

Neue Gedanken zur Physiologie der Atmung und ihre Bewährung.

Von Albrecht Engelhardt.

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Erlangen.

Leiter: Prof. Dr. R. Matthaei.

Vorgetragen in der Physikalisch-medizinischen Sozietät Erlangen
am 20. Mai 1941.

Inhaltsübersicht.

Der Ausgangspunkt der Untersuchung.

Zwei fruchtbare Nebenbefunde beim Versuch, die Blutmenge des Menschen aus der Menge des verdrängten Blutstickstoffs bei reiner Sauerstoffatmung zu bestimmen.

Die Selbstbeobachtung der Apnoe.

Das zwangsläufige Auftreten der Atemsperrre.

Ein Weg zur Erkenntnis der Eigentätigkeit der Lunge.

Die ungleichmäßige Verteilung der Frischluft.

1. Die Ungleichmäßigkeit der Belüftung einzelner Lungenabschnitte.
2. Das Werkzeug für den Abschluß verschiedener Lungenabschnitte.
3. Der Schichtwechsel.
4. Die Steuerung des Schichtwechsels.

Die lokale bronchomotorische Reaktion (LBR).

5. Das neue Bild des Durchlüftungsvorganges und zwei sich daraus ergebende neue Fragen.

a) Der Vorgang des Gasaustausches in der Lunge.

Die aktive Kohlensäureausscheidung.

b) Die Möglichkeit einer vollständigen Durchlüftung der Lunge.

Das Gähnen.

Zusammenfassung.

Die teleologisch gerichtete Forschung. Die subjektive Betrachtungsweise im Selbstversuch.

Der Ausgangspunkt der Untersuchung.

Die zirkulierende Blutmenge des lebenden Menschen kann nur auf indirektem Wege gemessen werden. Zwei Verfahren der Blutmengenbestimmung sind heute für die Anwendung beim Menschen ausgebaut und werden klinisch verwendet. Das eine

ist das Farbstoffverfahren. Dabei wird der Versuchsperson eine bestimmte Menge eines durch die Niere schwer ausscheidbaren Farbstoffes in eine Vene gespritzt. Nach einer gewissen Zeit, wenn eine gleichmäßige Mischung des Farbstoffes unter das Blut angenommen werden kann, wird eine Blutprobe entnommen und aus ihrem Gehalt an dem vorher eingespritzten Farbstoff die Blutmenge berechnet.

Das andere Verfahren ist das Kohlenoxydinhalationsverfahren. Hier läßt man die Versuchsperson aus einem Gasbehälter atmen, dessen Luft eine festgelegte Menge von Kohlenoxyd enthält. Nach wiederholter Einatmung dieser Luft ist das Kohlenoxyd nahezu vollständig an den roten Blutfarbstoff gebunden. Aus dem Kohlenoxydgehalt einer entnommenen Blutprobe kann man die Blutmenge berechnen.

Da diese Verfahren die physiologischen Verhältnisse im Organismus nicht unwesentlich beeinflussen und besonders das Kohlenoxydinhalationsverfahren bei einem Kranken immerhin nicht ganz ohne Gefahr sein dürfte, erschien es mir nicht überflüssig, nach einem neuen Verfahren zu suchen, das mit weniger schwerwiegenden Eingriffen verbunden ist.

Es sind wie in jeder mit der Atmosphäre in Berührung stehenden Flüssigkeit auch im Blute die Gase ihrem Partialdruck entsprechend gelöst. Weil Sauerstoff und Kohlensäure durch die Atmung ständigen Schwankungen unterworfen sind, kann ich diese beiden Gase für meine Untersuchungen nicht gebrauchen. Im Blute ist aber auch Stickstoff gelöst, der durch fortgesetztes Einatmen von reinem Sauerstoff aus dem Blute verdrängt werden kann. Gelingt es, diese Stickstoffmenge zu messen, so ist damit die Blutmenge bekannt, weil man auch die Löslichkeit des Stickstoffs im Blute kennt.

Es ist mir schließlich auch gelungen, meine Blutmenge auf diese Weise zu messen. Dazu war allerdings erst eine jahrelange Schulung meiner Atmung notwendig. Ich hatte dabei eine hervorragende Gelegenheit, meine Atembewegung im Selbstversuch zu studieren.

Um ein Nachrücken des Gewebestickstoffes in das Blut zu verhüten, galt es, den Stickstoff aus Lunge und Blut möglichst rasch herauszubekommen. Ich versuchte zu diesem Zwecke meine

Lunge in gleichmäßigen, möglichst tiefen und rasch aufeinanderfolgenden Atemzügen mit reinem Sauerstoff zu durchlüften. Um den Ablauf der Stickstoffverdrängung beurteilen zu können, bestimmte ich den Stickstoffgehalt der Ausatemungsluft.

Dadurch kam ich zu zwei fruchtbaren Nebenbefunden, die ich im folgenden mitteile. Ich konnte zunächst feststellen, daß einer beliebig starken Durchlüftung unserer Lunge auch nach obenhin eine Grenze gesetzt ist. Zweitens fand ich, daß sich der Stickstoffgehalt unserer Ausatemungsluft nach vorangegangener Einatmung von reinem Sauerstoff anders verhält, als wir bei einer gleichmäßigen Durchlüftung unserer Lunge erwarten müßten. Dieser zweite Befund war für mich der Weg zum experimentellen Nachweis einer Eigentätigkeit der Lunge, die wir aus der allgemein-physiologischen Erkenntnis einer ständigen Tätigkeit aller lebenden Gebilde heraus von vornherein annehmen mußten.

Die Selbstbeobachtung der Apnoe.

Es ist durch die tägliche Erfahrung allgemein bekannt, daß es nicht möglich ist, für eine beliebig lange Zeit unsere Atembewegung einzustellen. Die Atemnot, zu der jede künstliche Atempause schließlich notwendig führt, zwingt uns, unsere Lunge wieder neu zu durchlüften. Wie ich aus Quellen nachweisen konnte, war dieser Zustand schon im klassischen Altertum bekannt. Der Begriff der Atemnot war also längst geläufig, als er unter dem Namen Dyspnoe in die wissenschaftliche Medizin eingeführt wurde.

Anders verhält es sich mit der Apnoe. Das geht schon daraus hervor, das wir kein volkstümliches Wort für diesen Zustand besitzen. Die Apnoe mußte tatsächlich erst im Tierexperiment entdeckt werden, obwohl es kaum einen Menschen geben dürfte, der nie apnoisch war. Wenn wir die Lunge eines Versuchstiers stärker durchlüften, als seinem Bedarf entspricht, und dann die Atmung wieder sich selber überlassen, so steht die Atembewegung zunächst still. Dieses Verhalten, das um die Mitte des vorigen Jahrhunderts im Laboratorium von du Bois-Reymond entdeckt wurde, wurde als Apnoe bezeichnet. Der Entdecker wies ausdrücklich auf den polaren Gegensatz von

Dyspnoe und Apnoe hin. Während der Gebrauch des Begriffes Dyspnoe, die jedem durch das eigene Erleben bekannt ist, eindeutig geblieben ist, wurde in der Fachliteratur der Begriff der Apnoe im Laufe der Zeit, besonders in den letzten beiden Jahrzehnten, vollkommen verwässert. Man bezeichnete kurzerhand jeden Atemstillstand als eine Apnoe. So nannte man ein Kaninchen, das sich weigert Ammoniak einzuatmen, und einen lachenden Hund apnoisch.

Man hatte es bisher immer unterlassen, die Apnoe beim Menschen im Selbstversuch zu studieren. Als ich bei meinen Untersuchungen eine Reihe möglichst tiefer Atemzüge rasch hintereinander machen wollte, merkte ich bald, daß ich nicht mehr in der gleichen Weise mit meiner Lungendurchlüftung fortfahren konnte. Die Ausatmung machte schließlich solche Schwierigkeiten, daß es unmöglich war, weiterhin Luft abzugeben. Ich erlebte hier zum ersten Male bewußt eine Apnoe.

Das veranlaßte mich, den Begriff der Apnoe auf die ersten Untersucher zurückgehend neu zu definieren und sie in Anlehnung an das Wort Atemnot Atemsperre zu nennen. Ich will damit zum Ausdruck bringen, daß es uns nicht möglich ist, die Atembewegung in gleicher Weise beliebig fortzusetzen, wenn vorher unsere Lunge über den Bedarf hinaus durchlüftet worden ist.

