XXI.

Aus dem pharmakologischen Institut in Zürich.

In welcher Respirationsphase ist die Lunge am besten durchblutet?

Von

M. Cloetta.

(Mit 14 Kurven, 4 Abbildungen und 3 Tafeln.)

Die als Überschrift gewählte Frage habe ich ¹⁾ schon in einer früheren Mitteilung im Zusammenhang mit anderen Dingen im Text aufgeworfen. Ich bin damals zu der Ansicht gelangt, daß die Verhältnisse für die Durchblutung der Lunge am günstigsten liegen bei der Expiration und am ungünstigsten auf der Höhe der Inspiration. Diese Auffassung hat sich ergeben auf Grund der plethysmographischen Kurven der Lunge, der Druckmessungen im rechten Ventrikel, der Blutbestimmung des Lungengewebes, des Verhaltens des Karotisdruckes und der Durchsicht der mikroskopischen Präparate der Lunge. Unter den damals von mir angeführten Belegen berechtigten nur die Senkung des Karotisdruckes und die Verkleinerung des systolischen Druckes im rechten Ventrikel, welche beide regelmäßig die Inspirationsphase begleiten, noch zu einer anderen Deutung. Es können nämlich diese beiden Veränderungen angesehen werden als durch inspiratorische Gefäßerweiterung in der Lunge bedingt. Für die Verhältnisse im rechten Ventrikel liegt die Sache allerdings nicht klar, denn es werden ähnliche Druckkurven auch erhalten bei der sogen. Überdruckatmung, die ja sicher eine Erschwerung der Lungenzirkulation bedeutet. Die Karotissenkung könnte sehr wohl dadurch erklärt werden, daß bei der Inspiration in die erweiterten Lungengefäße vorübergehend mehr Blut aufgenommen wird, so daß der linke Vorhof weniger davon erhält. Ob nun die verminderte Blutzufuhr zum linken Vorhof bedingt ist durch Behinderung der Passage durch die Lunge auf der Höhe der Inspiration (meine Anschauung) oder durch Vergrößerung der Blutaufnahme in den Lungengefäßen (die herrschende Ansicht von der besseren Durchblutung der Inspirationslunge),

1) M. Cloetta, Arch. f. exp. Pathol. u. Pharmakol. Bd. 66, S. 409.

das läßt sich leider durch Zeitmessungen nicht feststellen, da die beiden Vorgänge und deshalb auch ihre Wirkungen zeitlich theoretisch genau zusammenfallen. Ich habe mich nun mit Rücksicht auf den erwähnten Einwand und in dankbarer Anerkennung des Interesses, das einige Kollegen schriftlich und mündlich mir gegenüber geäußert, verpflichtet gefühlt, diese für die Physiologie wie für die Pathologie sehr wichtige Frage nochmals experimentell zu prüfen, um so mehr, als, wie schon angedeutet, die Auffassung von der besseren Durchblutung der Expirationslunge im Gegensatz steht zu der herrschenden Ansicht.

Tatsächlich erscheint es uns a priori zweckmäßiger, wenn die Lunge bei der Inspiration mehr Blut in sich aufnimmt, weil dann ein größerer Bruchteil der Blutmenge mit O_2 gesättigt wird. Durch eine Reihe von experimentellen Arbeiten, die ich schon in meiner früheren Mitteilung besprochen habe, ist diese Ansicht gut gestützt. Man kann sich aber doch des Eindrucks nicht erwehren, daß die theoretisch als zweckmäßig vorausgesetzte bessere Durchblutung der Inspirationslunge auch unwillkürlich die Versuchsbedingungen und die Deutung der erhaltenen Resultate etwas beeinflußt habe. Man muß sich doch auch daran erinnern, daß die Lunge selber eine ausgiebige Ernährung nötig hat, und daß diese letztere bei erschlafftem Lungengewebe erfolgreicher sein wird, liegt auf der Hand. Von diesem Gesichtspunkte aus könnte die vermutete Zweckmäßigkeit sich auch in anderer Richtung bewegen. Es muß ferner darauf hingewiesen werden, daß für die O_2 -Aufnahme durch das Hämoglobin kein wesentlicher Unterschied besteht zwischen Inspirations- und Expirationsphase, insofern als bei der Expiration ja nur ca. $\frac{1}{2}$ Proz. mehr CO_2 und weniger O_2 in der Alveolariuft vorhanden ist, als bei der Inspiration, so daß auch bei der Expiration nach Zuntz und Loewy¹⁾ sich noch 97 Proz. des Hämoglobins mit O_2 sättigen.

Die bessere Durchblutung der Inspirationslunge soll nach der herrschenden Ansicht außer durch die lebendige Kraft des rechten Ventrikels auch noch durch Begünstigung des Druckgefälles in den Lungengefäßen zustande kommen. Daraus würde sich neben der Vermehrung auch eine Beschleunigung der Durchblutung ergeben. Da erscheint denn auch die Erwägung berechtigt, ob dem respiratorischen Gaswechsel an sich besser gedient ist mit einer rascheren Strömung größerer Blutmassen durch ein erweitertes Gefäßnetz oder durch eine langsamere bei verkleinertem Querschnitt, wobei Kontakt-

1) Zuntz und Loewy in Michaelis „Handbuch der Sauerstofftherapie“. Berlin 1906.

möglichkeit und Reaktionszeit für das einzelne Blutkörperchen günstiger liegen würde.

Wenn bei der Inspiration die Lungengefäße sich wirklich erweitern und mehr Blut aufnehmen, bei der Expiration dagegen sich verengern (herrschende Ansicht), so folgt daraus, unter Berücksichtigung des Fehlens von Gefäßklappen in der Lunge, daß bei der Expiration entweder eine Vorwärtsdrängung der Blutmassen nach dem linken Vorhof oder eine Rückstauung derselben nach dem rechten Ventrikel stattfinden muß. Der letztere Vorgang könnte sogar zu einer Diskontinuität der Lungendurchblutung führen, wenn nämlich die elastische Retraktionskraft der Lunge dem Druck in der Arteria pulmonalis gewachsen wäre. Leider sind wir über die elastische Kraft der normalen Lunge noch in keiner Weise orientiert.

Aus den wenigen angeführten Überlegungen ergibt sich, daß man auch theoretisch über die Zweckmäßigkeit einer besseren Durchblutung der Inspirationslunge verschiedener Ansicht sein kann. Maßgebend für die endliche Entscheidung dieser Frage sind aber natürlich die während den beiden Respirationsphasen in Betracht kommenden physikalischen Verhältnisse, zu deren weiterer Aufklärung die folgende Mitteilung dienen soll. Auch diesmal hatte ich mich für den mechanischen Teil der Frage des freundlichen Interesses von Herrn Prof. Stodola zu erfreuen.

