

Aus einer Zusammenstellung von Infos über die Buteyko-Methode von Adolf Mathias

Kohlendioxid

von Dr. Yandell Henderson aus der Zyklopädie der Medizin (1940)

in []: selbständig ergänzt, der Originaltext war unvollständig und stellenweise verstümmelt.

Am 9. Mai 1794, während des Terror-Regimes, starb Antoine-Laurent Lavoisier durch die Guillotine. Dieses Ereignis schloß das erste und größte Kapitel in der Physiologie des Kohlendioxids ab. Denn das Prinzip der Erzeugung von Kohlendioxid, seine Verbindung zum Sauerstoff im Feuer sowie seine [Wichtigkeit] im Leben, die Lavoisier kurz vor seinem Tod entdeckt hatte, war und ist noch der grundlegendste aller Beiträge zum Wissen auf diesem Gebiet. Wahrhaft, wie sein Kollege Lagrange sagte: Es dauerte nur einen Moment, einen Kopf abzuhacken, zu dem hundert Jahre keinen ähnlichen hervorbringen dürften.

Ähnlichkeit von Leben und Feuer

Lavoisiers überragender Beitrag zur Wissenschaft und insbesondere zur Physiologie war die Demonstration, daß die Verbrennung in einem Feuer und der Atemmechanismus bei einem Tier in ihrem ungefähren Ablauf identisch sind. Beide beruhen auf der Verbindung von Luftsauerstoff mit kohlenstoffhaltigem Material, und beide resultieren in der Freisetzung von Wärme und der Erzeugung von Kohlendioxid. Kohlendioxid wurde tatsächlich bereits vorher, 1757, von Black entdeckt, und Sauerstoff wurde von Mayow, Scheele und Priestly erwähnt. Aber es war Lavoisier, der zuerst die Rolle des Sauerstoffs und den Prozeß der Erzeugung von Kohlendioxid aufzeigte.

Ein Jahrhundert später war das Standardwerk über Physiologie in englischer Sprache das von Sir Michael Foster von der Universität von Cambridge. Dieses Buch lieferte die Grundausbildung vieler der Physiologen, die während der letzten 35 Jahre zur Entwicklung der Atmung und der wachsenden Erkenntnis der Funktion des Kohlendioxids im Körperhaushalt beitrugen. Die von Foster präsentierten Fakten und Zusammenhänge zeigen daher sowohl den Fortschritt innerhalb von 100 Jahren seit Lavoisier als auch den Ansatzpunkt der modernen Forschung. Wenn das erste Kapitel über die Physiologie des Kohlendioxids von Lavoisier beigetragen und mit seinem Tod beschlossen wurde, dann wurde das zweite Kapitel von Foster vorgestellt, und es fällt in seiner Ausdehnung fast vollständig mit dem 19. Jahrhundert zusammen. Das dritte Kapitel, mit dem sich dieser Artikel hauptsächlich befassen wird, ist das Produkt der Generation, die ihre experimentelle Arbeit in den ersten drei Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts getan hat, und von ihren theoretischen Ergebnissen ausgehend nun wertvolle Beiträge zu Medizin und Chirurgie und insbesondere Therapie liefert.

Gegensatz zwischen Leben und Feuer

Der wichtigste Fortschritt in der Physiologie der Atmung, wie sie von Foster über die von Lavoisier hinterlassene Vorstellung hinaus dargestellt wurde, war, daß die Oxidation in Vorgängen des Lebens, obzwar ähnlich einem Feuer im Hinblick auf Ausgangs- und Endprodukte, sich grundlegend in ihrem Vorgang und ihrer Regelung unterscheidet. Wenn ein Feuer mit reinem Sauerstoff anstelle von Kohlendioxid unterhalten wird, brennt es mit enorm höherer Intensität. Wenn aber ein Mensch oder ein Tier Sauerstoff oder mit Sauerstoff angereicherte Luft atmet, wird nicht mehr von diesem Gas verbraucht, nicht mehr Hitze erzeugt und nicht mehr Kohlendioxid ausgeatmet als bei ausschließlicher Luftatmung. Obwohl Ärzte es immer noch für schwer glaubhaft halten, ist Sauerstoff keinesfalls ein