Zwei verschiedene Formen der Atemsperre konnte ich aufzeigen. Die eine ist die geschilderte, die eine Ausatmung unmöglich macht. Ich nenne sie daher Ausatemsperrre. Den Gegensatz dazu bildet die häufig spontan auftretende Einatemsperrre. Wenn man zu irgendeinem Zwecke, etwa beim Ausblasen der Lichter auf einem Weihnachtsbaum, die Lungendurchlüftung weit über den Bedarf hinaus steigert, so kommt ein Zeitpunkt, an dem wir aufhören müssen. Wir können hier nicht mehr einatmen. Es treten dabei noch andere Erscheinungen auf, wie Kopfschmerz und motorische Unruhe, die auf eine beginnende Kohlensäureverarmung des Organismus (Alkalose, Akapnie) hinweisen. Diese Erscheinungen fehlen meistens bei der im Experiment erzeugten Ausatemsperrre. Man kann sie aber auch dabei beobachten, wenn man sie dadurch steigert, daß man die Ausatemsperrre wiederholt hintereinander auslöst.

Die Bezeichnung Apnoe für jeden Atemstillstand ist aber nun nicht mehr berechtigt, so wenig man einen Menschen, der den Duft einer Blume genießend heftiger einatmet, als dyspnoisch bezeichnen wird.

Ein Weg zur Erkenntnis der Eigentätigkeit der Lunge.

Das zweite Ergebnis meiner Untersuchungen ist der Nachweis einer Eigentätigkeit der Lunge.

Ich schildere hier zunächst die Ungleichmäßigkeit der Durchlüftung verschiedener Lungenabschnitte unter wechselnden Formen der Durchlüftung und unter verschiedenen Atembedingungen, wie ich sie durch Messung des Stickstoffgehaltes der Ausatemungsluft nach einmaliger Einatmung von reinem Sauerstoff feststellen konnte. Im Anschluß daran werde ich das Werkzeug des Organismus vor Augen führen, das geeignet ist, einzelne Lungenabschnitte von der Durchlüftung vorübergehend auszuschalten, und an einer künstlichen Staublunge die unvollständige Lungendurchlüftung aufzeigen.

Dann bespreche ich, wie die verschiedenen Abschnitte bei der Durchlüftung einander in einzelnen Schichten ablösen. Daran schließt sich naturgemäß die Betrachtung der Ursache dieses Schichtwechsels an.

Schließlich werde ich ein Bild unserer neuen Vorstellung über den Durchlüftungsvorgang im ganzen geben, eine Deutung des primären Auftretens des verschiedenen Zustandes der einzelnen Lungenabschnitte versuchen und zwei sich aus den neuen Erkenntnissen über die Lungendurchlüftung ergebende Fragen noch näher betrachten.

1. Die Ungleichmäßigkeit der Belüftung einzelner Lungenabschnitte.

Anläßlich meiner Untersuchungen achtete ich stets auf den Stickstoffgehalt der ausgeatmeten Luft. Wenn ich einmal eine bestimmte Menge reinen Sauerstoffs eingeatmet hatte, so fiel mir auf, daß sehr viel weniger Stickstoff in der Ausatemungsluft erschien, als ich bei einer vollständigen Mischung der Lungenluft mit der Frischluft bei einem Atemzug hätte er-

warten müssen. Das führte zu dem Schluß, daß die Mischung unvollständig war. Der Einfachheit halber nahm ich zunächst an, daß ein Teil der Lungenluft sich gleichmäßig mit der den Alveolen zugeführten Frischluft durchmischt hätte, die übrige Lungenluft aber von der Durchlüftung in diesem einen Atemzuge ausgeschlossen war. Diese ausgeschaltete Luft nenne ich auf den Vorschlag von Matthaei Verweilluft. In dem folgenden Zylinder-Kolbenschema ist das veranschaulicht.

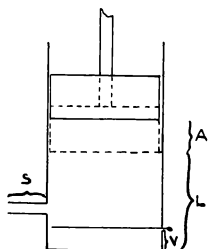


Abb. 1.

Lungendurchlüftungsschema.

A = Atmungsluft, S = schädlicher Raum,
L = Lungenluft, V = Verweilluft

Dabei ist A die bei einem Atemzug hin- und herbewegte Luftmenge (Atmungsluft), L die vor der Einatmung in der Lunge vorhandene Luft (Lungenluft). Diese ist zum Teil ausatembar (Speicherluft). In unserem Schema wäre ihre „Ausatmung“ durch Bewegen des Kolbens bis an den unteren Rand des Ansatzrohres zu erreichen. Der auch bei stärkster Ausatmung nicht abgebbare Teil unterhalb des Rohres ist die Restluft. Der in unsrem Schema von der Lungenluft abgeteilte Betrag stellt die Verweilluft dar (V). Die in dem Ansatzrohr hin- und herbewegte Luftmenge (S) entspricht der in den Luftleitern bewegten Luft (schädlicher Raum). Den oberhalb des Schiebers liegenden Teil der Lungenluft pflege ich in Prozenten der gesamten Lungenluft auszudrücken und nenne diese Größe die Durchlüftungsbeteiligung. Wenn ich den Durchlüftungsgrad der Lunge berechnen will, so muß ich die in die Lunge neu aufgenommene Luft bei der Einatmung in Beziehung setzen, zu der in der Lunge vorhandenen Luft nach der Einatmung. Ich muß dabei berücksichtigen, daß nicht die gesamte eingeatmete Luft (Atmungsluft) in die Lunge gelangt, sondern daß ein Teil im schädlichen Raum verbleibt. Ich muß also bei der Berechnung die Atmungsluft um die Größe des schädlichen Raumes

vermindern. Für diese Luftmenge führte ich hier die Bezeichnung Frischluft (F) ein. Der Durchlüftungsgrad in Prozenten ergibt sich dann aus der Formel:

$$D' = \frac{F}{L + F} \cdot 100$$

Diese Berechnung ist ohne Berücksichtigung der Verweilluft durchgeführt. Sie gibt auch kein Maß für die tatsächliche Frischluftversorgung eines bestimmten Lungenabschnittes, sondern stellt lediglich eine Beziehung der genannten Luftvolumina dar. Wir haben sie deshalb als die Rohdurchlüftung bezeichnet. Wollen wir etwas von dem Durchlüftungsgrad des an der Durchmischung beteiligten Anteils der Lungenluft erfahren, so müssen wir die Größe der Verweilluft mit in Rechnung setzen. Für diese Reindurchlüftung ergibt sich dann folgende Beziehung:

$$D = \frac{F}{(L - V) + F} \cdot 100$$

Von drei Größen wird die Durchlüftungsbeteiligung bestimmt: von der Größe der Frischluft, von der Größe der Lungenluft und von der Tätigkeit (vielleicht vom Sauerstoffbedarf oder von der Kohlensäureproduktion). Ich habe mir nun im vorigen Jahr die Mühe gemacht, bei mir mit jeder möglichen Größe von Atmungsluft und Lungenluft jeweils im Abstand von 500 cm bei Ruhe und nach Arbeit die Durchlüftungsbeteiligung meiner Lunge in jeweils mindestens drei Einzelversuchen für jede der hierbei möglichen 132 verschiedenen Formen der Atmung zu

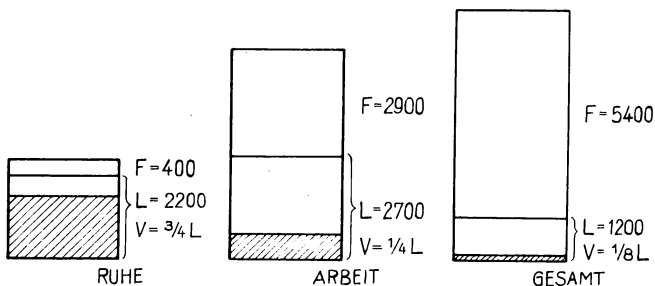


Abb. 2.

Verhalten der Größen von Frischluft, Lungenluft und Verweilluft bei verschiedenen Formen der Lungendurchlüftung.

untersuchen und in Tabellen zusammen mit der Größe der Roh- und Reindurchlüftung aufzuschreiben. Damit habe ich eine großzügige Übersicht über das jeweilige Verhalten der Durchlüftung gewinnen können. Ich will mich hier mit drei Beispielen begnügen, an denen ich den Einfluß der Größe der Verweilluft auf die Durchlüftung der an der Durchmischung teilnehmenden Lungenabschnitte darstellen will.