Beim Übergang der Lunge von der Expirations- in die Inspirationsstellung findet eine zweifache Einwirkung auf die Gefäße statt. Bei der Volumsvergrößerung der Lunge muß jeder einzelne Teil des Gewebes, also auch die Gefäße, entsprechend linear gedehnt werden. Diese Art der Deformation kann natürlich nur unter gleichzeitiger Verengerung des Gefäßlumens erfolgen. Daneben geht aber noch eine andere Einwirkung einher. Bei der Inspiration entsteht die zur Entfaltung des Lungengewebes notwendige Kraft als Druckdifferenz an der Pleura pulmonalis, und zwar gleichmäßig verteilt über die ganze Pleura. Bei der Entstehung des negativen Druckes im Pleura-raum, muß die vom Bronchialbaum her unter Atmosphärendruck stehende Pleura pulmonalis sich nach-außen dehnen. Dabei zieht sie das mit ihr verwachsene Lungengewebe nach, und da dieser Zug gleichzeitig von der ganzen Oberfläche aus erfolgt, so ist die Bedingung gegeben, daß auf einen beliebigen Punkt im Innern der Lunge ein Zug nach drei Richtungen ausgeübt wird. Die theoretische Folge davon müßte eine Erweiterung der in den Gewebsmaschen liegenden Gefäße sein. Das wäre die zweite Art der Gefäßdefor-

mierung. Die beiden Vorgänge stehen somit in Bezug auf ihre Einwirkungen auf die Gefäßweite in einem gegensätzlichen Verhältnis zueinander. Überwiegt die lineare Dehnung in der Längsrichtung, so muß der Gefäßquerschnitt verkleinert werden und es steigt der Widerstand in demselben; überwiegt dagegen der seitliche Gewebszug, so muß das Lumen erweitert werden. An und für sich ständen der gleichzeitigen linearen Längsdehnung und queren Ausweitung der Gefäße keine physikalischen Bedenken entgegen, wenn die Elastizität des Lungengewebes sich verhalten würde wie die einer Gummimembran, und wenn nach der anatomischen Anordnung des Lungengewebes das räumlich möglich wäre, denn die Deformation einer elastischen Platte erfolgt sogar leichter, wenn sie gleichzeitig nach zwei Richtungen beansprucht wird; es würde dann lediglich eine bedeutende Wandverdünnung resultieren. Über die Elastizitätsverhältnisse der verschiedenen Lungengefäße sind wir noch nicht genügend orientiert. Dagegen kann eine Ausweitung der Gefäße proportional der Dehnung nur dann stattfinden, wenn das den Zug auf die Gefäße ausübende Gewebe eine für die in Betracht kommende Vergrößerung ungestörte Ausdehnungsmöglichkeit hat. Das ist nun aber offenbar beim Inspirationsvorgang nicht der Fall. — Wie alle mikroskopischen Präparate von Inspirationslungen zeigen, nimmt die Alveole an Stelle der theoretischen Kugelform eine polygonale an, so daß das ganze Gewebe deutliche Wabenstruktur erhält. Die schematischen Zeichnungen (Fig. 1) erläutern das Gesagte. Fig. 1a stellt die Ver-

Fig. 1a

Fig. 1b

Fig. 1c

hältnisse bei der Expirationslunge dar. Bei der Inspiration wäre unter der Annahme einer unbegrenzten Ausdehnungsfähigkeit des Lungengewebes theoretisch zu erwarten, daß die Alveolen unter Beibehaltung der Kugelform sich dehnen, wie dies Fig. 1b veranschaulicht. Infolgedessen müßte auch das in den Alveolarsepten gelegene Gefäß erweitert werden. Tatsächlich zeigt aber die Lunge bei der Inspiration

Wabenstruktur wie die Fig. 1c dies darstellt. Die Gefäße und Kapillaren kommen also bei der Dehnung der Alveolen nicht in einen sich vergrößernden dreieckigen Raum zu liegen, sondern zwischen die flächenhaft sich berührenden Alveolenwände, und es fragt sich, wie die verschiedenen Gefäßabschnitte sich demgegenüber verhalten werden. Die äußerst dünnwandigen Venen kommen unter Vermittlung der aneinandergelegten Alveolarwaben direkt unter den Einfluß des in den Alveolen herrschenden Atmosphärendruckes zu stehen. Da während der Inspiration der Druck in den Venen Null bis negativ ist, so kann sich keine Erweiterung dieser Gefäße einstellen, sondern unter dem Einfluß des flächenhaft aufliegenden Alveolardruckes und der linearen Dehnung nur eine Verengerung des Lumens. Ähnlich liegen die Dinge bei den Kapillaren, und dies ist das Ausschlaggebende, denn die Zirkulationsbedingungen werden in der Lunge noch viel mehr von deren Verhalten abhängen, als im großen Kreislauf, weil die Arterien viel kürzer sind und die Kapillaren sich rasch aus ihnen entwickeln. Zur Illustration des Gesagten verweise ich auf die Abbildungen der mikroskopischen Präparate (Taf. I und II), welche Herr Prof. Ruge so freundlich war im anatomischen Institut anfertigen zu lassen. Die Figuren der Taf. I stammen von einem Kaninchen, welches spontan atmete. Auf der Höhe der Inspiration wurde die Trachea abgeklemmt und die schon freigelegten Rippen längs dem rechten Sternalrand rasch durchtrennt und die inspiratorisch geblähte Lunge abgebunden. Darauf sofort auch links die Rippen durchtrennt, die Trachea wieder geöffnet und die linke Lunge im Moment des Kollapses abgeklemmt. Die Fig. a zeigt die Lunge im Expirationszustand, leicht erkenntlich an den breiten Alveolarsepten mit strotzend gefüllten Gefäßen und Kapillaren. Man könnte sich nun sehr wohl vorstellen, daß die nur spärlich mit Luft gefüllten Alveolen bei der nachfolgenden Inspirationsblähung gegenseitig sich radiär voneinander abheben und entfernen werden, entsprechend der schematischen Zeichnung Fig. 1b. Aus der Wiedergabe der tatsächlichen Verhältnisse bei der Inspirationslunge, wie sie uns die Fig. b der Tafel I zeigt, geht aber deutlich hervor, daß diese rein radiäre Blähungsform nicht existiert und daß die Dinge in Wirklichkeit sich so gestalten, wie das Schema in Fig. 1c andeutet. Daraus erklärt sich aber auch sofort, daß bei der natürlichen Blähung der Lunge keine Erweiterung der Gefäße (Kapillaren), wohl aber eine Längsdehnung und gleichzeitige Verengerung derselben eintritt.

Die Abbildungen der Tafel II sind gewonnen von einer Katze bei welcher die Respiration nicht spontan, sondern durch Minus-

druck in dem Lungenplethysmographen erfolgt. Die rechte Lunge wurde auf der Höhe der Inspiration (minus 9 cm H₂O) abgeklemmt und gleichzeitig auch die linke Lunge, welche durch Öffnung des Plethysmographen eben kollabierte. Wir haben also zur ganz gleichen Zeit die beiden Lungen im In- und Expirationszustand zur Vergleichung fixiert erhalten. Es geht aus den beiden Präparaten a und b der Taf. II verglichen mit denen der Taf. I hervor, daß kein Unterschied besteht in dem anatomischen Bilde zwischen der spontan atmenden Lunge (Taf. I) und der künstlich durch Minusdruck geblähten (II). Auch hier tritt die gute Blutfüllung der Kapillaren bei der Expiration und die Wabenbildung bei der Inspiration deutlich hervor.

