-treten der Blutelemente aus den Depots der Bildungsstätten Veranlassung geben soll. Daß, wenn es sich wirklich dabei um eine Ausspülung handelt, diese doch wohl im Grunde nur auf Wirksamwerden mechanischer Kräfte zurückzuführen sein wird, dürfte kaum zu bezweifeln sein.

Nun habe ich vor einiger Zeit in einer kleinen Betrachtung²⁾ über den Funktionsmechanismus der Nieren darauf hingewiesen, daß bei der Harnbildung vielleicht das Wirksamwerden eines sogenannten hydraulischen Widerstoßmechanismus im Glomerulus als ein für den Blutstrom in der Niere, zumal im zweiten Kapillarnetz wichtiger Faktor mit in Betracht kommt, bei welchem der Verlauf der Puls-welle, mithin der Tonus der Gefäßwand eine bedeutsame Rolle spielt. Man könnte sich denken, daß ein ähnlicher Mechanismus für den Blutstrom im Knochenmark in Betracht käme, der zu stärkerer Durchströmung desselben und hierdurch zur Ausspülung der bereits mobilen Teile führte. Auf die Art dieses Mechanismus hier näher einzugehen würde zu weit führen. Die Behandlung dieser Frage möchte ich deshalb einer späteren Mitteilung vorbehalten.

Käme solcher Mechanismus in Frage, so wäre es auch denkbar, daß das bloße Auftreten einer gewissen, den Pulsablauf ändernde Erschlaffung der Arterienwand, wie sie ebensowohl unter Verminderung des von außen auf die Gefäße wirkenden Druckes, wie durch ungenügende Sauerstoffspannung im Blut entstehen kann, zu einem verstärkten Blutstrom durch das Knochenmark und damit zu

1) O. Bruns, Med. Klinik 1913, Nr. 42.

2) Münchner Med. Wochenschr. 1911, Nr. 36, Zur Mechanik der Nierensekretion.

einer Art Ausspülung desselben führt. Es wäre damit der sogenannte blutbildende Reiz der Sauerstoffverarmung des Blutes auf eine mechanische Veränderung in der Zirkulation zurückgeführt, welche auf ganz verschiedenen primären Grundlagen zustande kommen könnte. Wir hätten also unter diesen Umständen für die in Frage kommenden Möglichkeiten der Beeinflussung zwar verschiedene Ursachen, die aber im Grunde dann doch auf den gleichen Mechanismus einer besseren Durchspülung des Knochenmarks hinauslaufen würden.

Atmung.

Was nun weiter die Atmung betrifft, so würde sich, wie schon erwähnt, die allgemein anerkannte Abnahme der Vitalkapazität bei absinkendem Luftdruck mit der schon von Saussure und den alten Naturforschern angenommenen, später auch von Kronecker wieder vertretenen und im Eingang dieser Mitteilung von uns noch einmal physikalisch eingehender begründeten stärkeren Füllung der Lungengefäße erklären, welche den Alveolarraum verengert und zugleich die Dehnbarkeit des Lungengewebes herabsetzt.

Vielleicht könnte auch in Fällen sehr akuten Druckwechsels eine Verminderung der zentralen Innervation der Muskeln und ihrer eigenen Kontraktionsenergie in Frage kommen, welche infolge der stärkeren Füllung der Lungen und, wie wir ja gesehen haben, der oberflächlichen Arterien und wohl auch der Venen mit Blut entsteht, da es so im großen Kreislauf, speziell für den nervösen Zentralapparat und die Muskeln wohl zu einer gewissen Anämie kommen kann, besonders bei solchen Individuen, deren Gesamtblutmenge gerade an der unteren Grenze der Norm oder gar unter derselben liegt. Daß solche anämische Störungen der Atmung auch sonst bei stärkerer Inanspruchnahme der Muskeln und unter Bedingungen, welche das Gefäßnervenzentrum zwingen, einzelnen Gebieten, z. B. auch dem der Haut, des Darms usw. größere Mengen Blut zuzuführen, verstärkt auftreten werden, ist klar. Ebenso wird aber auch noch die Herabsetzung des Sauerstoffpartialdruckes als ein um so wesentlicheres Moment für Veränderungen in der Funktion der Atmung in Frage kommen, um je größere Höhen es sich handelt.