In drei Säulen habe ich nebeneinander die Größen für gewöhnliche Atmung in Ruhe, für gewöhnliche Atmung nach Anstrengung und für willkürliche Gesamtdurchlüftung dargestellt. Dabei ergeben sich für die Rohdurchlüftung folgende Werte:

$$D'_{\text{Ruhe}} = \frac{400}{2200 + 400} \cdot 100 = 15,4\%$$

$$D'_{\text{Arbeit}} = \frac{2900}{2700 + 2900} \cdot 100 = 51,8\%$$

$$D'_{\text{Gesamt}} = \frac{5400}{1200 + 5400} \cdot 100 = 81,8\%$$

Wenn wir dagegen die Reindurchlüftung errechnen wollen, müssen wir auch die Größe der Verweilluft berücksichtigen. Diese ist auf unseren Schemen durch Schraffieren dargestellt. Sie beträgt in der Überschaubarkeit wegen abgerundeten Größen

bei Ruhe $\frac{3}{4}$ der Lungenluft,

bei Arbeit $\frac{1}{4}$ der Lungenluft,

bei Gesamtdurchlüftung $\frac{1}{8}$ der Lungenluft.

Daraus ergeben sich folgende Werte für die Reindurchlüftung:

$$D_{\text{Ruhe}} = \frac{400}{2200 - 1650 + 400} \cdot 100 = 42,1\%$$

$$D_{\text{Arbeit}} = \frac{2900}{2700 - 675 + 2900} \cdot 100 = 58,8\%$$

$$D_{\text{Gesamt}} = \frac{5400}{1200 - 150 + 5400} \cdot 100 = 83,8\%$$

Wir sehen daraus in jedem Falle eine Verbesserung der Durchlüftung. Die Verbesserung ist am größten bei ruhiger Atmung. Hier wäre ja auch der prozentuale Frischluftgehalt nach Einatmung nur sehr gering. Das wirkte sich für die Atmung aber sehr ungünstig aus; denn der Gasaustausch in der Lunge hängt wesentlich vom Unterschied der Partialdrucke der Gase in Alveolarluft und Lungenblut ab. Durch die Beschränkung der Durch-

lüftung auf einen kleinen Teil der Lunge kann wenigstens hier bei der gegebenen flachen Atmung ein günstigeres Gefälle der Drucke erzielt werden. Da aber natürlich auch in den gerade nicht durchlüfteten Lungenabschnitten ein Gasaustausch zwischen Lunge und Blut stattfindet, ergeben sich tatsächlich für die Atmung viel günstigere Verhältnisse, als sie dann wären, wenn die ganze Lunge gleichförmig durchlüftet würde. Bei der Atmung nach Anstrengung wird in den durchlüfteten Lungenabschnitten das Druckgefälle an sich schon wesentlich günstiger für den Gasaustausch, da ein viel größeres Luftvolumen geatmet wird und wegen des vermehrten Stoffwechsels auch von seiten des Blutes her der Spannungsunterschied vermehrt ist. In diesem Fall ist es also günstiger, wenn ein größerer Lungenabschnitt sich an der Durchmischung beteiligt. Bei der Gesamtdurchlüftung schließlich ist die Beteiligung am größten. Es ist aber auffallend, daß auch hier $\frac{1}{8}$ der Lungenluft sich nicht mit der Atmungsluft mischt.

2. Das Werkzeug für den Abschluß verschiedener Lungenabschnitte.

Ich habe bei der Beurteilung der Reindurchlüftung vorausgesetzt, daß einzelne Lungenabschnitte während des untersuchten Atemzuges von der Durchlüftung ausgeschlossen waren. Meine zweite Annahme war, daß die Durchlüftung der beteiligten Lungenabschnitte gleichmäßig sei. Diese beiden zunächst als Arbeitshypothesen verwendeten Ansichten möchte ich nun prüfen und versuchen, ob sie sich durch beobachtete Vorgänge an der Lunge erhärten lassen.

Der zerklüftete Bau des Lungenraumes, den wir uns am besten an einem Lungenausguß veranschaulichen können, macht es schon sehr unwahrscheinlich, daß bei jedem einzelnen flachen Atemzug sämtliche Alveolen mit Frischluft versorgt würden. Wir müßten uns vorstellen, daß nur die Alveolen, zu denen die Luft unter Überwindung des geringsten Widerstandes gelangen könnte, durchlüftet würden. Hinge der Widerstand allein von der anatomischen Gestalt des Lungenraumes ab, so würden immer die gleichen Alveolen durchlüftet. Das wäre aber durchaus unzweckmäßig, weil nur ein Teil des aktiven Lungenepithels für den Gasaustausch genutzt würde. Wie ich noch

zeigen werde, hat sich tatsächlich nachweisen lassen, daß bei zwei aufeinanderfolgenden Atemzügen nicht die gleichen Lungenräume mit Frischluft versorgt werden. Wir müssen also annehmen, daß die Luft auf dem Weg zu einer bestimmten Alveole nicht in allen Fällen den gleichen Widerstand zu überwinden hat. Diese Widerstandsänderungen können nur auf Formveränderungen des Lungenraumes beruhen, die durch die Tätigkeit von glatten Muskelementen, die überall in die Lunge eingelagert sind, bedingt ist.

Zwei Gruppen von Muskeln in der Lunge interessieren uns hier in erster Linie. Die erste Gruppe ist die Muskulatur der Luftleiterwände. Das sind vor allem ringförmig angeordnete Muskelfasern, die sich durchaus mit der Muskulatur der Blutgefäße vergleichen lassen, wenn sie auch viel schwächer ausgebildet sind. Genau wie im Gefäßsystem treten an den großen Röhren die Muskeln den bindegewebigen Elementen gegenüber in den Hintergrund. In den kleineren Blut- und Luftleitern nehmen sie an Stärke relativ zu, um schließlich dort, wo das den Stoffaustausch vermittelnde Epithel beginnt, also in den Kapillaren und Alveolen, ganz zu verschwinden. Unmittelbar vorher, in den kleinsten Arterien und an der Stelle des Eintritts der Bronchen in die Lungenläppchen, ist die Muskulatur im Vergleich zum Rohrquerschnitt am größten. Da in diesen Stellen das Bindegewebe sehr wenig vertreten ist — wir finden in den Bronchen keine Knorpel­einlagerungen mehr an diesen Stellen —, ist der Einfluß der Muskulatur auf den Gefäß­durchmesser bedeutend. Die Bedeutung der Rohrweite für den Strömungswiderstand ist sehr groß, denn dieser ändert sich mit der 4. Potenz des Gefäß­durchmessers.

Es ist auch experimentell nachgewiesen, daß gerade an der Eintrittsstelle des Bronchus in das Lungenläppchen bei Reizung des Vagus die stärkste Verengung erfolgt.

Man hat immer wieder an eine aktive Beteiligung der Lunge an der Durchlüftung gedacht. Man nahm eine aktive Förderung des Luftstromes durch peristaltik-artige Bewegungen der Bronchen an. Diese Annahme, die ganz entsprechend für die Blutbewegung in den Gefäßen gemacht wurde, läßt sich aber aus verschiedenen Gründen nicht halten. Eine Fortbewegung von Luft wäre nur bei vollständiger Verschließbarkeit der Bron-

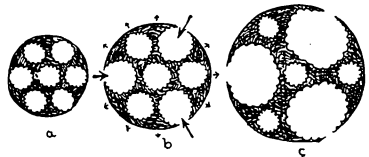
chen möglich. Diese ist aber erst ganz peripher, in den knorpelfreien Bronchen, möglich und dort kommt ja eine Weiterbeförderung fast nicht mehr in Betracht. Außerdem ist die Luftbewegung so schnell, daß eine von glatter Muskulatur verursachte Peristaltik nie diese Geschwindigkeit erreicht. Schließlich wurde nie eine Peristaltik, selbst nach Füllung der Bronchen mit Kontrastbrei, beobachtet.