Wäre in den Kapillaren gegenüber der Alveolarspannung noch ein positiver Druck vorhanden, so müßten dieselben die Alveolarwand verbuchten und in das Lumen prominieren. Diese Auffassung ist auch schon ausgesprochen worden. Herr Kollege Ruge und ich haben uns aber bei der Durchsicht zahlreicher Präparate von Inspirationslungen überzeugt, daß nie auch nur eine Andeutung einer Vorbuchtung in das Alveolarlumen besteht. Dementsprechend sehen wir auch in den Kapillaren der Inspirationslunge fast nie zwei Blutkörperchen nebeneinander, wohl aber mitunter Stellen, wo überhaupt kein Körperchen mehr in dem ausgezogenen Gefäß zu erblicken ist. Durch diese Rarifizierung der Blutströmung werden, wie dies oben schon angedeutet, für den respiratorischen Gaswechsel die günstigsten Oberflächenbedingungen gesetzt.

Es bleibt uns jetzt noch das Verhalten der Arterien zu erörtern übrig. Infolge ihres höheren Innendruckes halten sie dem Alveolardruck stand, könnten sogar beim Aneinanderlegen der Alveolarwände während der Inspiration einen Druck auf dieselben ausüben. Es besteht somit kein Hindernis, anzunehmen, daß die Arterien bei der Inspiration auch in querer Richtung gedehnt werden können, umso mehr, als das reichliche, sie umgebende Gewebe eher eine freiere Entwicklung gestatten würde als bei den Kapillaren. Ob diese Erweiterung wirklich eintritt, wird also hauptsächlich von ihren eigenen Elastizitätsverhältnissen abhängen. Betrachtet man die recht bedeutende Entwicklung der Ringmuskulatur der Arterien, die entschieden viel stärker ist als man sich das gemeiniglich vorstellt, so ist eine Dilatation in radiärer Richtung durch den relativ schwachen Zug von seiten des Lungengewebes bei der Inspiration nicht denkbar, wenn nicht gleichzeitig durch nervöse Einflüsse diese Muskelschichten während der Inspiration in den Zustand der Erschlaffung oder aktiven Erweiterung übergeführt werden. Ob dieser letztere Vorgang existiert,

ist eine sehr wichtige Frage. Ich habe versucht, dieselbe ebenfalls an Hand mikroskopischer Bilder zu unterscheiden. Ich habe Lungen verschiedener Tierarten sowohl im Zustand der Exspiration als auch der Inspiration durchgesehen, habe aber niemals einen deutlichen Unterschied im Verhalten der Arterien wahrnehmen können. Stets waren in den Präparaten die Mehrzahl der Gefäße in einem gewissen Kontraktionszustand, gleichartig bei Inspiration und Exspiration. Es wurden auch verschiedene Fixierungsmethoden angewendet, ohne daß sich ein weiterer Unterschied ergeben hätte. Falls die mikroskopischen Bilder die Verhältnisse der Gefäßmuskulatur so wiedergeben, wie sie während des Lebens bestanden haben, so ist es ausgeschlossen, daß der elastische Seitenzug des Lungengewebes zu einer wesentlichen Querschnittsvergrößerung der Lungenarterien ausreicht, während die Längsdehnung natürlich in ihrem ganzen Umfang zur Einwirkung gelangt. Die Folge davon wäre dann, daß auf der Höhe der Inspiration auch eine Verengung des Querschnittes der Arterien eintreten muß. Vielleicht liegt gerade in der Behinderung einer zu starken seitlichen Dehnung der Lungenarterien durch den Inspirationszug die Aufgabe der so stark entwickelten Gefäßmuskulatur der Arteria pulmonalis.

Die mikroskopische Betrachtungsweise hat uns somit in Bezug auf das Verhalten der Arterien bei der Inspiration im Stich gelassen. Ich bin deshalb zur funktionellen Prüfung der Verhältnisse übergegangen und habe zunächst eine Lösung in folgender Weise zu erreichen versucht. Bei einem Tier wird die rechte Thoraxseite reseziert, die Lunge von den Übergangsfalten abgelöst, in einen passenden Plethysmographen eingeführt und das kurarisierte Tier von der Trachea aus durch kontinuierliche Sauerstoffinsufflation respiriert. Wenn nur ca. 2 cm H_2O Überdruck angewendet wird, so verharren beide Lungen dabei in absolut ruhigem Expirationszustand. Dann wird auf der linken Seite ein Interkostalraum gespalten, der Rippenspanner eingesetzt und in einen Ast der Arteria pulmonalis eine Kanüle eingefügt, welche mit einem Wassermanometer verbunden ist. Die linke Thoraxseite kann dann wieder geschlossen werden. Bei ruhigem Verhalten des Tieres und ganz gleichmäßiger O_2 -Einblasung verlaufen Karotis- und Pulmonaliskurve vollkommen gerade und parallel bei Ausschaltung jeder Atembewegung. Wird nun die in den Plethysmographen eingeschlossene rechte Lunge durch Minusdruck gebläht, wobei natürlich die linke Lunge in keiner Weise ihr Volumen verändert, so zeigt die Pulmonaliskurve während der Inspiration nicht die geringste Veränderung, die Karotis dagegen oft eine leichte Senkung. Dieses Experiment habe ich mit demselben Resultat mehrfach

bei Hunden, Katzen und Kaninchen ausgeführt. Als Beleg diene die Fig. 2.

Fig. 2

Versuch 12. VI. 1912. Katze 3200g. Urethan-Curare-Narkose. Die rechte Lunge in den Plethysmographen eingeschlossen, der mittlere Ast der linken Pulmonalis mit Wassermanometer verbunden, die l. Lunge verbleibt in Exspirationsstellung. Um die rechte Lunge völlig zu blähen, braucht es einen Minusdruck von 12 cm H₂O im Plethysmographen. Die Druckänderung im Plethysmographen wird durch ein Wassermanometer registriert; bei X wird ein negativer Druck von -10 cm H₂O ausgeübt; die Karotis ist mit Hg-Manometer verbunden (Fig. 2).

Der Druck in der Arteria pulmonalis ändert sich also bei der Inspiration einer Lunge gar nicht. Da aber die Arterie auf geringere Druckschwankungen manchmal träge reagiert, habe ich dieselben Experimente ausgeführt unter gleichzeitiger Messung des Druckes im rechten Ventrikel, wozu natürlich nur Hunde Verwendung finden können.

Versuch vom 27. XII. 1911. Hund 9200 g. Morphin-Urethan-Curare-Narkose. Die rechte Lunge liegt im Plethysmographen, der obere Ast der linken Pulmonalis mit Wassermanometer verbunden; im rechten Ventrikel die elastische Sonde, welche die Druckschwankung auf ein Hürthlesches Torsionsmanometer überträgt. Karotis mit Hg-Manometer verbunden. Die rechte Lunge benötigt einen Minusdruck von 12 cm H₂O um inspiratorisch gebläht zu werden. Bei X findet ein negativer Druck von -10 cm H₂O statt (Fig. 3).

Versuch vom 17. VII. 1912. Hund 6300 g. Bei diesem Versuch wurde der Pulmonalisdruck nicht registriert, die linke Thoraxseite blieb geschlossen, die rechte Lunge war im Plethysmographen ein-

geschlossen im rechten Ventrikel die elastische Sonde, die Karotis mit Hg-Manometer verbunden. Bei X wird die Lunge durch Minusdruck von 9 cm H₂O gebläht. (Fig. 4.)