Als Grund für die in den verschiedenen Funktionen nach einiger Zeit durch Anpassung eintretende Rückkehr zur Norm dürfte wohl vor allem, aber doch nicht ausschließlich, die sich einstellende Blutvermehrung anzusehen sein, welche dann wieder eine normale Blutverteilung trotz der dauernden Vergrößerung des Volumens der Strombahn dem Körper erlaubt. In ihr ist wohl auch vor allem der Grund

für die Rückkehr der zunächst beschleunigten Atmung zur Norm zu sehen. Wenn nach einiger Zeit trotz der fortbestehenden stärkeren Blutfüllung der Lungen die Vitalkapazität wieder auf das normale Maß steigt, so ließe sich dies wohl einerseits auf eine Aktivitätshypertrophie der Atemmuskulatur, vielleicht auch mit auf eine erleichterte und erweiterte Beweglichkeit der Rippen in ihren Gelenken¹⁾, welche eine stärkere Volumensänderung des Thorax ermöglichen, andererseits auf eine Steigerung der Dehnbarkeit des unter der stärkeren Volumensänderung des Thoraxraumes stärker auf Dehnung in Anspruch genommenen Lungengewebes zurückzuführen. So wird die anfängliche Verkleinerung der Alveolenräume ausgeglichen und nun auch der Nutzeffekt der Durchblutung der Lunge für den Gaswechsel des Blutes bei bestehenbleibender Hyperämie voll zur Geltung gelangen können.

Ob die kompensatorische Anpassung der Atmung mehr durch Vermehrung der Atemfrequenz oder durch Vergrößerung des Einzelvolumens jeweils erreicht wird, wird wiederum individuell verschieden sein, und je nach der disponiblen Blutmenge und der Gefäßregulationsbreite, sowie auch je nach der Leistungsfähigkeit der gewöhnlichen und der regulatorischen Ausgleichfähigkeit der auxiliären Atemmuskulatur schwanken. Deshalb wird hier eine durch Übung bereits gewonnene gesteigerte Breite der Anpassungsfähigkeit sich geltend machen.

Da die in größeren Höhen von über 3000 m eintretende Lockerung der Gelenke eine größere Inanspruchnahme der Muskeln bedingt, so wird infolge der hieraus sich ergebenden Steigerung der Arbeitsleistung auch der Stoffwechsel zunehmen, und infolge der damit nötig werdenden vermehrten Kohlensäureausscheidung auch die Atmung wieder gesteigert werden, und dies muß in besonders prägnanter Weise beim Gehen und Steigen hervortreten. Die mit diesen an die Muskulatur gestellten höheren Anforderungen sich allmählich einstellende Arbeitshypertrophie der Muskeln wird aber auch zu Eiweißansatz im Körper und zu einer entsprechenden Änderung in der Stoffwechselbilanz führen können, wie sie Zuntz und seine Mitarbeiter²⁾ tatsächlich beobachteten.

Herz und Gefäßsystem.

Auch die funktionellen und die aus ihnen sich ergebenden anatomischen Änderungen am linken und rechten Herzen lassen sich sehr wohl in Beziehung zu der veränderten Blutverteilung, wie wir sie

1) Vgl. das in der Deutsch. med. Wochenschr. 1907 Nr. 1 über Gelenke Gesagte.

2) Vgl. a. a. O., S. 288.

als Folge des mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung schilderten, setzen. Um den Blutdruck in den Arterien auf normaler Höhe zu halten, wird vom Herzen mehr Blut gefördert werden müssen, da in der Höhe dem Gefäßnervenzentrum allein bei der Tendenz geringerer Spannung auch in den ausgedehnten oberflächlichen Kapillargebieten, welche dem Nerven einfluß entzogen sind, es meist nicht gelingen wird, längere Zeit hier die Strombahn entsprechend einzuengen.