Stimulans für lebende Wesen. Er ist ausschließlich ein wichtiger Versorgungsbestandteil; ein Bestandteil, von dem der Körper nicht mehr aufnehmen oder erheblich weniger verbrauchen kann, als seine eigene Regelung entsprechend seines Bedarfs feststellt. Sogar in verdünnter Luft oder im Fall von Herzerkrankungen, bei denen ein Mensch schwer unter mangelnder Sauerstoffversorgung leiden kann, verbraucht der Körper Sauerstoff praktisch in normalem Umfang. Die Erstickungserscheinungen sind Ausdruck des Kampfes des Körpers, um diese Menge tatsächlich zu bekommen. Er bekommt sie, oder er stirbt.

Lavoisier hatte angenommen, daß die Verbrennung bei Lebewesen in der Lunge, wo die eingeatmete Luft mit dem Blut in Kontakt kommt, stattfinden muß. Spalanzani, ein italienischer Physiologe, erkannte jedoch bald, daß die Oxidation in Wirklichkeit nicht in den Lungen stattfand, sondern in dem Gewebe, wohin der Sauerstoff durch das Blut befördert wird. Daß dies der Fall ist, wurde durch Magnus, einen deutschen Physiologen, gezeigt, der als erster die Gase aus dem Blut mit Hilfe einer Vakuumpumpe extrahierte und zeigte, daß arterielles Blut mehr Sauerstoff und weniger Kohlendioxid als venöses Blut enthält. Dann isolierte Hoppe-Seyler, einer der ersten Biochemiker, das Hämoglobin, den Farbstoff der roten Blutkörperchen, in der Form reiner Kristalle und zeigte, daß es eine schwache chemische Verbindung mit Sauerstoff eingeht. Hämoglobin ist das Mittel, womit das Blut Sauerstoff transportiert.

Basen des Blutes als Träger von Kohlendioxid

Später, im 19. Jahrhundert, erkannte Zuntz in Berlin, daß Kohlendioxid im Gegensatz zum Sauerstoff nicht vom Hämoglobin transportiert wird, daß aber Hämoglobin dennoch ein essentieller Faktor beim Transport dieses Gases durch das Blut ist. Er zeigte, daß Kohlendioxid im Blut an Basen gekoppelt ist, hauptsächlich als Natriumhydrogencarbonat. Er zeigte so als erster, was heute allgemein etwas unglücklich als Alkalireserve bezeichnet wird; es wäre besser, die Hydrogencarbonate des Plasmas als Alkali in Gebrauch zu bezeichnen. Die wahre Alkalireserve ist an das Hämoglobin gekoppelt und wird abgegeben, um sich mit Kohlendioxid zu verbinden oder stärkere Säuren zu neutralisieren. Wenn Kohlendioxid in den Lungen freigesetzt wird, rekombinieren die dadurch freigesetzten Basen mit dem Hämoglobin.

Dieser Transportweg des Kohlendioxids ist eine der außerordentlichsten Eigenschaften des Blutes und der Atmung. Die Begründung dafür liegt in zwei Tatsachen, die von Pflüger und anderen während des großen Zeitalters der deutschen Physiologie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts gezeigt wurden. Eines dieser Fakten ist, daß das Blutplasma, wenn es von seinen Zellen getrennt wurde, selbst unter Vakuum nur einen geringen Anteil des gelösten Kohlendioxids freigibt. Das andere Fakt ist, daß das gesamte Kohlendioxid im Plasma, sowohl das in einfacher Lösung als auch das an Basen gekoppelte, sich bereitwillig löst, falls die roten Blutkörperchen anwesend sind. Somit ist das Hämoglobin der roten Blutkörperchen dadurch, daß es Basen liefert oder mit ihnen rekombiniert, hauptsächlich verantwortlich für die Kohlendioxid-Transportkapazität des Plasmas; daher ermöglicht es dem Blut, dieses Gas im Gewebe aufzunehmen und in der Lunge wieder abzugeben, und zwar unter sehr geringen Druckunterschieden.