Wie sich schon aus Fig. 3 und damit übereinstimmend aus Fig. 4 ergibt, hat die inspiratorische Blähung der rechten Lunge bei gleichzeitiger Expirationsstellung der linken übereinstimmend mit dem Befund bei der Arteria pulm. gar keinen Einfluß auf den Druck im rechten Ventrikel, obwohl die rechte Lunge fast ein Drittel größer ist als die linke.

Fig. 3.

Fig. 4.

Wie ist diese Tatsache der scheinbaren Indifferenz der Druckverhältnisse im kleinen Kreislauf gegenüber Änderungen der Respirationsphase zu deuten? Ist die bisherige Auffassung von der

erschweren Durchblutung der Expirationslunge richtig, so sollte bei der kräftigen Inspiration der rechten Lunge der Druck in der Arteria pulmonalis und der diastolische, eventuell auch der systolische Druck im rechten Ventrikel sinken. Ist dagegen meine Auffassung von der erschweren Zirkulation der Inspirationslunge zutreffend, so sollte bei der Inspiration eine Reaktion im umgekehrten Sinne eintreten. Beides ist aber nicht der Fall. Darf nun daraus geschlossen werden, daß die durch die Respirationsphasen geschaffenen Druckveränderungen im kleinen Kreislauf zu gering sind, als daß sie überhaupt noch registriert werden können? Nein. Das hier mitgeteilte auffallend negative Ergebnis bildet vielmehr eine Bestätigung meiner Auffassung über die Lungenzirkulation und zwar aus folgenden Gründen. Wenn die Expirationsstellung der Lunge der Zirkulation wirklich Hindernisse bereitet, so müßte der doppelseitige Expirationszustand eine Druckerhöhung in der Arteria pulmonalis zur Folge haben, kompensiert durch die vermehrte Leistung des rechten Ventrikels. Wird nun in diesem Falle plötzlich das große Stromgebiet der rechten Lunge inspiratorisch bei gleichbleibendem Druck in der linken Lunge erweitert, so müßte der Druck in der Pulmonalis und im rechten Ventrikel sinken, was aber nicht der Fall ist.

Nehmen wir dagegen an, daß durch die Expirationslunge eine größere Blutmenge fließen könne, und daß die Gefäße derselben, weil sie von einem völlig entspannten elastischen Gewebe umgeben sind, noch ferner erweiterungs- und aufnahmefähig sind, so erklärt sich der negative Ausfall der Experimente, analog den Abbindungsversuchen von Lichtheim, sehr natürlich. Die durch die Blähung der rechten Lunge der Zirkulation erwachsende Behinderung wird einfach kompensiert durch die größere Aufnahmefähigkeit der Gefäße der linken Lunge, welche im Expirationszustand bleibt. Dieses Sicherheitsventil könnte natürlich nicht in Funktion treten, wenn die Lunge im Expirationszustand schon für die Zirkulation gespannte Verhältnisse aufweisen würde. Auf Grund chirurgischer Erfahrungen beim Pneumothorax hat Sauerbruch¹⁾ schon früher diese Auffassung gehabt. Die Bedenken, die L. Brauer²⁾ damals gegen diese „Kurzschlußtheorie“ vorgebracht hat, sind daher jetzt wohl als zerstreut anzusehen.

1) F. Sauerbruch, Mitteilungen aus d. Grenzgebieten d. Med. u. Chir. Bd. 13. H. 3.

2) L. Brauer, Universitätsprogramm Marburg. 1906. p. 34.

Die Richtigkeit dieser Auffassung läßt sich übrigens in einfacher Weise dadurch prüfen, daß man die Kompensationstätigkeit der linken Lunge ausschaltet; der Nebenschluß fällt dann weg und es müssen die Einwirkungen durch die Respirationsänderungen unverkürzt zum Einfluß und Ausdruck gelangen. Es wurde dies experimentell dadurch erreicht, daß die linke Lunge mit Ausnahme des zur Registrierung dienenden Pulmonalisastes völlig abgebunden wurde. Ist die O₂-Versorgung richtig eingestellt, so vollzieht sich dieser Eingriff ohne die geringste Veränderung im Verhalten des Karotisdruckes vorausgesetzt, daß die rechte Lunge auch in Exspirationsstellung sich befindet. Wird nach dieser Vorbereitung die in den Plethysmographen eingeschlossene rechte Lunge nun wieder durch Minusdruck gebläht, so zeigt sich auch deutlich der Einfluß der Änderung der Respirationsstellung. (Fig. 5 u. 6.)

Fig. 5.

Katze 2800 g Urethan-Curare-Narkose. Bei X wird auf die im Plethysmographen eingeschlossene rechte Lunge ein — Druck von 12 cm H₂O ausgeübt.

Auf Fig. 5 erkennt man sehr schön die mit der Inspiration (X) einsetzende Senkung des Karotisdruckes und die gleichzeitig umgekehrt verlaufende Veränderung an der Pulmonalis. Es beweist dies, daß die Karotissenkung nicht in dem Sinne gedeutet werden darf, daß durch die Inspiration die Lungengefäße erweitert werden

und dadurch mehr Blut daselbst magaziniert und dem linken Ventrikel vorübergehend entzogen wird. Übereinstimmend damit zeigt Fig. 6 während der Karotissenkung infolge eines Minusdruckes von 7 cm H₂O auf die rechte Lunge auch gleichzeitig Ansteigen des diastolischen und Abnahme des systolischen Druckes im rechten Ventrikel d. h. eine Verkleinerung des Schlagvolumens.

Fig. 6.

Hund. 6500 g Morphin-Urethan-Curarc-Narkose.
Bei X wird die im Plethysmographen eingeschlossene rechte Lunge durch -7 cm H₂O gebläht, die l. Lunge ist abgebunden.

Um die Beweisführung noch sicherer zu gestalten, habe ich versucht, beide Lungen im Plethysmographen einzuschließen unter gleichzeitiger Registrierung des Druckes in der linken Pulmonalis. Das äußerst schwierige Experiment ist mir nach zahlreichen Mißerfolgen

bei einer sehr robusten Wildkatze endlich geglückt. Wurden die beiden Lungen durch Minusdruck in den Plethysmographen rasch und kräftig gebläht, so ergab sich eine sehr bedeutende Senkung der Karotis mit entsprechend starker Steigung bei der Pulmonalis (Fig. 7).

Auf beiden Pulmonaliskurven, besonders auf Nr. 7, kann man deutlich erkennen, wie die einzelnen Pulsationen während des Anstieges wesentlich kleiner werden, was ergänzt durch Verminderung der Anschläge des rechten Ventrikels (Fig. 6) ein geringeres Schlagvolumen des rechten Ventrikels infolge peripherer Behinderung des Abflusses beweist. Die zu gleicher Zeit mit dem Pulmonalisanstieg einsetzende Karotissenkung muß deshalb auf verminderten Zufluß zum linken Ventrikel infolge Drosselung in der Lunge zurückgeführt werden. Mit diesem Ergebnis decken sich auch die früher publizierten plethysmographischen Kurven der Lunge, auf welchen die Pulsationen bei der Expiration stets viel größer waren als bei der Inspiration.