Wenn also beim Übergang in die Höhen die Pulszahl steigt, können wir dies als eine Folge des geringeren Widerstandes im arteriellen System sehr wohl ansehen, wobei aber auch gleichzeitig in Betracht kommt, daß das Herz bei der relativ im Verhältnis zum erweiterten Gefäßsystem verminderten Blutmenge diesen Mangel an Blut durch beschleunigte Schlagfolge ausgleichen muß, um die nötige Stromgeschwindigkeit in den Arterien und Kapillaren zu erreichen.

Es ist klar, daß unter diesen Umständen gleichzeitige Muskelarbeit die Pulszahl noch erheblicher steigern wird, da mit der Tätigkeit der Muskeln der Blutstrom in ihnen eine bedeutende Verstärkung erfährt, so daß es dann dem Gefäßzentrum wesentlich erschwert wird, durch kompensatorische Verengung anderer Stromgebiete den zur Erhaltung des Blutdruckes nötigen Ausgleich allein zu erreichen, so daß dann die Mithilfe einer gesteigerten Herzarbeit noch umfänglicher nötig wird.

Hierauf ist es dann wohl auch vornehmlich mit zurückzuführen, daß die sphygmographische Pulscurve, welche in der Höhe bei völliger Ruhe meist keine nennenswerte Abweichung von der Norm zeigt, weil hier ein kompensatorischer Ausgleich noch möglich ist, bei Bewegungen und vor allem bei Marschleistungen sehr bald die bekannte Ermüdungsform zeigt, welche infolge der ungenügenden Füllung der Radialis bei Herabsetzung ihrer Wandspannung entsteht. Das Herz ist dann eben nicht mehr imstande mit der zur Verfügung stehenden Blutmenge trotz Beschleunigung des Pulses in dem Gefäßsystem die nötige Füllung zu erreichen, weil die erweiterten Lungengefäße, oberflächlichen Arterien und Venen und dann auch die Muskelgefäße in sich zu viel Blut aufnehmen, als daß dies vom Gefäßzentrum aus ausgeglichen werden kann.

Diese Form der Ermüdungskurven treten nach Kronecker aber offenbar mehr bei schwächlichen, d. h. wohl auch anämischen Menschen auf, während stärkere, blutreichere Individuen die normale Form unter gleichen Bedingungen noch zeigten¹⁾.

1) Vgl. Kronecker, Kurven. Die Deutsche Klinik, Leyden, Bd. 11, 1907, S. 107 u. ff.

Nun hat man bekanntlich auch eine Vergrößerung des rechten Herzens beobachtet, und es fragt sich, ob auch diese mit der von uns dargetanen veränderten Blutverteilung und Zirkulation sich in Beziehung bringen läßt. Zunächst dürfte klar sein, daß nach unserem oben gegebenen Schema Fig. 3, ebenso wie in den Lungengefäßen, infolge der Herabsetzung des intrathorakalen Druckes auch das Blut aus der Leber und den Bauchvenen in das rechte Herz stärker angesaugt und dieses stärker gefüllt wird. Es kommt aber hinzu, daß sich die Venen, zumal die oberflächlichen, bei der größeren Durchlässigkeit der Kapillaren (vgl. Nick) schneller füllen werden. Wenn nun noch infolge der veränderten Arterienpulsschwankung bei Bewegung die Entleerung der Venen nach dem Herzen zu, wie ich es andern Orts¹⁾ darlegte, verstärkt wird, auch vielleicht noch bei Bewegungen der Braunesche Venenpumpmechanismus²⁾ wirksam sich geltend macht, so wird dann dem Herzen eine so große Blutmenge, zumal nach erfolgter Anpassung der Blutmasse an die Höhe, zugerieben werden, daß es sowohl zu einer Dehnung des rechten Herzens, wie zu einer Vergrößerung seiner Arbeit kommt, die dann sehr wohl zu einer Hypertrophie unter Erweiterung des Ventrikels führen kann, wie man sie beobachtet, ja sogar bei gewissen Hochgebirgstieren neuerdings³⁾ als Regel gefunden hat. Die Grundlage ihres Entstehens würde also eine ähnliche sein, wie sie auch für die des Münchener Bierherzens in Frage kommen dürfte, nämlich eine Volumenzunahme des Blutes bei Herabsetzung des Gefäßtonus, stärkerer Füllung der Venen und so beschleunigter Zirkulation.