Da wir an der Einmündungsstelle des Bronchus ins Läppchen kein stützendes Bindegewebe mehr antreffen und im Gegensatz zu den kleineren Arterien die Muskulatur an dieser Stelle nicht ausreicht, von sich aus stützend den Bronchus offen zu halten, so sind alle Bronchen bei Ausatemstellung verschlossen zu denken. Wird nun eingeatmet, so erfolgt durch Zug zunächst eine etwa gleichmäßige Dehnung aller Lungenläppchen. Gleichzeitig wirkt diese Kraft auf die Luftleiter. Je nach dem Tonus der Bronchenmuskulatur am Eingang zu den Läppchen wird der Bronchus hier eröffnet oder nicht. Die nun einströmende Luft kann nur in solche Läppchen gelangen, deren Zugang geöffnet wurde. Von der Stärke der Einatembewegung, also von der Größe der Kraft, die auf diese kleinen Bronchen wirkt, hängt es ab, wie viele Läppchen belüftet werden. Ist einmal Luft in größerer Menge in die Lunge eingeströmt, so werden keine neuen Läppchen mehr eröffnet, weil der durch die Einatmung erzeugte Unterdruck zum größten Teil ausgeglichen ist. Der Zug auf die Bronchen wird aber gleichzeitig geringer. Die Läppchen, die Frischluft erhalten, dehnen sich sehr stark aus, während die übrigen Läppchen jetzt schon wieder etwas kleiner werden, weil auch auf sie keine so starke Kraft mehr einwirkt. Die der Frischluft zugängigen Läppchen werden aber, weil ihre Zahl der Größe der Frischluft angepaßt ist, etwa alle gleichstark belüftet.

Das folgende Schema soll das veranschaulichen. Abb. 3 a zeigt die Ausatemstellung. Bei b hat die Einatembewegung

Abb. 3.

Verschiedene Vergrößerung einzelner Lungenläppchen bei der Einatmung. (Die Vergrößerung ist der Anschaulichkeit wegen übertrieben.)



begonnen. Die sieben Lämpchen werden alle gedehnt. Wie ich noch zeigen werde, ist die Dehnung aber nicht ganz gleichmäßig, weil sie wegen ihres verschiedenen Muskeltonus der Dehnung verschiedenen Widerstand entgegensetzen. Der Zug ist durch die kurzen Pfeile dargestellt. Dabei hat sich der Zugang zu drei Lämpchen geöffnet. In diese strömt nun die Frischluft ein (durch die längeren Pfeile dargestellt). c zeigt die Einatmungsstellung. Die offenen Lämpchen sind stark vergrößert, die verschlossenen wegen des nachlassenden Zuges wieder kleiner geworden.

Die zweite Muskelgruppe, die wir näher betrachten wollen, sind die Muskeln am Alveoleneingang. Sie sind auf Abb. 4 durch eine etwas vereinfachte Zeichnung von Baltisberger (Z. Anat. 61, 229 [1921]) dargestellt. Diese bilden eine zweite Schleuse für die Frischluft. Bei Kontraktion können sie den Zugang zu den Bläschen verschließen, wenn sie dagegen erschlafft sind, so lassen sie ihn offen. Das ist aus ihrer Anordnung ersichtlich. Wir finden ein Zusammenspiel der Muskulatur am Lämpcheneingang und am Alveolenzugang, wenn wir annehmen, daß innerhalb eines Lämpchens der gleiche Muskeltonus herrscht. Da, wie wir noch sehen werden, die Kohlensäurespannung für den Muskeltonus von maßgebendem Einfluß ist, können wir das annehmen, wenn innerhalb eines Lämpchens der gleiche Kohlensäuregehalt herrscht.

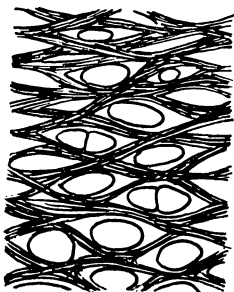


Abb. 4.

Die um die Alveoleneingänge gelagerten Muskelelemente nach Baltisberger. Der Luftleiter ist in senkrechter Richtung zur Abb. aufgeschlitzt und auseinandergelegt zu denken. Die ovalen Felder stellen die Alveoleneingänge dar.

Die Muskeln am Alveoleneingang beeinflussen auch die Dehnbarkeit des Lämpchens. Diese hängt außerdem von der anscheinend eigens dafür angelegten intralobulären Muskulatur ab, die in mehr oder weniger kräftig ausgebildeten Muskelfasern das Lämpchen quer durchzieht. Auch die Muskulatur der Blut-

gefäße innerhalb des Lappchens kann dessen Dehnbarkeit beeinträchtigen. Da auch die beiden letztgenannten Muskelgruppen unter dem gleichen Einfluß von seiten der Kohlensäure stehen, so unterstützen auch sie sinnvoll die teilweise Ausschaltung der Lunge von der Durchlüftung.

Wesentlich stützen konnte ich die Annahme von der ungleichmäßigen Durchlüftung in der geschilderten Weise durch künstlich erzeugte Staublungen am lebenden Kaninchen. Zu diesem Zweck wurde einem mit Chloralhydrat betäubten Tier nach Tracheotomie eine Glaskanüle in die Luftröhre eingebunden. Wenn sich das Kaninchen nach einigen Minuten von diesem Eingriffe so weit erholt hatte, daß es wieder ruhig und gleichmäßig

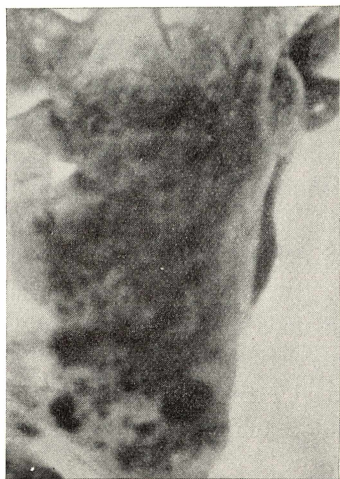


Abb. 5.

Künstliche Staublunge nach einmaligem Einatmen von Englischrot.



Abb. 6.

Hämorrhagische Herde der Lunge nach Zerreißung durch künstliche Lungenblähung.

seine Lunge durchlüftete, ließ ich ihm während eines einzigen Atemzuges einen fein pulverisierten Staub einatmen. Sofort klemmte ich dann die Luftröhre vollständig ab und eröffnete, ohne auf die starke Blutung Rücksicht zu nehmen, den Brustraum auf beiden Seiten des Sternums. Dann nahm ich die Lunge heraus. Bei raschem Arbeiten gelingt das noch, bevor die dyspnoischen Krämpfe auftreten. In Abb. 5 habe ich einen Teil der

Oberfläche einer solchen künstlichen Staublunge wiedergegeben. Das Tier hat in diesem Versuch Englischrot eingeatmet. An der Oberfläche sah man deutlich die roten Herde. Diese sind etwa gleichmäßig verstreut. Auf Schnitten durch die Lunge ergab sich ein ganz entsprechendes Bild.

Durch einen zufälligen Befund konnten wir den verschiedenen Tonus einzelner Lungenläppchen veranschaulichen. Wir versuchten bei der Vorführung von Tierversuchen bei einem Kaninchen eine Atemsperre zu zeigen. Dabei wurde durch ein Versehen die Lunge des Versuchstieres zu stark gebläht, so daß es zu Zerreißen der Lunge an einzelnen Stellen kam. Daran verendete auch das Tier. Die gleich darauf entnommene Lunge ist auf der Abb. 6 dargestellt. Das Bild zeigt einzelne hämorrhagische Herde an der Lungenoberfläche. An der Basis der Lunge sind mehrere Herde zusammengeflossen. Die Herde nahmen auf der Oberfläche daher zum Teil einen ziemlich großen Umfang an. Auf Schnitten fanden sich sehr viele kleine Herdchen von fast der gleichen Größe, wie bei der Staublunge. Zahlreiche Stellen der Lunge, auf dem Bild besonders deutlich an der Lungenspitze, waren emphysematisch überdehnt. Daraus ergibt sich, daß einzelne Lungenabschnitte der Dehnung besonders geringen Widerstand entgegensetzen. Diese platzen bei Überdehnung der Lunge, werden bei Staubinhalation mit Staub gefüllt und bei gewöhnlicher Atmung mit Frischluft versorgt. Das einzelne Lungenläppchen scheint dabei eine funktionelle Einheit darzustellen; denn die Größe der mit Staub gefüllten Herde entspricht der Größe eines Läppchens.