Von besonderem Interesse erschien es noch zu untersuchen, wie die Dinge sich gestalten, wenn plötzlich eine Vermehrung der Blutzufuhr zur Pulmonalis und der Lunge stattfindet. Zu diesem Zweck wurde bei einem Hunde und einer Katze die eine Lunge in den Plethysmographen eingeschlossen und die andere abgebunden. Dann wurde rasch warme Ringerlösung durch die Jugularis in das Herz eingespritzt und das Verhalten des Plethysmogrammes und der Karotis geprüft. Das gleiche Experiment wurde an jedem Tier ein paarmal wiederholt, wobei stets dieselben Resultate erhalten wurden. (Fig. 8 a und b.)

Versuch 2. X. 12. Hund 7500 g. Urethan-Morphin-Curare-Narkose; 1 mg Atropin intravenös. Die im Plethysmographen ein-

Fig. 7.

Wildkatze 3500 g.

Beide Lungen im Plethysmographen.
Bei X beide Lungen durch - 11 cm
H₂O Druck gebläht.

geschlossene rechte Lunge macht passiv abwechselnd Inspirations- und Expirationsbewegungen; die Pulsationen des Lungengewebes werden auf einen Pistonrecorder übertragen. Die linke Lunge ist in toto abgebunden. Eine Markierlinie bezeichnet Beginn und Dauer der Injektion in die Jugularis. Fig. 8a zeigt den Effekt einer Injektion von 5 ccm Ringerlösung während der Expiration, Fig. 8b während der Höhe der Inspiration.

Fig. 8a. Expiration.

Fig. 8b. Inspiration.

Übereinstimmend mit den früheren¹⁾ Plethysmogrammen ergibt sich auch hier wieder der schon dort erwähnte Unterschied an denselben bei kollabierter und geblähter Lunge. Was uns aber hier besonders interessiert, ist die Tatsache, daß die Injektion der Ringerlösung bei der Expirationslunge stets eine Vermehrung ihres Volumens und eine Vergrößerung der einzelnen Pulsationen zur Folge hatte, während bei der Inspirationslunge diese Veränderungen kaum angedeutet sind. In beiden Fällen ist dagegen der Anstieg des Karotisdruckes als Folge der Injektion sehr deutlich. Dieses Ergebnis kann nur so gedeutet werden, daß der Zuwachs an Flüssigkeit bei der kollabierten Lunge sich sofort in einer elastischen Dehnung derselben äußert, dank dem entspannten Zustand von Geweben und Gefäßen. Im Gegensatz dazu vermag bei der elastisch schon stark beanspruchten Inspirationslunge ein weiterer Druckzuwachs eine wesentliche Deformation nicht mehr hervorzubringen.

Neben dem Plethysmogramm wollte ich auch noch das Verhalten

1) l. c.

des Pulmonalisesdruckes bei plötzlicher Flüssigkeitszufuhr untersuchen. (Fig. 9 a und b).

Versuch 7. X. 12. Hund, 6300 g. Morphin-Urethan-Curare-Narkose; 1 mg Atropin intravenös. Die rechte Lunge macht im Plethysmographen eingeschlossen künstliche Inspirations- und Expirationsbewegungen; die linke Lunge wird abgebunden, ein Ast der linken Pulmonalis mit dem H_2O -Manometer verbunden. Entsprechend der Markierlinie werden 5 cem warme Ringerlösung intravenös eingespritzt und zwar bei Fig. 9 a zurzeit der Expiration, bei Fig. 9 b auf der Höhe der Inspiration.

Fig. 9a. Expiration.

Fig. 9b. Inspiration.

Aus den beiden Kurven 9 ergibt sich, daß durch die Injektion der Pulmonalisesdruck regelmäßig ansteigt und zwar nahezu gleich bei Inspiration und Expiration. Dieses Resultat war theoretisch zu erwarten, denn die Differenz zwischen den Pulmonalisesdrücken der Inspirations- und Expirationslunge ist nicht so groß, daß derselbe Druckzuwachs einen wesentlichen Unterschied in der darauf erfolgenden Steigerung hätte ergeben müssen. Dagegen fiel in der Mehrzahl der betreffenden Kurven, wie auch auf den beiden abgebildeten deutlich zu sehen, auf, daß die Druckerhöhung an der Pulmonalis der Inspirationslunge langsamer zum Ausgangsniveau zurückkehrt als beim

Expirationszustand. Es deutet dies darauf hin, daß der rechte Ventrikel das Zuwachsquantum langsamer an die Inspirationslunge abgibt, entsprechend den schon vorhandenen höheren Widerständen. Damit deckt sich auch, daß, falls überhaupt eine Differenz zwischen den durch die Injektion bedingten Pulmonalisdrukken zu erkennen war, diese entgegen der theoretischen Erwartung nicht zu Gunsten der geblähten, sondern der kollabierten Lunge sich einstellte.

Nach allen diesen Darlegungen dürfen wir es nun als gesichert betrachten, daß die Lunge auf der Höhe der Inspiration schlechter durchblutet ist als bei der Expiration.

Alles Vorausgehende bezieht sich auf die bis zur vollen Inspirationsgröße geblähte Lunge. Nicht untersucht sind in ihrem Einfluß auf die Zirkulation die verschiedenen Phasen zwischen Inspiration und Expiration. Da bei der Inspiration namentlich es sich um einen ziemlich langsam verlaufenden Vorgang handelt, so ist die Möglichkeit gegeben, daß während des Vorganges der Respiration die Einflüsse auf die Zirkulation andere sein könnten als in den beiden Endstadien derselben, entsprechend der andauernden Verschiebung der physikalischen Verhältnisse innerhalb der Lunge. Ich habe schon eingangs darauf hingewiesen, daß bei der Inspirationsdeformation der Lunge zwei Kräfte und zwar im entgegengesetzten Sinne auf die kleinsten Gefäße, die Kapillaren und die Venen, einwirken müssen, welche sind:

1. die mit der Blähung konstant zunehmende lineare Längsdehnung der Gefäße, die, falls der Elastizitätskoeffizient der Wandung konstant bleibt, graphisch durch eine gerade Linie veranschaulicht werden kann und

2. eine Erweiterung der Gefäße in querer Richtung, bedingt durch den elastischen Zug des sich radiär abhebenden Lungengewebes auf die Gefäßwandung. Wie eine Betrachtung der mikroskopischen Präparate der Inspirationslunge lehrt, kann diese Erweiterung keine der Dehnung der Lunge völlig parallel gehende sein. Denn sehr rasch ist eine Grenze für die nach Art der Kugelblähung unbehinderte Ausdehnungsfähigkeit der Alveolen und damit für die darauf beruhende Gefäßerweiterung erreicht, und durch Aneinanderlegen der Wände folgt nunmehr die Bildung der die Gefäßerweiterung hindernden Wabenstruktur. Von diesem Moment ab kann eine weitere quere Ausdehnung der Gefäße durch den elastischen Gewebezug nicht mehr erwartet werden, und es kann bei den Kapillaren und Venen sogar zu einer flächenartigen Kompression der Gefäße kommen, so daß also nur noch die Längsdehnung übrig bleibt. Es ist somit zu

erwarten, daß bei der Inspiration eine Ausweitung der Gefäße zunächst sich einstellen wird, die dann aber rasch abnimmt, während die Längsdehnung andauert, so daß der ganze Vorgang der Gefäßdeformation schematisch durch die beistehende Kurve wiedergegeben werden kann (Fig. 10). Das Endresultat der Inspiration gegenüber der Expiration ist somit ein linear stark gedehntes und im Querschnitt verengtes Gefäßsystem, wie es ja auch die funktionelle Prüfung ergeben hat. Greifen wir aber auf der Fig. 10 den Zeitpunkt t heraus, entsprechend dem ersten Viertel oder Drittel der Inspirationsbewegung, so ergibt sich gegenüber dem Expirationszustand eine Inhaltsvergrößerung des Gefäßes sowohl in Längs- als in Querrichtung, d. h. es muß die Lunge in diesem Momente besser durchblutet sein als bei

Fig. 10.