Zwischenzeitlich zog ein anderes Problem von unmittelbarer Wichtigkeit die Aufmerksamkeit der Forscher an: Das Problem nicht nur, wie wir atmen im Sinne des Bedarfs, aber auch, warum im Sinne der Ursache und des Anreizes. Es ist eine der grundlegendsten Beobachtungen beim Leben, daß physische Anstrengung aufgrund des damit verbundenen erhöhten Verbrauchs an Sauerstoff und der Produktion von Kohlendioxid von erhöhtem Atemvolumen begleitet wird. Der Bedarf ist offensichtlich. Aber was sind die Natur des Anreizes und der Kontrollmechanismus, die gemeinsam diese Anpassung der Lunge bei der Atmung an den Bedarf des Körpers hervorrufen? Dieses Thema war lange ein Streitpunkt. Beinahe jeder Vordenker jeder unterschiedlichen Nuance der Ansichten trug über 50 Jahre

hinweg ein Stück Wahrheit zu dem einen oder anderen Abschnitt bei. Aber jeder von ihnen beging einen Fehler, der behauptete, daß irgend einer der Faktoren ausschließlichen Einfluß besaß. Atmung ist das Ergebnis vieler Faktoren.

Nervöse und chemische Regelung der Atmung

Die dabei an den Tag gebrachten Faktoren kamen aus zwei Klassen: nervös und chemisch. Wird ein Eimer kaltes Wasser über einem Menschen ausgeleert, so holt er ein- oder mehrmals tief Luft. Die Reizung eines sensorischen Nerven, die Schmerz hervorruft, bringt ihn dazu, zu schreien. Kitzeln der Nase oder der Kehle führt zum Niesen oder Husten. All dieses sind Atemreflexe, die von Nervenimpulsen aus dem Atemzentrum angeregt werden. Aber wichtiger als jeder andere nervliche Bestandteil der Atmung sind die Vagus-Nerven, unter deren zahlreichen Fasern einige Endungen in der Lunge haben und Impulse von dort in das Atemzentrum in der Medulla oblongata leiten. Auf diesen Wegen regt, wie Hering und Breuer zeigten, jeder Ausatmungsvorgang der Lunge das Zentrum dazu an, einen Reflex an das Zwerchfell und andere Atemmuskeln zu senden, der Einatmung hervorruft. Umgekehrt ruft jede Einatmung einen Ausatmungsreflex hervor. Dieser Mechanismus ist verantwortlich für den rhythmischen Charakter der Atmung, oder, wie es ein Ingenieur nennen würde, Atmung ist ein reziproker (?) Mechanismus.

Über diese Erklärung, die sich auf nervöse Faktoren stützt, hinaus sammelten sich allmählich Hinweise auf eine chemische Kontrolle der Atmung. Man fand, daß das zum Atemzentrum und hindurch fließende Blut einen beherrschenden Einfluß auf die Atmungsaktivität ausübte. Sobald das Blut die Eigenschaft venösen Blutes annahm, wurde das Zentrum stimuliert, eine dem entgegenwirkende Vertiefung des Atemvolumens hervorzurufen. War jedoch das Blut durch Überatmen in der Lunge übersättigt, so stellte das Zentrum für eine gewisse Zeit seine Aktivität ein und es ergab sich Apnoë. In diesem Zustand atmet das Subjekt nicht und fühlt auch kein Verlangen danach.

Im Laufe der Entwicklung des Verständnisses der chemischen Atmungskontrolle teilten sich seine Fürsprecher in zwei Gruppen. Eine vertrat die Meinung, daß es überwiegend der Grad der Anreicherung mit Sauerstoff im Blut sei, der das Atemzentrum beeinflusst und seine Aktivität steuert. Die andere Gruppe führte Hinweise darauf, daß vielmehr die Kohlendioxidmenge im Blut der bestimmende Faktor sei, auf. Auch in diesem Fall steuerten beide Seiten der Kontroverse wertvolle experimentelle Ergebnisse bei, und beide hatten zum Teil recht. Die Atmung wird tatsächlich grundlegend durch den Sauerstoffdruck, an den das Individuum angepaßt ist, beeinflusst: Ein Druck, der von der Höhe des Wohnorts über dem Meeresspiegel abhängt. Die Anpassung an die Höhe geschieht jedoch sehr langsam und dauert Tage oder Wochen. Nur bei plötzlichem extremem Sauerstoffmangel, beim Eintritt der Erstickung oder nach intensiver muskulärer Anstrengung geschieht es, daß die Atmung durch akuten Sauerstoffmangel angeregt oder, wie wir nachher sehen werden, übermäßig angeregt wird.