3. Der Schichtwechsel.

Wie ich schon angedeutet habe, müssen wir annehmen, daß nicht immer die gleichen Läppchen mit frischer Luft versorgt werden, sondern daß sie mit jedem Atemzug einander ablösen. Matthaei hat diesen Vorgang, der in anderen Organen nachgewiesen ist, als den Arbeitswechsel bezeichnet. Er ist bekannt für die Glomeruli der Niere und für die Blutkapillaren der Haut. Pracht hat ihn im hiesigen Institut für den quergestreiften Muskel wahrscheinlich gemacht.

Bei der Lunge haben wir nun den Vorteil, daß wir den Schichtwechsel sehr einfach verfolgen und in seiner Größe überschauen können. Ich habe zu diesem Zweck einfach mehrere Atemzüge hintereinander reinen Sauerstoff geatmet und jedesmal den Stickstoffgehalt der ausgeatmeten Luft gemessen. Während sich aus dem Stickstoffgehalt der Ausatemungsluft des ersten Atemzuges die Durchlüftungsbeteiligung berechnen läßt, wie ich schon erwähnt habe, so läßt sich aus dem Stickstoffgehalt bei den übrigen Atemzügen berechnen, wieviel von der bisher nicht durchlüfteten Lungenluft in diesem Atemzug neu durchlüftet wurde. Zu diesem Zwecke mußte ich aber vollkommen gleichmäßig atmen, damit die Durchlüftungsbeteiligung in allen Atemzügen so groß bleibt wie beim ersten.

Da wir den Stickstoffgehalt der Lungenluft, die beim ersten Atemzug mit Frischluft vermischt wurde, kennen, so könnten wir den Stickstoffgehalt der Ausatemungsluft nach dem zweiten Atemzug berechnen, wenn die gleichen Läppchen wieder durchlüftet worden wären wie beim ersten. Da wir aber einen höheren Stickstoffgehalt finden, so können wir daraus schließen, daß Lungenabschnitte in den Durchlüftungsvorgang mit einbezogen wurden, die mehr Stickstoff enthielten, also bisher nicht durchlüftete Läppchen. Aus der Größe des Stickstoffgehalts dieser Ausatemungsluft ergibt sich dann, wieviel von der Verweilluft in den Durchlüftungsvorgang einbezogen wurde. Da wir aber eine gleichbleibende Durchlüftungsbeteiligung annehmen können, ergibt sich auch, wieviel von der im ersten Atemzug gemischten Luft im zweiten sich nicht an der Durchlüftung beteiligte. Abb. 7 veranschaulicht den Schichtwechsel.

Wenn wir nun die Annahme machen, daß diese beim zweiten Atemzug von der Durchlüftung frisch ausgeschalteten Läppchen erst dann wieder bei der Durchlüftung an die Reihe kommen, wenn vorher alle noch nicht durchlüfteten einmal an der Reihe waren, so können wir auch die Verschiebung der Schicht im dritten und in allen folgenden Atemzügen berechnen. Für die Richtigkeit dieser Annahme spricht, daß die berechnete Schichtverschiebung in allen Atemzügen annähernd gleich bleibt.

Ich habe nun den Verlauf des Arbeitswechsels bei Ruhe und während der Arbeit untersucht und gefunden, daß es bei Ruhe etwa 85 Sekunden oder 17 Atemzüge dauert, bis sämtliche

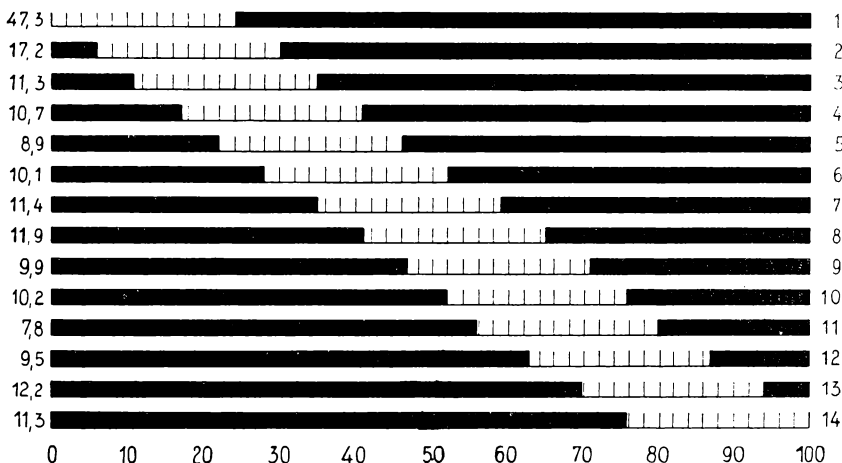


Abb. 7.

Der Schichtwechsel bei der Durchlüftung. Hell sind die geöffneten, schwarz die verschlossenen Alveolen gezeichnet. Die Zahlen am linken Rand geben den prozentualen Stickstoffgehalt der Atmungsluft an.

Lungenabschnitte einmal durchlüftet werden, bei Arbeit dagegen dauert es nur 40 Sekunden oder 13 Atemzüge. Da die Form der Atembewegung bei Arbeit wesentlich anders ist als in der Ruhe — die Lungenluft ist vermehrt, die Atemluft ist wesentlich vergrößert und die Frequenz stark beschleunigt —, habe ich noch den Einfluß dieser einzelnen Größen auf den Arbeitswechsel untersucht und gefunden, daß nur die Größe der Atmungsluft eine wesentliche Rolle spielt. Die Schichtverschiebung ist um so geringer, je größer die Durchlüftungsbeteiligung ist. Auffallend unbedeutend ist der Einfluß der Atemfrequenz. Von großem Einfluß ist der Atembedarf des Organismus. Bei Anstrengung vollzieht sich der Arbeitswechsel wesentlich schneller, wenn man die Lunge in gleicher Weise zu durchlüften versucht wie in Ruhe.

Um den Sinn des Arbeitswechsels in der Lunge zu verstehen, müssen wir uns folgendes vor Augen halten: Die von der Durchlüftung abgeschalteten Alveolen verhalten sich in keiner Weise untätig. In ihnen vollzieht sich der für die Atmung so wichtige Vorgang des Gasaustausches zwischen Al-

veolenluft und Lungenblut. Die Zahl der abgeschalteten Alveolen ist bei Ruhe besonders groß. In diesem Fall muß sich ja auch der Gaswechsel ohne Unterstützung eines großen Druckunterschiedes zwischen den Partialdrucken in Luft und Blut vollziehen. Für den an der Durchlüftung teilnehmenden Anteil der Lunge aber wird die Frischluftversorgung viel günstiger, als wenn die ganze Lunge stets gleichmäßig durchlüftet würde. Dadurch kommt es zu einer vollständigeren Ausnutzung der eingeatmeten Frischluft.

4. Die Steuerung des Schichtwechsels.

Wie ich bereits erörtert habe, ist die teilweise Ausschaltung der Lunge von der Durchlüftung auf den verschiedenen Tonus der Muskulatur in den einzelnen Lungenabschnitten zurückzuführen. Der Arbeitswechsel kommt durch eine Veränderung des Tonus zustande. Wie zahlreiche frühere Untersuchungen ergeben, besteht eine Abhängigkeit des Muskeltonus von der Kohlensäurespannung in den betreffenden Gebieten. Da durch die Versorgung mit Frischluft der Kohlensäuregehalt der durchlüfteten Lungenabschnitte sinkt, muß das zu einer Tonusänderung führen. Bis zu den Konzentrationen, wie sie normalerweise in der Lunge vorkommen, setzt ein steigender Kohlensäuregehalt den Tonus herab. Es ist also dann gerade in den Lungenabschnitten, die den höchsten Kohlensäuregehalt haben, der Muskeltonus am niedrigsten. Das ist zweckmäßig; denn so kommt es, daß immer die Lungenläppchen bei der Einatmung geöffnet werden, die die kohlenäurereichste Luft enthalten. Ist ein solches Lämpchen wiederholt durchlüftet worden, so sinkt sein Kohlensäuregehalt stark ab. Das führt zu einer Erhöhung des Muskeltonus. Damit wird das Lämpchen von der Durchlüftung ausgeschaltet. Abb. 8 soll das Verhalten eines Lämpchens veranschaulichen.