- |||| = Betrag der Gefäßerweiterung durch radiären Zug.
- /// = " der linearen Längsdehnung (konstant zunehmend)
- /// = " der auf die Erweiterung folgenden Verengung durch den Alveolenseitendruck.

der Expiration. Zu dieser Erleichterung der Zirkulation trägt neben der Gefäßerweiterung gewiß auch noch deren Geraderichtung bei wie sie beim Beginn der Inspiration wohl statt hat, indem die bei der Expiration sehr weiten, aber etwas geschlängelten Gefäße geradegestellt werden, zunächst ohne Veränderung des Lumens durch Dehnung.

Dieser auf Grund der anatomischen Präparate, der funktionellen Ergebnisse und der theoretischen Überlegungen konstruierte Vorgang mußte noch durch besondere Versuche auf seine Tatsächlichkeit geprüft werden. Es wurde hierfür bei Hunden und Katzen wieder die rechte Lunge in den Plethysmographen eingeschlossen, ein Ast der

linken Pulmonalis mit dem Wassermanometer vereinigt und die linke Lunge total abgebunden. Dann wurde vorsichtig die rechte Lunge durch negativen Druck etwas gebläht, aber nur bis zu einem Viertel oder einem Drittel der vollen Inspirationsgröße, was einen negativen Druck von ca. 2—3 cm H₂O beanspruchte. Als Beleg für die hierbei sich regelmäßig einstellenden Veränderungen an der Pulmonalis dienen die Fig. 11 und 12.

Versuch 22. VI. 12. Katze 2900 g. Urethan-Narkose. Rechte Thoraxseite reseziert, die Lunge im Plethysmographen eingeschlossen, die Druckänderungen im Plethysmographen werden auf ein Wassermanometer übertragen und registriert. Mittlerer

Fig. 11.

Fig. 12.

Ast der linken Pulmonalis mit Kanüle verbunden und registriert; linke Lunge ganz abgebunden. Bei — 10 cm H₂O Druck im Plethysmographen ist die Lunge voll inspiratorisch gebläht; bei X wird die Lunge nur wenig durch — 1 cm H₂O gebläht und bei XX wird der negative Druck auf — 2 cm erhöht (Fig. 11).

Versuch 23. XII. 1911. Katze 3200 g. Urethan-Curare-Narkose, 0,5 mg Atropin intravenös. Rechte Lunge im Plethysmographen,

dessen Druck registriert wird, linke Pulmonalis mit Wassermanometer, linke Lunge abgebunden. Bei -11 cm H_2O ist die rechte Lunge voll inspiratorisch gebläht; bei X wird die Lunge durch einen Minusdruck von 3 cm H_2O nur wenig gebläht (Fig. 12).

Aus dem ersten Versuch ergibt sich, daß ein negativer Druck von 1 cm H_2O keine Veränderungen weder an der Pulmonalis noch an der Karotis hervorbringt, daß dagegen bei -2 cm schon eine leichte Senkung sowohl bei der Karotis wie der Pulmonalis zu konstatieren ist. Beim 2. Versuche treten bei -3 cm H_2O diese Veränderungen schon sehr deutlich hervor, so daß also eine den Pulmonalisdruck beeinflussende Erweiterung der Lungengefäße anzunehmen ist. Vergleiche hierzu auch die Fig. 6. Dort wurde zuerst ein Minus-Druck von 2 cm H_2O angewendet, der eher eine Vergrößerung der Ausschläge des rechten Ventrikels zur Folge hatte, im Gegensatz zu der nachfolgenden stärkeren Inspiration bei -7 cm. Dem Absinken des Pulmonalisdruckes geht somit parallel eine Zunahme des Schlagvolumens im rechten Ventrikel. In allen diesen Fällen ist somit die dem negativen Druck parallele Karotissenkung zurückzuführen auf die vorübergehende Blutspeicherung in den erweiterten Lungengefäßen. Ich muß aber bemerken, daß nur in einem einzigen Versuch (Fig. 12) die Senkung des Pulmonalisdruckes so deutlich war. Wie dann aber bei noch weiterer Blähung der Lunge durch negativen Druck die Verhältnisse umschlagen und sukzessive die Erschwerung in Bezug auf die Durchblutung an Stelle der Erleichterung tritt, zeigt Fig. 13 aufs deutlichste.

Versuch 15. XII. 1911. Katze 2580 g. Urethan-Narkose. Rechte Lunge im Plethysmographen, linker Pulmonalisast registriert, linke Lunge abgebunden. Die Lunge ist bei einem Minusdruck von 9 cm H_2O voll inspiratorisch gebläht. Bei X wird über der Lunge ein negativer Druck von 3 cm H_2O erzeugt, was eine Senkung der Karotis, aber keine Änderung der Pulmonalis zur Folge hat, während der bei XX einsetzende Minusdruck von 6 cm H_2O neben der Verstärkung des Karotisabfalles schon eine Steigerung des Pulmonalisdruckes zur Folge hat (Fig. 13).

Während bei schwachen negativen Drucken im Plethysmographen die Pulmonalis und Karotis ganz leichte Senkungen aufwiesen (wie bei Fig. 11), tritt dann hier bei einer Blähung von -6 cm H_2O schon eine kleine Steigerung der Pulmonalis auf und bei -9 cm H_2O = voller inspiratorischer Blähung der Lunge ist dieselbe noch wesentlich verstärkt (auf der Figur nicht mehr zu sehen) und zeitlich

parallel damit gehen die entsprechenden Veränderungen der Karotiskurve.

Fig. 13.

Ich glaube, daß die hier mitgeteilten experimentellen Ergebnisse vollständig die Richtigkeit der schematisch konstruierten Figur 10 ergeben und daß wir daher in derselben einen richtigen Ausdruck für die wirklichen Vorgänge erblicken dürfen. Es decken sich diese Resultate mit einer früher von Tendeloo¹⁾ ausgesprochenen Ansicht; sie bedingen auch eine Einschränkung des in meiner früheren Arbeit zu allgemein gefaßten Satzes, daß nämlich die Lunge bei der Inspiration schlechter durchblutet sei, als bei der Expiration. Für das erste Viertel oder Drittel der Inspirationsphase trifft dies also nicht zu, wohl aber für die zweite Hälfte der Inspirationsphase.