Werden nun aber durch Muskelbewegungen die eben erwähnten, für den Venenrückstrom nach Braune so wichtigen Sehnen und Faszienspumpapparate in Tätigkeit gesetzt, und wird durch Streckung der vorher erschlafften Venen ihr Blut gewaltsam dem Herzen zu entleert, wie dies in akuter Weise beim Bergsteigen und Klettern vorkommen wird und muß, so werden durch die hierbei leicht eintretende Überlastung des rechten Herzens, ehe Kompensation eingetreten ist, sehr wohl auch Unregelmäßigkeiten der Herzttätigkeit auf Grund einer Ermüdung eintreten können, wie man sie ja, zumal auch bei Gebirgstouren in größeren Höhen unter entsprechenden Bedingungen nicht selten auftreten sieht, da hier dann durch die

1) Vgl. Jacobj, Württemb. Med. Korrespondenzblatt 1909, Zur Pharmakol. d. Schlafmittel.

2) Braune, Festgabe f. Karl Ludwig 1874, Vogel, Leipzig, S. 1, ff.

3) J. Strohl, Die Massenverhältnisse des Herzens im Hochgebirge, 1910, zitiert nach Heger a. a. O.

Dehnung und die Überlastung, welche das Herz erleidet, es in der für seine Restitution so wichtigen diastolischen Ruhepause beeinträchtigt wird¹⁾.

Es ergibt sich aber auch noch hinsichtlich des Gefäßsystems ein neuer Gesichtspunkt von Wichtigkeit. Wie das Atemzentrum wird auch das Gefäßnervenzentrum, wie Nick es in seinen Versuchen demonstriert hat, sofort mit der Luftdruckerniedrigung in kompensatorische, regulierende Tätigkeit treten. Auf längere Zeit wird es ihm aber nicht möglich sein, durch Steigerung der Innervationsenergie den Ausgleich allein zu bewirken und aufrecht zu erhalten, vielmehr werden zu einer wirklich erfolgreichen, dauernden Anpassung auch die Erfolgsorgane, d. h. die Gefäße selbst unter Vermehrung ihres funktionellen Gewebes sich stärker entwickeln müssen. So wird es, wie anzunehmen, am Gefäßapparat, als ein den nervösen Gefäßtonus unterstützendes Moment, dazu kommen, daß eine Aktivitätshypertrophie auch der Gefäßmuskulatur²⁾ in den zur stärkeren Erweiterung neigenden Gefäßgebieten eintritt.

Durch solche Verstärkung der Gefäßwand würde dann die übermäßige Dehnbarkeit und Erschlaffung der Gefäße, soweit sie nicht durch die vermehrte Blutmenge ausgeglichen wird, beseitigt werden, womit dann alle funktionellen Teile sich angepaßt hätten.

Daß eine solche regulatorische Inanspruchnahme und Anpassung des zentralen und peripheren, der Luftdruckschwankung ausgesetzten Gefäßapparates (Haut, Schleimhäute, Darm) bei den verschiedensten Erkrankungen und Krankheitsdispositionen therapeutisch nicht ohne Interesse wäre, zumal in solchen Fällen, welche mit atonischen Zuständen dieser Gefäßgebiete verbunden sind, liegt auf der Hand. Aber auch für den Gesunden wird eine solche Verbreiterung des Anpassungsvermögens seines oberflächlichen Gefäßapparates sich als ein seine Leistungs- und vor allem seine Widerstandsfähigkeit im allgemeinen steigernder Effekt erweisen.