So regelt der Kohlensäuregehalt des Lämpchens seine Durchlüftung ganz ähnlich wie der Kohlensäuregehalt irgendeines Gewebsabschnittes durch Verminderung des Tonus der Gefäßmuskulatur eine bessere Durchblutung bedingt. Ebbecke hat diesen Vorgang als die lokale vasomotorische Reaktion bezeichnet, dementsprechend nenne ich den beschriebenen Vorgang in

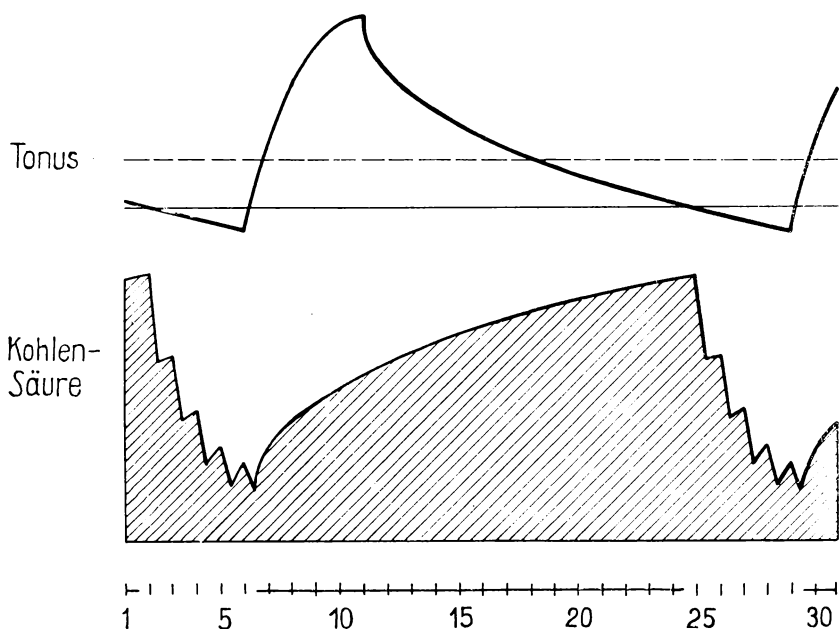


Abb. 8.

Muskeltonus und Kohlensäuregehalt eines einzelnen Lämpchens. Unten ist die Reihe der Atemzüge eingetragen. Nur dort, wo die Waagrechte unterbrochen ist, wird das Lämpchen mit Frischluft versorgt. Die Waagrechten in der oberen Kurve deuten den Aufwand der Einatemmuskeln an, den den Tonus zu überwinden sucht.

der Lunge nach dem Vorschlage Matthaeis lokale bronchomotorische Reaktion (LBR).

Die Lunge steuert also ihren Arbeitswechsel selbsttätig.

5. Das neue Bild des Durchlüftungsvorganges und die sich daraus ergebenden neuen Fragen.

Durch die angeführten Ergebnisse gewannen wir ein ganz neues Bild über den Durchlüftungsvorgang. In einem Trickfilm habe ich die Abhängigkeit des Schichtwechsels vom verschiedenen Kohlensäuregehalt der einzelnen Lämpchen schematisch dargestellt. Ich will hier mit Hilfe einiger Zeichnungen, die der Darstellung im Film entsprechen, den Vorgang kurz erläutern.

Das Schema stellt die Alveolen von vier verschiedenen Lungenläppchen dar. Das obere Bild zeigt die Ausatemungsstellung. Alle Alveolen und Lappchenbronchen sind verschlossen. Durch Schraffieren ist der Kohlensäuregehalt der einzelnen Lappchen dargestellt. Die dunkelsten enthalten die meiste Kohlensäure. Nun beginnt die Einatmung (2. Bild). Da sich der Tonus dem Kohlensäuregehalt entsprechend verhält, werden die Lappchen verschieden stark ausgedehnt. Nur der zu dem Lappchen mit dem höchsten Kohlensäuregehalt (links) führende Bronchulus öffnet sich. Nun strömt Luft durch diesen Bronchus (3. Bild). Die Alveolen seines Lappchens vergrößern sich stark, während sich die übrigen wegen des nachlassenden Unterdruckes wieder verkleinern. Der Kohlensäuregehalt des belüfteten Alveolen sinkt ab. Das unterste Bild zeigt die Verhältnisse während der darauffolgenden Ausatemungsstellung. Das eben durchlüftete Lappchen hat den geringsten Kohlensäuregehalt, daher den höchsten Tonus. Es bleibt nun verschlossen. In den übrigen Lappchen ist die Kohlensäure unterdessen gestiegen. Wenn nun wieder eingeatmet wird, kommt ein anderes Lappchen für die Frischluftversorgung an die Reihe.

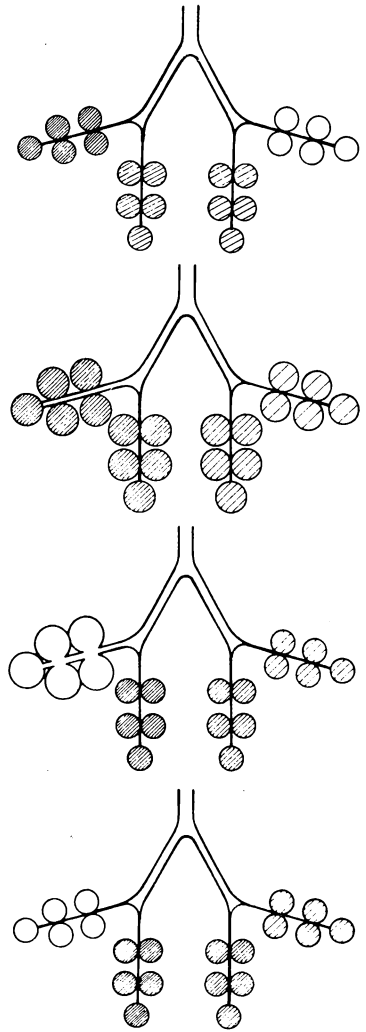


Abb. 9.

Der Einfluß der Kohlensäure auf das Verhalten der Alveolen und Lappchenbronchen bei der Einatmung. Die Bilder zeigen von oben nach unten: Ausatemungsstellung, beginnende Einatmung, vollständige Einatmung, darauffolgende Ausatemung. Durch die Schraffierung ist der Kohlensäuregehalt der Luft in den Alveolen angedeutet.

Selbst in dem stark schematisierten Film sind die Verhältnisse der Schichtverschiebung gar nicht so leicht ohne längere Beobachtung zu überschauen. Der Film zeigt somit die außerordentliche Schwierigkeit, den Arbeitswechsel durch einzelne Beobachtungen an irgendeinem Organteil zu verstehen. Wenn es deshalb etwa auf dem Verzárschen Film von der Bewegung der Darmzotten auch keine Regelmäßigkeit in der abwechselnden Tätigkeit der Zottenbewegung zu geben scheint, so halte ich doch den Schluß Verzárs für übereilt, wenn er meint, daß er in seinem Film nachweisen könne, daß sich die Darmzotten regellos zusammensziehen.

Ungeklärt bleibt noch die Frage nach dem Ursprung des ungleichmäßigen Verhaltens der einzelnen Lungenabschnitte. Man könnte versuchen, die Frage anatomisch zu erklären. Der zerklüftete Lungenraum bringt es mit sich, daß der Weg zu verschiedenen Alveolen für die Luft nicht gleich schwer ist. Es könnte nun sein, daß bei zunächst gleichem Kohlensäuregehalt der gesamten Lunge die Alveolen, die den Hauptbronchen am nächsten liegen, belüftet werden. Wenn dann hier der Tonus steigt, kommen andere an die Reihe. Diese Annahme erscheint mir jedoch nicht glücklich. Wir werden vielmehr die Ursache in der Selbsttätigkeit der Lunge suchen müssen. Da die Lunge, wie ich noch zeigen werde, aktiv Kohlensäure ausscheiden kann, können wir annehmen, daß diese primär nicht in allen Abschnitten den gleichen Partialdruck hat.

a) Der Vorgang des Gasaustausches in der Lunge.

Ich habe nun bereits die erste Frage angeschnitten, die sich aus der neuen Vorstellung über das Verhalten der Lungendurchlüftung ergibt.