Auf der anderen Seite gewährt die Natur, daß in einem gesunden Menschen oder einem gesunden Tier außer unter intensiver Anstrengung immer reichliche Sauerstoffversorgung stattfindet und ihr Einfluß auf die Atmung daher unter normalen Bedingungen immer relativ gering ist. Es sind die Schwankungen in der Kohlendioxidmenge, die bei Ruhe oder bei körperlicher Anstrengung den Reiz zur Anpassung der Atmung an den veränderlichen Energiebedarf des Körpers liefern. Foster führte in seinem oben erwähnten Buch an, daß das zu dem Zeitpunkt verfügbare Wissen darauf hindeutete, daß Sauerstoff eine Kontrolle von größerem Einfluß als Kohlendioxid ausübt. Aber bereits 1885 hatte Miescher, ein Schweizer Physiologe, in einem Artikel, der eines der Meisterwerke der Physiologie darstellt, alle damals vorhandenen Hinweise zusammengefaßt und war zu dem Schluß gelangt, daß hauptsächlich die Schwankungen der Kohlendioxidmenge die unmittelbaren Anpassungen der Atmung hervorriefen. In einem klassisch anmutenden Satz, durch geniale Einsicht

inspiriert, schrieb er: "Über die Sauerstoffversorgung des Körpers breitet das Kohlendioxid seine beschützenden Schwingen aus." Er starb, ehe er sein Werk vollenden konnte, und sein Tod konnte als Abschluß des zweiten Kapitels in der Geschichte der Atmung und der Funktionen des Kohlendioxids im Körper bezeichnet werden.

Der Atem des Lebens

Die ersten 3 Jahrzehnte des gegenwärtigen Jahrhunderts waren Zeugen einer außerordentlichen Umkehr der Standpunkte und einer Zunahme des Interesses im Hinblick auf die funktionelle Wichtigkeit von Kohlendioxid im tierischen Körper. Zudem finden Entdeckungen auf diesem Gebiet, die zunächst rein wissenschaftlich und theoretisch waren, nun einen weiten Bereich klinischer Anwendungen zur Linderung von Leiden und zur Lebensrettung.

Vor der Betrachtung dieser Dinge mag es am besten sein, den Geist von gewissen tiefverwurzelten Fehleinschätzungen zu befreien, die für lange Zeit der Wahrheit entgegenstanden und ihre Anwendung behinderten. Es wird offensichtlich werden, daß Kohlendioxid in Wirklichkeit der Atem des Lebens ist.

Der menschliche Geist ist in seinem Wesen dazu geneigt, einen moralistischen Blick auf die Natur einzunehmen. Vor der modernen wissenschaftlichen Ära, die nur ein oder zwei Generationen zurückreicht, wurde nahezu jedes Problem, das auch nur ansatzweise die Gedanken der Öffentlichkeit erreicht hatte, als eine Alternative zwischen Gut und Böse, Rechtschaffenheit und Sünde, Gott und dem Teufel angesehen. Diese abergläubische Einstellung verzerrt noch immer die Ansichten über Gesundheit und Krankheit: in der Tat ist sie hauptsächlich von der Erfahrung körperlichen Leidens abgeleitet. Lavoisier trug ohne Absicht dazu bei, als er den lebenserhaltenden Charakter des Sauerstoffs und die erstickende Macht des Kohlendioxids feststellte. Entsprechend typisiert Sauerstoff auf dem Gebiet der Atmung und verwandter Funktionen für über ein Jahrhundert nach seinem Tod bis jetzt das Gute und Kohlendioxid wird immer noch als ein Geist des Bösen angesehen. Es könnte kaum eine größere Fehleinschätzung über die wahren biologischen Beziehungen dieser Gase geben.