Ein längerer Aufenthalt in größeren Gebirgshöhen würde also auch nach dieser Richtung für Kranke und Gesunde von Nutzen sein können. Unter diesem Gesichtspunkt würde dann aber auch ein wiederholter, ja regelmäßiger Wechsel des Aufenthaltes hinsichtlich der Höhe, d. h. eine periodisch immer nur für kurze Zeit gesteigerte Inanspruchnahme der nervösen Gefäßregulationsapparate, wie es bei

1) Vgl. Arch. f. exper. Path. u. Pharmacol. Bd. 44, S. 394 u. 395.

2) Vgl. U. Friedmann, Virchows Arch. 1900, Bd. 159, S. 541, Veränderung kleiner Arterien bei Nierenerkrankung.

täglichem Auf- und Absteigen bei Gebirgstouren erfolgt, im Sinne einer Gefäßgymnastik ein nicht unerhebliches therapeutisches und allgemein hygienisches Interesse gewinnen. Ja, selbst beim Wechsel der Höhe ohne aktive Bewegung beim Hinauf- und Hinabfahren mittelst Wagen oder Eisenbahnen, z. B. auch unter Verwendung der modernen Bergbahnen der Schweizer und Tiroler Gebirge ließe sich diese Gymnastik heutzutage bei zum Bergsteigen zunächst noch nicht befähigten Individuen ohne Schwierigkeit zur Wirkung bringen. Solche periodische, systematisch durchgeführte Höhenwechsel im Sinne einer Gefäßnerven- und Gefäßmuskel- ja Herzgymnastik werden für Gesunde, wie bei verschiedenen krankhaften Zuständen von Nutzen sein, indem sie, zumal auf den Hautgefäßapparat ähnlich wie das Sool- und Seebad wirken, mit denen ja die Höhenkuren in ihrer Wirkung so manche Ähnlichkeit haben. Solche Höhenwechsel könnten, systematisch verwendet, somit einen in seinem Wert nicht zu unterschätzenden neuen Kurfaktor unserer modernen klimatischen Gebirgskurorte darstellen, hinsichtlich der Hautgefäße, auf ähnlicher Grundlage, wie dies seinerzeit im Entwurf zur Einleitung zum Deutschen Bäderbuch¹⁾ eingehender für die Sool- und Seebäder dargelegt wurde. Auch die Terrainkuren im Hochgebirge würden damit eine ganz neue Seite therapeutischer Bedeutung gewinnen.

Verdauungsapparat.

Auch die in dem Gebiete des Verdauungsapparates zunächst auftretenden Störungen und die dann später vorteilhafte Steigerung seiner Funktionen lassen sich in kausalen Zusammenhang mit der durch die Luftdruckerniedrigung mechanisch bewirkten, veränderten Blutverteilung bringen.

Gerade das System der Vena portae ist es ja, welches auf einen sehr ausgiebigen Blutstrom angewiesen ist, so daß bei ungenügender Blutzufuhr und unvollkommenem Gefälle hier Störungen, sowohl des Verdauungsvorganges als der Darmbewegungen und Resorptionsvorgänge sehr leicht Platz greifen werden. Nun wird aber bei Absinken des Luftdruckes, zumal bei Leuten mit schlaffen Bauchdecken, die Druckerniedrigungswirkung sich auch auf die Bauchgefäße unter Verbreiterung ihrer Strombahn zweifellos nach den oben besprochenen Verhältnissen geltend machen, und zwar vor allem im Gebiet der Vena portae, welche sich in das zweite Kapillarnetz der Leber auf-

1) Vgl. Entwurf zur pharmakolog. Einleitung f. d. deutsche Bäderbuch 1906, S. 16 und 62 und Einleitung z. deutschen Bäderbuch, S. LXX.