Bei den Blutanalysen der Inspirations- und Expirationslunge habe ich früher einen ungefähr gleichen Blutgehalt für beide Re-

1) Tendeloo zitiert nach Minkowsky, Die Pathologie der Atmung p. 527. Krehl u. Marchand, Handbuch der allg. Pathologie 1912.

spirationsphasen festgestellt, ein Befund der inzwischen von R. Hess¹⁾ nach einer anderen Methode bestätigt worden ist. Demgegenüber haben Bruns²⁾ u. a. einen wesentlich höheren Gehalt an Blut bei der Inspirationslunge gefunden. Wenn auch der Blutgehalt eines Organes keinen Maßstab abgibt für die Größe der Durchblutung, so erschien es mir doch wünschenswert, auch diese nicht unwichtige Frage womöglich mittels neuer Methoden zu entscheiden. Es war dies umso angezeigt, als nach meinen obigen Darstellungen die Möglichkeit einer Vermehrung der Lungenzirkulation im ersten Viertel der Inspiration gegeben ist.

Bei der experimentellen Prüfung bin ich von folgenden Erwägungen ausgegangen:

Wenn zurzeit t (Expiration) das Verhältnis der Anzahl der roten Blutkörperchen R zu der Anzahl der fixen Gewebszellen der Lunge L also $\frac{R}{L} = x$ ist, so wird dieses Verhältnis zurzeit t' (Inspiration) sich ändern, falls die Blutmenge größer oder kleiner geworden ist, da ja die Zahl der fixen Gewebsselemente sich nicht verändern kann

Um dies festzustellen wurden möglichst dünne Schnitte ($2-3 \mu$) von ähnlichen Lungenstellen angefertigt, wie sie bereits auf Tafel I und II abgebildet sind. Die Zählung in denselben wurde von dem Präparator des anatomischen Institutes in der Weise durchgeführt, daß zuerst durch Projektion die betreffenden Gesichtsfelder genau auf Papier kopiert und dann erst hier die Zählung vorgenommen wurde, wodurch alle Täuschungen und Fehler ausgeschlossen waren. Nach freier Auswahl zählte der Präparator aus jedem Schnitt je drei Gesichtsfelder.

Um auch dem Leser ein Bild von diesen Verhältnissen zu geben, wurde je ein Präparat auf Tafel III in verkleinertem Maßstab reproduziert. Es ergaben sich bei der Auszählung folgende Werte:

1. Inspirationslunge eines spontan atmenden Kaninchens, auf der Höhe der Inspiration durch Tracheaverschluß und gleichzeitige Eröffnung des Brustkorbes abgeklemmt; die andere Lunge im Expirationszustand ebenfalls abgebunden. Dabei ist zu bemerken, daß das Tier etwas Blut verlor aus den Rippen nach Abbinden der Inspirationslunge, bevor die andere Lunge abgeklemmt war. Taf. III, Fig. a u. b.

1) R. Hess, D. Arch. f. klin. Med. Bd. 106. p. 478.

2) O. Bruns, Über Folgezustände beim einseitigen Pneumothorax. Habilitationsschrift. Marburg 1909.

Expirationslunge des Kaninchens, Taf. III a.

Zahl der roten Blutkörperchen	Zahl der Gewebszellen	Quotient
489	217	1,8
532	333	1,6
570	316	1,8

Durchschnitt 1,7 rote Blutkörperchen
auf 1 Gewebezelle

Inspirationslunge des Kaninchens (spontane Inspiration),
Taf. III b.

Zahl der roten Blutkörperchen	Zahl der Gewebszellen	Quotient
159	125	1,2
134	114	1,2
158	123	1,3

Durchschnitt 1,25 rote Blutkörperchen
auf 1 Gewebezelle

2. Katze, rechte und linke Lunge sind im Plethysmographen; es werden zunächst einige Inspirationsbewegungen durch negativen Druck ausgeführt, dann die eine Lunge in Inspiration (9 cm H₂O Minusdruck) abgebunden und gleichzeitig die andere expiratorisch durch Atmosphärendruck zusammenfallend ebenfalls abgebunden.

Expirationslunge der Katze, Taf. III a'.

Zahl der roten Blutkörperchen	Zahl der Gewebszellen	Quotient
614	137	4,5
741	131	5,6
687	157	4,4

Durchschnitt 4,8 rote Blutkörperchen
auf 1 Gewebezelle

Inspirationslunge der Katze, Taf. III b'.

Zahl der roten Blutkörperchen	Zahl der Gewebszellen	Quotient
319	63	5,1
257	61	4,2
311	59	5,3

Durchschnitt 4,8 rote Blutkörperchen
auf 1 Gewebezelle

Aus den mitgeteilten Zahlen ergibt sich zunächst die anatomisch interessante Tatsache, daß bei Kaninchen und Katzen das Verhältnis

der beiden Zellarten zueinander ein durchaus verschiedenes ist. Ferner zeigen uns die erhaltenen Quotienten, daß die Menge der roten Blutkörperchen im Verhältnis zu den Gewebszellen auf die Höhe der Inspiration nicht zunimmt. Bei der Katze (Plethysmographenversuch) sind die beiden Quotienten sich gleich geblieben, völlig übereinstimmend mit den Ergebnissen meiner früheren chemischen Analysen; bei dem spontan atmenden Kaninchen ist sogar eine Abnahme der absoluten Blutmenge auf der Höhe der Inspiration gegenüber der Expiration zu konstatieren.

Die erhaltenen Resultate entkräften auch den allfälligen Einwand, daß die Atmung im Plethysmographen andere Bedingungen schaffe als die spontane bei geschlossenem Thorax. Es erscheint durch die erwähnten Zahlen sogar die Inspirationslunge bei spontaner Atmung etwas weniger bluthaltig als die Plethysmographenlunge; doch lege ich darauf weiter keinen Wert; die Hauptsache ist, daß die Blutmenge auf der Höhe der Inspiration nicht vermehrt ist gegenüber der Expiration. Auf Grund aller analytischen Resultate dürfen wir auch annehmen, daß der im ersten Viertel der Inspiration gebotenen Erleichterung der Lungenzirkulation keine größere quantitative Bedeutung zukommt. In Anbetracht der Kürze jener Periode gegenüber der gesamten Atmungsevolution erscheint dies auch erklärlich.

Bei annähernd gleichem Blutgehalt der Inspirations- und Expirationslunge ergibt sich unter Berücksichtigung der Lungenplethysmogramme, des Karotis-, Pulmonalis- und Ventrikeldruckes eine Verschlechterung der Zirkulation auf der Höhe der Inspiration. Es erscheint auch ganz zweckmäßig, daß sich diese Verschlechterung beschränkt auf jenen Teil, der zeitlich nur zirka ein Viertel des gesamten Atmungsvorganges ausmacht.

Prüfen wir zum Schluß mit Rücksicht auf die eingangs mehrfach erwähnte Zweckmäßigkeit der betr. Vorgänge die experimentellen Resultate und die daraus hergeleitete Anschauung, so scheint mir der ganze hier geschilderte Verlauf der Dinge als ein den physiologischen Zwecken durchaus angepaßter. Bei Beginn der Inspiration wird ohne Mehrleistung des rechten Ventrikels die Blutzufuhr zu den Lungen durch Geradestellung der Kapillaren und geringe Erweiterung derselben erleichtert. Bei weiterem Luftzutritt in die Alveolen hört diese physikalische Begünstigung auf, die Lungengefäße werden teilweise durch Längsdehnung, teilweise durch Kompression deformiert und die Zirkulation kann nur durch Mehrleistung des rechten Ventrikels aufrecht erhalten werden. Dagegen wird in diesem Stadium

der Gasaustausch für das einzelne Blutkörperchen wesentlich erleichtert sein infolge Verlangsamung der Strömung und Vergrößerung der Kontaktfläche.