1.1.1 Physiologie

Beziehungen zwischen Kohlendioxid und Sauerstoff im Körper

Kohlendioxid ist in Wirklichkeit eine grundlegendere Komponente lebender Materie, als es Sauerstoff ist. Das Leben auf Erden existierte möglicherweise Millionen von Jahren vor dem carboniferen Zeitalter, in einer Atmosphäre, die einen viel höheren Kohlendioxidgehalt aufwies als heute. Es mag sogar eine Zeit gegeben haben, in der kein freier Sauerstoff in der Luft verfügbar war. Sogar heute noch können Tiere wie Spulwürmer in einer Atmosphäre aus Wasserstoff und gänzlich ohne Sauerstoff leben und aktiv sein. Bei Wirbeltieren ist der Prozeß der Muskelkontraktion vollständig anaerob.

Die Muskeln eines Frosches ziehen sich unter einer Atmosphäre aus reinem Stickstoff wirksam und wiederholt zusammen. Während der Kontraktion erzeugt ein Muskel Milchsäure, zum Teil durch Rückumwandlung in Zucker. Mit anderen Worten, Sauerstoff ist keiner der primären Faktoren bei der muskulären Arbeit. Die Sauerstoffreserven im Körper sind klein, und kräftige Atmung findet nicht vor einer Anstrengung statt; zuerst kommt die Anstrengung, und erst dann wird der Sauerstoff, der zur Reinigung des Systems vor einer weiteren Anstrengung benötigt wird, aufgenommen. Der Sauerstoffbedarf für diese Reinigung nach dem Verbrauch und für Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit wird von A.V. Hill das "Sauerstoffdefizit" der Anstrengung genannt.

Auf der anderen Seite deutet das heutige Wissen darauf hin, daß Kohlendioxid ein absolut notwendiger Bestandteil des Protoplasmas ist. Es ist einer der Faktoren, die bei dem Säure-Base-Gleichgewicht zur Beibehaltung des normalen pH-Werts im Gewebe eine Rolle spielen. Akapnie, das heißt die Abweichung vom normalen Kohlendioxidgehalt nach unten, beinhaltet daher eine Störung einer der fundamentalen Lebensbedingungen.

Ein anderes natürliches, aber sehr hinderliches Mißverständnis ist, daß Sauerstoff und Kohlendioxid so sehr Gegenspieler voneinander sind, daß eine Zunahme des einen im Blut notwendigerweise eine entsprechende Abnahme des anderen hervorruft. Im Gegenteil, obwohl jedes der beiden durch seine Anwesenheit dazu neigt, den Druck zu erhöhen und damit die Abwanderung des anderen hervorzurufen, werden die beiden Gase im Blut durch unterschiedliche Mechanismen gehalten und transportiert. Sauerstoff wird durch das Hämoglobin der Blutkörperchen befördert, während Kohlendioxid an Basen im Plasma gebunden ist. Eine Blutprobe kann beide Gase sowohl in hoher als auch in niedriger Konzentration beinhalten. Zudem treten niedriger Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt (Anoxämie und Akapnie) unter klinischen Bedingungen in der Regel gemeinsam auf. Jeder dieser abnormalen Zustände neigt dazu, den anderen hervorzurufen und zu verstärken. Eine therapeutische Erhöhung des Kohlendioxidgehalts durch Einatmung des mit Luft gemischten Gases ist oft ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung von Blut und Gewebe. Unter Bedingungen akuten Sauerstoffentzugs wie zum Beispiel bei Erstickung durch Kohlenmonoxid leidet der Körper an einer übermäßigen Ausscheidung von Kohlendioxid, und die Wiederherstellung des Kohlendioxidgehalts ist an sich von Nutzen. Bei einem Ertrunkenen oder einem nicht atmenden Kind ruft der Sauerstoffentzug keinen Kohlendioxid-Überschuß hervor. Im Gegenteil, in Abwesenheit von Sauerstoff können Milchsäure und andere primäre Zersetzungsprodukte nicht in Kohlendioxid umgewandelt werden. Für diese Umwandlung ist Sauerstoff notwendig. Der Ausspruch Mieschers, in einem obigen Abschnitt zitiert, hat damit ein größeres Ausmaß an Wahrheit und Anwendungsbreite, als er möglicherweise begreifen konnte.