löst. Die Bedingungen für eine Ansammlung von Blut im Mesenterialvenensystem sind somit besonders günstige. Es wird freilich auch hier wohl der Splanchnikus durch Verengung der Mesenterialarterien bis zu einem gewissen Grad die Blutzufuhr kompensatorisch regulierend herabsetzen können. Aber das Blutstromgefälle in den Kapillaren des Darmes und seinen drüsigen Apparaten, welches durch die stärkere Füllung der Mesenterialvenen herabgesetzt ist, wird durch solche Verengung der zuführenden Arterien, da durch sie eine weitere Blutdrucksenkung in den kleinen Endarterien entsteht, nur noch mehr geschädigt werden. So wird es leicht zu einer kapillären und venösen Hyperämie kommen. Sie wird, wie man dies ja auch bei ungenügender Zirkulation und venöser Hyperämie in den Bauchorganen aus anderen Gründen sieht, zu vermehrter Peristaltik, eventuell zu Übelkeit und Erbrechen, häufiger zu Durchfällen führen, falls nämlich genügende Flüssigkeitsmengen im Darne vorhanden sind. Bei den so entstehenden Zirkulationsverhältnissen werden auch die Sekretions-, ebenso wie die Resorptionsvorgänge, welche beide einen starken Kapillarstrom mit gutem Gefälle voraussetzen, notleiden, so daß man sich nicht wundern kann, wenn in den ersten Tagen des Aufenthaltes im Höhenklima viele Individuen den Appetit verlieren und ihre Verdauung unter Neigung zu Durchfällen gestört ist.

Es werden solche Störungen leichter hervortreten bei Individuen mit geringer Blutmenge und unvollständiger Gefäßregulationsbreite, aber auch dann, wenn die Muskeln infolge stärkerer Inanspruchnahme gleichfalls eine Verstärkung ihres Blutstromes beanspruchen. Freilich wird bei Touristen, welche sofort in der Höhe marschieren, infolge des dann leicht eintretenden umfänglicheren Wasserverlustes durch Verdunstung und auch infolge der zunächst eintretenden Tendenz des Organismus, die Flüssigkeitsmenge des Blutes behufs leichter Füllung des auch durch die Muskeltätigkeit erweiterten Gefäßsystems zu vermehren bei gleichzeitiger Herabsetzung der Funktion der ihr Sekret in den Darm ergießenden Drüsen, es zu vorübergehender anfänglicher Anhaltung des Stuhlganges kommen können, und erst am zweiten oder dritten Tage des Aufenthaltes im Höhenklima wird sich dann die Neigung zu dünneren und häufigeren Entleerungen einstellen. Störungen solcher Art habe ich bei mir und anderen bei Übergang ins Gebirge sehr häufig beobachten können.

Bei sehr akutem Höhenwechsel werden sich aber, zumal bei blutarmen Individuen, solche Appetitlosigkeit, Übelkeit und Verdauungsstörungen infolge Erweiterung der Gefäße auch einfach auf Grund einer Gehirnanämie gelegentlich einstellen, in welchem Falle

diese Störungen sich dann aber durch Tieflagerung des Kopfes in ruhig ausgestreckter Lage meist sehr schnell beseitigen lassen, wie ich dies gleichfalls durch Versuche an solchen Personen selbst zu beobachten Gelegenheit hatte.

Haben sich aber später Blutmenge und Gefäßapparat den neuen Verhältnissen angepaßt, so wird sich dann mit dem Einsetzen der bereits erwähnten kompensatorisch-hypertrophischen Vorgänge, der Vermehrung des Blutes, der Hypertrophie des Herzens und der Gefäßmuskeln, sowie in größeren Höhen auch des Skelettmuskelapparates, und dem so entstehenden Bedürfnis nach Eiweiß- und Kohlehydratzufuhr zur Deckung des neugebildeten funktionellen Gewebes und seiner gesteigerten Funktionsleistungen, aber auch zur Deckung des eventuell auf Grund der besseren Hautdurchblutung entstehenden größeren Wärmeverlustes durch die hiermit nötig werdende vermehrte Zufuhr von Kalorien, d. h. von Fett in der Nahrung, ein gesteigertes Nahrungsbedürfnis im allgemeinen, d. h. vermehrter Appetit und Hunger, einstellen. Ja, ist erst einmal die regulatorische Einstellung aller Funktionen des Organismus erfolgt, so bietet die Erweiterung der Hautgefäße ihrerseits und die damit zusammenhängende umfänglichere Durchblutung der Haut bei breiter Strombahn mit assimilatorischer Tendenz, zusammen mit der durch die Insolation gebotenen Möglichkeit einer Wärmezufuhr bei ruhigem Liegen in der Sonne, die beste Gelegenheit zu den heute in den Höhenkurorten so beliebten Liegemastkuren, auf die hier näher einzugehen, der Raum fehlt.