Ich muß hier ihrer Merkwürdigkeit wegen eine Ansicht erörtern, die heute vielfach vertreten wird. So schreibt Rein in seinem Lehrbuch:

„Man findet die CO_2 -Spannung im Blute stets um einige mm Hg höher als in der Alveolarluft bei aufrechterhaltener Atmung. Es ist also in keiner Weise nötig, eine aktive Mitwirkung der Alveolarepithelien für den Gastransport im Sinne einer „Gasdrüse“ anzunehmen.“

Obwohl man anerkennt, daß sowohl die Galle als auch der Urin mehr Kohlensäure enthalten können als der Spannung dieses Gases im Blute entspricht, so bestreitet man immer noch die Fähigkeit der Lunge, aktiv Kohlensäure auszuschcheiden, obwohl doch gerade dieses Organ die Aufgabe hat, die überschüssige Kohlensäure abzugeben. Selbst die viscerale Pleura hat die Fähigkeit, Kohlensäure zu sezernieren. Auch der vergleichenden Physiologie ist es hier nicht gelungen klärend zu wirken, obwohl doch vor Jahrzehnten schon Christian Bohr die aktive Gasabsonderung in Schwimmblasen von Fischen nachgewiesen hat.

Eine andere Frage ist es allerdings, ob die Lunge unter gewöhnlichen Bedingungen aktiv Kohlensäure abgibt. An Hand der ausgeführten Erkenntnisse über den Durchlüftungsvorgang bietet sich mir die Gelegenheit, dazu Stellung zu nehmen.

Ich maß in wiederholten Versuchen bei Ruhe die von mir ausgeschiedene Kohlensäure im Verlaufe einer Minute. Ich habe dabei immer ganz gleichmäßig geatmet und machte zwölf Atemzüge von 500 ccm Tiefe in der Minute. Ich schied dabei im Durchschnitt rund 320 ccm CO_2 pro Minute aus. Die Zahl gibt eine durchaus zu erwartende Größe. Wenn ich daraus auf meinen Kalorienverbrauch schließe, so finde ich einen Tagesumsatz von etwa 2400 Kalorien, während mein Sollgrundumsatz 1800 Kalorien pro Tag beträgt. Bei jedem Atemzug würde ich dann 26,7 ccm Kohlensäure ausscheiden.

Würde ich nach der alten Auffassung annehmen, daß sich die 500 ccm meiner Einatemungsluft mit den zwei Litern meiner Lungenluft gemischt hätten, so wäre der Kohlensäuregehalt meiner Lungenluft nur 1,2%. Ist aber, wie es meinen Befunden entspricht, nur ein Viertel der Lungenluft, also etwa 500 ccm, mit der eingeatmeten Frischluft vermischt worden, so muß die Alveolenluft etwa 5,3% Kohlensäure enthalten. Diese Größe entspricht auch dem durch Lungenkatheterung von anderen Autoren festgestellten Kohlensäuregehalt der Alveolenluft.

Bei ruhiger Atmung beträgt die durch den Arbeitswechsel bedingte Schichtverschiebung etwa 5% des ganzen Lungeninhaltes. Von den bei einem bestimmten Atemzug durchlüfteten 500 ccm der Lungenluft sind dann etwa 100 ccm neu in den Durchlüftungsvorgang einbezogen worden. 100 ccm wurden schon im vorhergehenden Atemzug einmal durchlüftet. Die

dritten 100 ccm sind schon zweimal, weitere 100 schon dreimal und die letzten 100 ccm viermal unmittelbar vorher durchlüftet worden. Daraus geht hervor, daß der Kohlensäuregehalt dieser einzelnen Anteile der an der Durchlüftung teilnehmenden Lungenluft verschiedenen Kohlensäuregehalt haben müssen; denn wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit kann in den eben erst viermal hintereinander mit Frischluft versorgten Alveolen durch Diffusion nicht genügend Kohlensäure gelangt sein, um einen einheitlichen Kohlensäuregehalt von 5,3% im durchlüfteten Lungenabschnitt herzustellen. Was aber an Kohlensäure aus den einen Abschnitten nicht stammen kann, muß in den anderen gewesen sein. Mehr als 5,8% Kohlensäure kann allein durch Diffusion überhaupt in keinen Lungenabschnitt gelangen, weil das schon der Kohlensäurespannung im Blute selbst entspricht. Wenn also einzelne Lungenabschnitte, wie sich durch Berechnung zeigen läßt, wesentlich mehr Kohlensäure enthalten, so muß die Lunge aktiv Kohlensäure sezerniert haben¹⁾.

Allerdings ist dabei noch darauf Rücksicht zu nehmen, daß durch das Einwandern von Sauerstoff in das Blut die Fähigkeit des Hämoglobins Kohlensäure zu binden nachläßt. Der Unterschied aber reicht nicht aus, um die vermehrte Kohlensäurespannung in den Alveolen zu erklären.

Wir müssen also annehmen, daß bei gewöhnlicher Atmung von der Lunge Kohlensäure durch einen sekretorischen Vorgang ausgeschieden wird. Das gleiche gilt für eine durch Arbeit gesteigerte Atmung. Die Sauerstoffaufnahme, die nach den Betrachtungen Bohrs bisher nicht durch Diffusionsvorgänge erklärt werden konnten, scheint dagegen jetzt, nachdem wir zu genauerer Kenntnis des Durchlüftungsvorganges gelangt sind, allein durch Diffusion möglich zu sein.

b) Die Möglichkeit einer vollständigen Durchlüftung der Lunge.

Die bisher genannten Formen der Atmung führen immer nur zu einer unvollständigen Durchlüftung der Lunge während

1) Ich habe den Kohlensäuregehalt der fünf verschiedenen Anteile auf 12,2, 4,1, 3,7, 3,1 und 2,5% geschätzt. Die Zahlen sind unsicher und sind hier mit Vorbehalt angegeben, um eine vorläufige Orientierung zu ermöglichen.

eines Atemzuges. Wir suchten nun nach einer Atemform, die die ganze Lunge auf einmal mit Frischluft versorgt. Diese Form der Atmung glaubten wir im Gähnen zu finden.

In der Literatur wird das Gähnen spärlich behandelt, obwohl es sich bei dieser durchaus physiologischen Atembewegung, die allerdings auch häufig unter krankhaften Verhältnissen gesteigert und charakteristisch verändert auftritt, um eine sehr interessante Form der Atembewegung handelt.

Ich möchte nicht versäumen, meinem hochverehrten klinischen Lehrer, Herrn Geheimrat J a m i n , für eine gelegentliche Anregung zur genaueren Beachtung des Gähnvorganges zu danken. Er konnte damals der Physiologie mit Recht vorwerfen, daß sie diesem interessanten Lungendurchlüftungsvorgang immer aus dem Wege ginge. Ich glaube diesen Vorwurf bis zu einem gewissen Grade wettgemacht zu haben mit meinen Untersuchungen über die Bedeutung des Gähnens für die Lungendurchlüftung.

Das Gähnen ist eine Atembewegung, die durchaus zu den physiologischen Formen der Atmung zu rechnen ist. Für keinen Menschen dürfte ein Tag vergehen, ohne daß er gegähnt hätte. In krankhaften Fällen kommt eine Steigerung der Gähntätigkeit in oft charakteristischer Form vor. Bekannt ist das gehäufte Gähnen bei Leuten mit teilweiser stillgelegter Lunge, bei Erkrankung von Organen des Bauches, z. B. bei Schrumpfniere und starken Blutungen im Bereiche des weiblichen Genitalapparates. Wichtig ist das Gähnen als Symptom bei Encaphalitiden. Gehäuft tritt das Gähnen bei Psychopathen auf.

Durch seinen charakteristischen Ablauf ist das Gähnen in allen Fällen sowohl subjektiv als auch objektiv klar von allen anderen Formen der Lungendurchlüftung unterschieden. Innerhalb der einzelnen Gähnbewegungen gibt es aber wieder große Unterschiede, so daß es mir zweckmäßig erschien, verschiedene Formen einander gegenüberzustellen.

Es gibt eine Form des Gähnens beim Müdewerden, ein Gähnen beim Erwachen, das dadurch charakteristisch ist, daß es mit einem Sich-recken verbunden ist, ferner ein Gähnen im Hungerzustand und ein Gähnen, das suggestiv auftritt. Das Gähnen ist bei den meisten Säugetieren beobachtet. Ich erinnere nur an das häufig zu beobachtende Gähnen des Haus-

hundes. Es kommt aber auch bei Vögeln vor. So kann es häufig bei Gänsen beobachtet werden. Matthaei fand auch ein Gähnen beim Frosch, wenn er einen bestimmten Eingriff am Zentralnervensystem vorgenommen hatte.