Die in der Überschrift gestellte Frage ist somit dahin zu beantworten, daß die Durchblutung der Lunge am vollkommensten ist, wenn diese von der Exspirationsstellung aus ganz kleine Inspirationsbewegungen ausführt, wie ich dies auf Grund theoretischer Überlegungen als wahrscheinlich schon ausgesprochen habe ¹⁾. Berücksichtigt man nur die beiden Endphasen, so ergibt sich eine schlechtere Durchblutung auf der Höhe der Inspiration und eine bessere während der expiratorischen Ruhe. Eine graphische Darstellung der Beziehung der Respirations-

Fig. 14.

Atmungskurve.

bewegung zur Durchblutung der Lunge gestaltet sich demnach wie in Fig. 14. Durch künstliche Einschränkung der inspiratorischen Entfaltung der Lunge werden somit die besten Bedingungen für die Durchblutung geschaffen. Allerdings würde eine solche Einschränkung der Inspirationsbewegungen, falls sie auf beiden Seiten erfolgte, auf die Dauer den Gaswechsel zu stark beeinträchtigen. Ist dagegen die Behinderung der Exkursion nur einseitig, so wird die betreffende Lunge optimal durchblutet, bei vollständig genügendem Gaswechsel. Das sind die Verhältnisse, wie sie beim künstlichen Pneumothorax und der Thorakoplastik vorliegen; denn auch beim künstlichen, geschlossenen Pneumothorax steht die Lunge keineswegs still, wie fast allgemein fälschlich angenommen wird, sondern sie macht stets kleine Inspirationsbewegungen. Noch idealer liegen die Verhältnisse bei der Thorakoplastik, weil hier durch Verkleinerung der Thoraxwand die Inspirationsdehnung eingeschränkt wird, während

1) Cloetta, Verhandlung d. d. Ges. für Chirurgie 1912. Archiv für klin. Chirurgie Bd. 98. H. 3.

gleichwohl ein fast normaler negativer Druck erzielt wird. Eine längere Zeit im Zustand der Aelektase verharrende Lunge ist dagegen sicher schlechter durchblutet. Dementsprechend sollte beim künstlichen Pneumothorax der Druck nicht wesentlich positiv werden, weil sonst wieder eine mechanische Behinderung der Zirkulation eintritt, außer man wünsche den Untergang des Lungengewebes. In dieser durch die Berücksichtigung der in Betracht kommenden physikalischen Bedingungen künstlich geschaffenen optimalen Durchblutung der Lunge ist die Ursache der mitunter so günstigen Beeinflussung der Lungentuberkulose durch die beiden erwähnten therapeutisch-chirurgischen Verfahren zu suchen.

Wenn wir uns angewöhnen, die Lungenzirkulation von dem neuen Standpunkt aus zu beurteilen, so wird auch für manchen pathologischen Vorgang ein besseres Verständnis sich ergeben. Es wird uns ohne weiteres klar, daß schon die gewöhnliche Ruhekur mit ihrer Einschränkung der inspiratorischen Blähung die Tuberkulose günstig beeinflusst, wie umgekehrt jede forcierte Arbeit mit starker Inspirationsbewegung dem tuberkulösen Prozeß nur schaden kann. Auch beim Emphysem brauchen wir nicht mehr auf einen Massenmord von Kapillaren abzustellen zur Erklärung der Hypertrophie des rechten Ventrikels; die dauernde Inspirationsstellung der Lunge erklärt dies schon zur Genüge. Ferner gibt uns beim Asthma bronchiale, die durch die forcierte Inspirationsblähung der Lunge behinderte Überführung des Blutes vom rechten zum linken Ventrikel schon, abgesehen von dem behinderten Gaswechsel, eine Erklärung für die Dyspnoe und das Erschöpfungsgefühl. Denn daß auch bei den Menschen die hier dargelegte Ansicht über die Lungenzirkulation Gültigkeit hat geht aus der eben erschienenen Mitteilung von Gött und Rosenthal¹⁾ über Röntgenkymographie hervor, bei welcher die Autoren als auffallende Erscheinung kräftige große Pulsationen der Ventrikel bei tiefster Expiration und ganz flache bei tiefer Inspiration angeben, also genau die gleichen Veränderungen der Herztätigkeit, wie sie sich unter dem Einfluß der Respirationsphasen aus meinen Plethysmogramm-, Pulmonalis- und Ventrikelkurven ergeben haben.

Zusammenfassung.

Die durch die Respiration bedingten Volumveränderungen der Lunge haben, abgesehen von den im Thorax dabei erzeugten Druckunterschieden einen ausgesprochenen Einfluß auf die Blutdurchströmung der Lunge.

1) Th. Gött u. J. Rosenthal, Münch. med. Wochenschrift. 1912, No. 38, p. 2035.

Auf der Höhe der Inspiration ist die Durchblutung am schlechtesten, viel besser bei der Expiration, am vollkommensten beim Beginn der Inspiration.

Aus der Abschätzung der Druckänderungen an der Pulmonalis, dem rechten Ventrikel und der Karotis sowie des Blutgehaltes der Lungen während der verschiedenen Respirationsphasen ergibt sich, daß die Verschlechterung der Zirkulation am Ende der Inspiration quantitativ die kurze, am Beginn der letzteren einsetzende Verbesserung übertrifft. Der Inspirationsvorgang als Ganzes betrachtet schafft somit für die Durchblutung der Lunge schlechtere Bedingungen als der Expirationszustand.

Die geschilderte Art der gegenseitigen Beeinflussung von Respiration und Zirkulation hat für den respiratorischen Gaswechsel keine nachteiligen Folgen; sie kann sogar als durchaus zweckmäßig angesehen werden.

Diese Auffassung über die Lungenzirkulation ergibt uns auch eine befriedigende Erklärung für die pathologischen Funktionsstörungen bei Emphysem und Asthma bronchiale einerseits, sowie andererseits für die auffallend günstigen Erfolge bei Tuberkulose, wie sie durch die künstliche Einschränkung der Inspiration bei Anlegung eines künstlichen Pneumothorax oder durch die chirurgische Thorakoplastik geschaffen werden.

Fig. A.

Kaninchen, Expiration.
Vergr. 216.

Lungengewebe

Rote Blut-
körperchen.

Kerne des
Lungengewebes.

Fig. B.

Kaninchen, spontane
Inspiration. Vergr. 120.

Fig. A.

Kaninchen, Expiration.
Vergr. 216.

Lungengewebe

Rote Blutkörperchen.

Kerne des Lungengewebes.

Fig. B.

Kaninchen, spontane
Inspiration. Vergr. 120.

Vergr. 415.

Kaninchen, spontane Expiration.
Rote Blutkörper. 489. Gewebszellen 217.

Kaninchen, spontane Inspiration.
Rote Blutkörper. 134. Gewebszellen 114.

Vergr. 415.

Katze, Expiration im Plethysmographen.
Rote Blutkörper. 614. Gewebszellen 137.

Katze, Inspiration im Plethysmographen.
Rote Blutkörper. 311. Gewebszellen 59.