Schlaf.

Daß bei vielen Menschen beim Übergang ins Höhenklima zunächst der nächtliche Schlaf nicht den gewünschten erquickenden Einfluß wie im Tieflande hat, ja Angst- und Erregungszustände, eventuell verbunden mit Atemnot auftreten und zwar ebenfalls wieder besonders leicht bei anämischen und solchen Personen, deren Gefäßregulationsapparat mangelhaft funktioniert, läßt sich gleichfalls auf unserer mechanischen Grundlage aus den Verhältnissen der Blutverteilung unschwer verstehen.

Beruhet die erquickende Wirkung des Schlafes, wie ich dies seinerzeit in einer kleinen Mitteilung über Schlafmittel¹⁾ eingehender begründet habe, auf der durch Abflachung und Verbreiterung des Blutstromes im Zentralnervensystem begünstigten Assimilation, zu welcher aber doch ein gewisser Druck des Blutstromes in den

1) Vgl. a. a. O. Württemb. med. Korrespondenzblatt 1909.

Gefäßen nötig ist, so ist klar, daß der assimilatorische Vorgang bei erheblicherem Absinken des Blutdruckes und vor allem bei Gehirn-anämie nicht in entsprechender Weise erfolgen kann. Ein solches mit Gehirn-anämie verbundenes Absinken des Blutdruckes wird aber, ehe Anpassung der Blutmenge an die Höhe erfolgt ist, eintreten müssen, sobald der zentrale Gefäßregulationsapparat infolge Ermüdung beim Einschlafen den Tonus der zur übermäßigen Erweiterung neigenden erwähnten Gefäßgebiete nicht mehr kompensatorisch aufrecht erhält, so daß dann diese sich mit Blut übermäßig füllen und so dasselbe anderen Teilen, wie z. B. dem Gehirn, entziehen, womit dann gerade beim Einschlafen es zum Auftreten der Erscheinungen der Gehirn-anämie kommt. Auch hier lassen sich diese Mißstände, die lediglich auf ungenügender Blutzufuhr zum Gehirn zurückzuführen sind, meist durch entsprechende tiefere Lagerung des Kopfes unschwer beheben.

Es ist aber auch interessant und spricht gleichfalls für unsere Auffassung des Wirkungsmechanismus der Höhenwirkung, daß von allen bisher versuchten pharmakologischen Mitteln es gerade das Kokain und Menthol sind, welche sich bei Bekämpfung der Höhenkrankheit als besonders brauchbar erwiesen haben. Beiden kommt eine ganz ausgesprochene Wirkung im Sinne einer Verengung der kleinen Gefäße, offenbar unter direkter Erhöhung ihres Muskeltonus zu, wie dies hinsichtlich des Kokains in demnächst zu veröffentlichenden Versuchen Nick gezeigt hat.

Talkrankheit.

Zum Schlusse möchte ich auf eine bisher nicht beachtete Erscheinung hinweisen, die ich im Gegensatz zur Bergkrankheit als Talkrankheit bezeichnen möchte. An mir selbst und anderen habe ich, besonders bei sehr schneller Rückkehr aus dem Höhenklima ins Tiefland, eine Reihe unangenehmer Symptome beobachten können, die offenbar auf die nun im entgegengesetzten Sinne sich auf das der Höhe angepaßte Gefäßsystem und die dasselbe füllende vermehrte Blutmenge geltend machende Drucksteigerung zurückzuführen sind.