Die Vermutung von der vollständigen Lungendurchlüftung beim Gähnen hat sich bestätigt. Eine vollständige oder wenigstens fast vollständige Lungendurchlüftung mit einer Durchlüftungsbeteiligung von über 97% fand ich bei einer der genannten Formen des Gähnens an mir selber, nämlich beim Gähnen aus Müdigkeit. Wir können die Ursache dieses Gähnens in folgendem Vorgang erblicken. Während unsere Atmung in Ruhe durchaus nicht gleichmäßig tief ist (ich habe diese Atmung in Anlehnung an das Spiel unseres Auges als eine spielende Atmung bezeichnet), wird sie beim Ermüden auffallend flach und gleichmäßig. Dadurch kommen einzelne Bezirke unserer Lunge oft sehr lange bei der Durchlüftung nicht an die Reihe. Die lokale Anreicherung von Kohlensäure in der Lunge, die zu keiner Atemnot führt, weil einzelne Abschnitte der Lunge immer noch ausreichend durchlüftet werden und der Sauerstoffbedarf des Körpers verhältnismäßig gering ist, bedingt eine gelegentliche möglichst vollständige Lungendurchlüftung, um die Kohlensäure aus der Lunge wieder einmal herauszuspülen. Gleichzeitig führt sie zu einer Änderung der Weise, in der wir unsere Lunge durchlüften.

Neben der Bedeutung für die Durchlüftung hat das Gähnen einen bedeutsamen Einfluß auf den Kreislauf. Durch das Kontrahieren der Bauchdecke auf dem Höhepunkt der Gähnbewegung wird das Blut aus den Baueingeweiden und besonders aus der Leber ausgedrückt.

Eine weitere wesentliche Bedeutung hat das Gähnen für den Tonus des Zentralnervensystems. Durch das Sich-recken, das mit dem Gähnen vereinigt auftritt, werden unsere Muskeln in einem Umfang kontrahiert, wie wir es kaum unter anderen physiologischen Verhältnissen wiederfinden dürften.

Daneben beeinflusst das Gähnen die Verdauung in zweierlei Hinsicht. Zunächst wird rein mechanisch durch die genannte Kontraktion der Bauchdecke mechanisch die Peristaltik des Darmes angeregt. Aber auch die Verdauungssäfte werden aus ihren Speichern ausgepreßt. So wird sicherlich bei der Massage der

Leber und Gallenblase Galle in den Darm befördert. Das Ausspritzen des Parotisspeichels beim Gähnen können wir gut subjektiv beobachten.

Schließlich dient das Gähnen dem Ausdruck. Wie wir durch das Lachen, das ja auch als Atembewegung aufgefaßt werden kann, unsere Freude zum Ausdruck bringen, so zeigen wir durch das Gähnen, gewollt oder ungewollt, unserer Umgebung unsere Langeweile an.

Zusammenfassung.

Bei dem kurzen Überblick über unsere neuen Gedanken zur Physiologie der Atmung und dem Versuch zu zeigen, wie sie sich bewähren, wollte ich in erster Linie darlegen, daß sich die Lunge bei der Atmung nicht passiv verhält. Die Aktivität zeigt sich in dreierlei Hinsicht.

1. Die Lunge arbeitet mit wechselnder Belegschaft.
2. Die Lunge reguliert weitgehend ihre Durchlüftung bei jedem einzelnen Atemzug von sich aus.
3. Die Lunge ist fähig, Kohlensäure zu sezernieren und sie tut das unter gewöhnlichen Atembedingungen.

Den Weg, der solche Erkenntnisse durch Experimente erhärten soll, habe ich in Umrissen aufgezeigt.

Eine Aktivität der Lunge ist immer wieder vermutet worden, nur wurde sie häufig an verkehrter Stelle gesucht. Die Lunge kann sich von sich aus weder füllen noch leeren. Das kann kein Atmungsorgan in der ganzen Tierwelt, wie es auch immer gestaltet sein mag. Es ist überhaupt bis heute noch nicht gelungen, die aktive Erweiterung eines Hohlorganes nachzuweisen.

Es ist für mich eine besondere Befriedigung bei meinen Untersuchungen, zu einem Ergebnis gelangt zu sein, das geradezu als selbstverständlich vorausgesetzt werden konnte. Tatsächlich waren meinem Chef, Herrn Professor Matthaei, schon längst solche Vorstellungen über die Atmung des Menschen geläufig, als ich ihn vor fast vier Jahren bat, in seinem Institut mit den eingangs erwähnten Versuchen über die Blutmengenermittlung am lebenden Menschen beginnen zu dürfen.

Wie aus meinen Ausführungen hervorgeht, sind alle genannten Untersuchungen von teleologischen Gedanken geleitet. Es scheint mir nicht überflüssig zu betonen, daß es berechtigt, ja notwendig ist, biologische Fragen in dieser Weise anzugehen, weil vielfach ein entgegengesetzter Standpunkt eingenommen wird und man diese „spekulative“ Forschung ablehnen zu müssen glaubt. Schon Kant hat eine teleologische Ausrichtung der biologischen Forschung gefordert, weil die jedem Organismus inwohnende bildende Kraft durch bloßen Mechanismus nicht erklärt werden könne. Er schreibt in § 66 seiner „Kritik der Urteilskraft“: „Ein organisiertes Produkt der Natur ist das, in welchem alles Zweck und wechselseitig auch Mittel ist. Nichts in ihm ist umsonst, zwecklos, oder einem blinden Naturmechanismus zuzuschreiben.“

Wie sich ein teleologischer Standpunkt in der Forschung bewährt, glaube ich nachgewiesen zu haben.

Bei der Schilderung des Gähnens und der Untersuchung über die Atemsperre habe ich weiterhin die Bedeutung des Selbstversuches gezeigt. Ich möchte zum Schlusse noch einmal darauf hinweisen; denn ich sehe darin die wichtigste allgemeine Erkenntnis, die ich bei meinen ausgedehnten Untersuchungen gewonnen habe. Bei voller Würdigung des auf dem Tierexperiment aufbauenden Standpunktes der vergleichenden Physiologie der letzten Jahrzehnte möchte ich mich zu der subjektiven Betrachtungsweise Goethes bekennen. Das Forschungsmittel dieser Betrachtungsweise der Lebensvorgänge ist der Selbstversuch, dessen Bedeutung für die Sinnesphysiologie heute allgemein anerkannt wird, der aber auf den übrigen Gebieten der Physiologie noch weit größere Beachtung verdiente, als ihm heute zuteil wird. Der Selbstversuch leistet etwas, was keine andere Untersuchungsmethode vermag: in ihm allein haben wir einen über die Beobachtung hinausführenden Weg der Erkenntnis, das Erlebnis.

Ich stelle an das Ende meiner Ausführungen ein paar Sätze aus Schopenhauers „Farbenlehre“. Nachdem Schopenhauer vorher auf die Unerläßlichkeit der „Autopsie“ für das Verständnis seiner Theorie der Farbe (§ 5) hingewiesen hat, schreibt er: „Dieser Weg der Betrachtung überhaupt aber, der vom beobachteten Gegenstand auf den Beobachter selbst, vom Objek-

tiven zum Subjektiven, zurück geht, ließe sich durch ein paar der glänzendsten Beispiele aus der Geschichte der Wissenschaft empfehlen und als der richtige bekunden: denn

Non aliter, si parva licet componere magnis,
hat Kopernikus an die Stelle der Bewegung des ganzen Firmaments die der Erde, und der große Kant an die Stelle der objektiv erkannten und in der Ontologie aufgestellten, absoluten Beschaffenheit der Dinge, die Erkenntnisformen des Subjekts gesetzt. *Γνωθι σαυτόν* stand auf dem Tempel zu Delphi!“ (§ 8).

Meine Arbeiten, die sich mit dem vorgetragenen
Stoff befassen:

Der Verlauf der Entlüftung der Lunge bei reiner Sauerstoffatmung, *Z. Biol.* 99, 596. — Ein Weg zur Bestimmung der Blutmenge, *Z. Biol.* 100, 34. — Die lokale bronchomotorische Reaktion (LBR), *Pflügers Arch.* 244, 536. — Das Gähnen als Atembewegung, erscheint in *Z. Biol.* — Die Atemsperrre, *Z. Biol.* 100, 518.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Sozietät zu Erlangen](#)

Jahr/Year: 1940-1941

Band/Volume: [72](#)

Autor(en)/Author(s): Engelhardt Albrecht

Artikel/Article: [Neue Gedanken zur Physiologie der Atmung und ihre Bewährung. 189-215](#)