Faktor des Säure-Base-Gleichgewichts im Blut

Die moderne Physiologie hat gezeigt, daß es zusätzlich zu der vom Nervensystem ausgeübten Steuerung und Regelung zahlreiche vom Körper erzeugte chemische Substanzen gibt, die Form und Funktion beeinflussen. Diesen aktiven Prinzipien gab Sterling den Namen Hormone. Zu den Hormonen gehören Epinephrin (oft als Adrenalin bezeichnet), Pituitrin, Thyroxin, Insulin und viele weitere Erzeugnisse der Drüsen der inneren Sekretion und anderer Organe. Kohlendioxid ist das wichtigste Hormon im gesamten Körper. Es ist das einzige, das von jeder Gewebeart produziert wird und das sich wahrscheinlich auf jedes Organ auswirkt. Bei der Regelung der Körperfunktionen übt Kohlendioxid mindestens drei wohldefinierte Einflüsse aus: es ist einer der wichtigen Faktoren beim Säure-Base-Gleichgewicht des Blutes, es hat prinzipielle Kontrolle bei der Atmung und es hat eine unerläßliche belebende Auswirkung auf das Herz und den peripheren Kreislauf.

In den vergangenen Jahren kam umfangreiche Literatur über die sogenannte Alkalireserve, das Säure-Base-Gleichgewicht und den pH-Wert oder die Wasserstoff-Ionenkonzentration im Plasma zusammen. Ebenso wurden umfangreiche Forschungen und Erörterungen über die tatsächlichen oder vermuteten Beziehungen dieser Bluteigenschaften zur klinischen Acidose und Alkalose. Bei den komplizierten Anpassungen des physisch-chemischen Gleichgewichts des Blutes wird Kohlendioxid mehr als jeder andere Faktor durch Schwankungen infolge jeder Änderung der Körperaktivität oder Wärmeproduktion. Es ist aber auch der Faktor, der am unmittelbarsten wieder angepaßt wird. Die automatischen Reaktionen, die diese Wiedereinstellung bewirken, sind die Zunahme und Abnahme des Atemvolumens. Dieses Volumen hängt sowohl von der Tiefe der Atmung als auch von ihrer Frequenz ab, und ist das Produkt aus Tiefe und Frequenz. Es bestimmt den Grad der Atmung des Blutes, indem es durch die Lunge fließt. Normalerweise ist es so eingestellt, daß der Kohlendioxidgehalt etwas über 5% des atmosphärischen Drucks von 1 at liegt. Dieser

Anteil an Kohlendioxidgas in der Luft der Alveolen hat genau den Gehalt an Kohlensäure in Lösung im Blut, der für das normale Gleichgewicht der Alkali-Menge und damit zur Erzeugung und Erhaltung des normalen pH-Werts benötigt wird. Dies ist das Prinzip, das durch die Gleichung von L.J.Henderson ausgedrückt wird:

$$\text{pH} = \text{K} \times [\text{H}_2\text{CO}_3] / [\text{NaHCO}_3]$$

Falls jedoch infolge einer Störung der Funktion der Nieren oder sonstiger Organe der in Gebrauch befindliche Blutalkaligehalt nicht im normalen Bereich liegt, würde der pH-Wert des Blutes ebenfalls abnormal werden, wenn es die entgegenwirkende Kontrolle der Atmung auf den Kohlendioxidgehalt in der Alveolenluft und damit über den im Blut gelösten Kohlensäuregehalt nicht gäbe. Sobald der Blutalkaligehalt niedriger als normal wird, nimmt die Atmung zu und verursacht eine stärkere Luftversorgung. Sinn und Zweck dieser Vergrößerung ist die Mischung und Verdünnung alveolaren Kohlendioxids mit einer größeren Menge Frischluft. Infolgedessen wird der Kohlensäuregehalt proportional gesenkt. Dies ist der Grund für die Zunahme der Atmung, die bei der Acidose infolge akuter Nephritis und beim diabetischen Koma auftritt und sich beim Nahen des Todes in Hunger nach Luft entwickelt: eine Zunahme der Atmung ist der natürliche Ausgleich für eine Abnahme des Blutalkaligehalts. Auf der anderen Seite nimmt die Atmung, wenn der Kohlendioxidgehalt in Verbindung mit normalem oder erhöhtem Blutalkaligehalt zu niedrig ist, ab oder setzt vollständig aus. Diese Atemreaktionen hängen vom verbindenden Einfluß des Kohlendioxids in seinem chemischen Gleichgewicht mit dem Blutalkaligehalt ab, denn selbst wenn der Kohlendioxid- und Alkaligehalt auch nur leicht aus der Balance gerät, wird das Atemzentrum durchgreifend angeregt oder zurückgehalten.