So habe ich, wenn ich nach längerem Aufenthalt auf einer Höhe von 1500 bis 1800 m plötzlich ins Tal auf 700 bis 800 m abstieg, wiederholt Nasenbluten auftreten sehen, ferner ein unangenehmes Allgemeingefühl von Unruhe und Bedrücktheit empfunden, wie es auch bei Gehirnhyperämie aus anderen Gründen auftritt; ebenso war zunächst für einige Tage der Appetit gestört. Alle diese Symptome

lassen sich aber unschwer dahin deuten, daß eben unmittelbar nach Rückkehr ins Tiefland unter der Wirkung des sich nun wieder auf die Gefäße geltend machenden höheren Luftdruckes, die im Gefäßsystem enthaltene Blutmenge im Verhältnis zu dessen Volumen eine zu große ist, um dem Gefäßzentrum eine geordnete regulatorische Blutverteilung zu ermöglichen.

Sowohl die Erscheinungen der Talkrankheit, wie jene der Höhenkrankheit können aber sehr wesentlich gemildert, ja ganz vermieden werden wenn man den Übergang von der Höhe zur Tiefe oder umgekehrt allmählich, d. h. innerhalb vier bis fünf Tagen herbeiführt, so daß pro Tag der Unterschied nur 200 bis 300 m beträgt. Dieser Differenz sich ohne Störung anzupassen ist der Organismus der meisten Menschen fähig. Es wäre deshalb gewiß empfehlenswert, wenn die großen Höhenkuranstalten für den Übergang ihrer Patienten in das Höhenklima und aus demselben in das Tiefland für geeignete Zwischenstationen sorgen würden, womit sich nicht nur manche subjektiv, sondern auch objektiv nachteiligen Störungen des Befindens der Kranken durch Anpassung vermeiden ließen. Da aber nun die Druckdifferenz mit der Höhe abnimmt, so werden nach Anpassung an den Luftdruck eines höheren Standquartiers von etwa 1800 bis 2000 m Höhe für kürzere Zeit von nur 24 Stunden auch größere Höhendifferenzen ohne das Auftreten von Störungen leichter ertragen werden.

Aus den hier nur in Kürze gegebenen Andeutungen der Erklärung der Wirkungen der Luftdruckverminderung im Höhenklima auf mechanischer Grundlage dürfte sich aber ergeben, daß auch unabhängig von dem Einfluß, welcher einer Herabsetzung des Sauerstoffpartialdruckes in größeren Höhen zukommt, es sich auch auf bloß mechanischer Grundlage sehr wohl erklären läßt, warum der Aufenthalt im Höhenklima für Gesunde und Kranke verschiedenster Art einen so außerordentlich günstigen, stärkenden und erfrischenden Einfluß zu entfalten vermag, so daß man ja von der Wirkung des Höhenklimas als von einer förmlich verjüngenden gerne spricht. Daß bei einer wirklich rationellen, kurmäßigen Ausnutzung der geschilderten Wirkungen, unter Vermeidung der den heilsamen Einfluß benachteiligenden Nebenumstände, sich der Nutzeffekt an Gesunden und vor allem auch an solchen Kranken, bei welchen die geschilderten Veränderungen im Organismus ohne Nachteil ertragen werden, noch günstiger wird gestalten lassen, als es bisher ohne Berücksichtigung der mechanischen Seite der Wirkungen des Höhenklimas der Fall war, dürfte kaum zu bezweifeln sein.

Es ist aber bekanntlich die hier von mir dargelegte und eingehender experimentell physikalisch begründete Auffassung des mechanischen Einflusses der Luftdruckerniedrigung noch vor 30 Jahren auch unter den Klinikern allgemein verbreitet gewesen, wie dies z. B. auch die Ausführungen Oertels¹⁾ in seiner respiratorischen Therapie zeigen.

Sieht man aber die neuere und ältere Literatur über die Wirkungen des Höhenklimas durch, so wird man finden, daß die meisten Erscheinungen, auch die, welche sich durch das Absinken des Sauerstoffpartialdruckes nicht oder nur gezwungen erklären lassen, sich auf Grund des hier dargestellten mechanischen Einflusses und vor allem der durch ihn bedingten Veränderung der Zirkulation und Blutverteilung ohne besondere Schwierigkeit klar stellen lassen.

1) Ziemssens, Handbuch d. Allg. Therapie 1882, Bd. I, Tl. 4, S. 349 ff.

Fig. 4.

Fig. 3.

Fig. 2.

Fig. 1.