Ob die physiologischen Reaktionen auf Kohlendioxid direkt mit einem spezifischen Effekt dieses Stoffes zusammenhängen oder vielmehr mit dem pH-Wert des Blutes und anderer Flüssigkeiten, auf die Kohlendioxid einen wichtigen Einfluß hat, ist zur Zeit Gegenstand der aktiven Forschung. Es ist jedoch bemerkenswert, daß die Existenz dieser Abläufe viele der zur Zeit vorherrschenden Ansichten betreffend die Chemie der klinischen Acidose und Alkalose ungünstig macht. Die Schlußfolgerung, der pH-Wert des Blutes würde durch die in Gebrauch befindliche Alkalimenge entsprechend beeinflusst, läßt sich nicht mit der korrekten Anwendung von Chemie und Physiologie vereinbaren. Ein hoher oder niedriger Blutalkaligehalt benötigt lediglich einen entsprechenden Anstieg oder Abfall des Atemvolumens zu seiner Kompensation, um einen normalen pH-Wert zu erreichen. Falls demnach bei Nephritis, Diabetes oder anderen Störungen der pH-Wert wirklich von der Norm abweicht und das Blut daher auch nur geringfügig saurer oder basischer als normal wird, so muß es eine Störung der Atmungsregelung geben, die noch nicht bekannt ist. Eine normale Regelung des Kohlendioxiddrucks ist völlig ausreichend, um unter praktisch allen Bedingungen sowohl einen hohen als auch einen niedrigen Blutalkaligehalt in Verträglichkeit mit dem Fortbestand des Lebens auszugleichen.

Die Funktion, die normalerweise von den Nieren eingenommen wird sowie die Auswirkungen abnormaler Zustände und Abläufe in ihnen auf andere Organe, die den Blutalkaligehalt sowohl bei Gesundheit als auch bei solchen Störungen wie Diabetes und klinischer Acidose und Alkalose beeinflussen, gehen über den Rahmen dieses Artikels hinaus. Die Probleme, die von diesen Dingen ausgehen, sind zur Zeit nur unvollständig untersucht worden.

Bei der Kontrolle der Atmung und des Kreislaufs

Die aktuelle Entwicklung des Wissensstandes betreff der Rolle von Kohlendioxid bei der Regelung der Atmung begann mit einem klassischen Artikel von Haldane und Priestly unter dem Titel "Die Regelung der Lungenatmung" und wurde von anderen wichtigen Veröffentlichungen von Haldane und Douglas weitergetragen. In diesen Veröffentlichungen wurde anhand von Beobachtungen bei gewöhnlichen Menschen gezeigt, daß die Atmung

weitgehend unbeeinflusst blieb, sowohl bei der Einatmung von sauerstoffreicher Luft als auch bei einem gemäßigten Absinken des Sauerstoffpegels wie bei Aufenthalt in großer Höhe. Auf der anderen Seite ändert sich das Atemvolumen automatisch in unmittelbarer Anpassung an den vom Körper erzeugten Kohlendioxidgehalt, so daß die alveolare Luft in dieser Hinsicht nahezu konstant bleibt. Kohlendioxid ist das wichtigste, unmittelbare Atmungshormon.

Einige Monate, nachdem der erste Artikel von Haldane und seinen Mitarbeitern den Einfluß des Kohlendioxids auf die Atmung gezeigt hatte, veranlaßte Henderson seine Mitarbeiter zur Veröffentlichung einer langen Reihe von Artikeln, die sich mit der Auswirkung von Kohlendioxid auf den Kreislauf befaßten. Sie zeigten, daß Akapnie akute Herzstörungen und Versagen der peripheren Durchblutung verursachen konnte. Diese Zustände ähneln der funktionellen Unterdrückung durch Schock bei Patienten nach verlängerter Anästhesie bei großen Operationen. Auf der anderen Seite wurde gefunden, daß, falls der Kohlendioxidgehalt durch teilweises Wiedereinatmen der ausgeatmeten Luft hochgehalten wurde, die Vitalität eines Tieres nur in geringem Maß reduziert wurde.

Die Beobachtungen der Atmung von Tieren unter einer Art von Anästhesie, die absichtlich so durchgeführt wurde, daß sie nichtfachmännische Durchführung simulierte, zeigte, daß das Atemversagen, das früher eine der grundlegenden Gefahren im Operationssaal war, weitgehend auf übermäßiges Atmen im Zustand der Aufregung zurückzuführen ist. Wenn unter Anästhesie eine übermäßige Abatmung von Kohlendioxid herbeigeführt wird und anschließend das Atemzentrum durch einen leichten Überschuß des Anästhetikums unterdrückt wird, so setzt die Atmung aus. Sie setzt erst wieder ein, wenn der chemische Reiz der Blutgase und die Empfindlichkeit des Atemzentrums soweit wiederhergestellt sind, um die natürliche Atmungsaktivität wieder in Gang zu bringen.

1.1.2 Therapie

Bei der Anästhesie

1920 wandten Henderson, Haggard und Coburn ihre Ergebnisse im Krankenhaus an und fanden, daß bei Anwendung von Kohlendioxid (8 %) in der Luft bei Patienten nach schwerwiegenden Operationen unter offener Äther-Anästhesie angewendet wurden, die Ergebnisse überraschend positiv waren. Bei Rückkehr der tiefen Atmung verschwand die damals nach der Anästhesie übliche Cyanose. Die Hautdurchblutung verbesserte sich. Die Farbe und Temperatur Haut änderten sich, von blaugrau und kalt hin zu rosig und warm. Der zuvor dünne Pulsschlag wurde schnell voll und kräftig, und der arterielle Druck wurde auf einen Normalwert gebracht. Dank dem erhöhten Atemvolumen wurde das Anästhetikum (Äther) schnell durch Atmung aus dem Blut entfernt und das Bewußtsein kehrte innerhalb weniger Minuten zurück, sogar nach tiefer Anästhesie. Schwindel und Erbrechen wurden entweder stark reduziert oder traten gar nicht mehr auf, und nach der Einatmung [von CO₂] fiel der Patient rasch in den Schlaf.

In Fortsetzung dieser Entdeckungen fand White, daß bei langsamen Blutungen (Hemorrhage) nach Hirnoperationen die Atmungsrate nach und nach abnimmt, bis der Tod droht. In einigen solcher Fälle wurde Leben durch Stimulation der Atmung mit der Einatmung von Kohlendioxid gerettet.

Die Anwendung dieser Inhalation ist mittlerweile in Verbindung mit Anästhesie allgemein anerkannt. Beinahe jedes amerikanische Anästhesiegerät hat nun einen Anschluß für eine Flasche Kohlendioxid oder einer Mischung von Kohlendioxid und Luft. Dadurch wird jeder Tendenz zum Atemversagen auf dem Operationstisch entgegengetreten. Am Ende der Operation wird Einatmung von Kohlendioxid herbeigeführt, um die Atmung anzuregen und die rasche Ausatmung eines großen Teils des Anästhetikums herbeizuführen. Durch die

Inhalation wird ebenfalls eine kräftige Herztätigkeit und der Tonus der peripheren Durchblutung wiederhergestellt.

Postoperative Atelektase und Lungenentzündung --- Prophylaxe

Aus der Anwendung von Kohlendioxid für die gerade erwähnten Anwendungszwecke heraus entwickelte sich eine noch wichtigere Anwendung, nämlich die Verhinderung der postoperativen Atelektase und Lungenentzündung. Viele Beobachter stellten fest, daß nach schwerwiegenden chirurgischen Eingriffen die Vitalkapazität der Lunge auf bis zu ein Drittel im Vergleich zum Volumen vor der Operation reduziert war. Das Zwerchfell kann dabei um mehrere Zentimeter in Richtung Thorax angehoben sein. Auf Röntgenbildern wird dieser Zustand zu einem gewissen Ausmaß über mehrere Tage hinweg beobachtet. Die Position des Thorax gleicht im wesentlichen der, die bei normalen Menschen einige Minuten lang nach intensiver, erzwungener Atmung auftritt. Sie ist daher eine Begleiterscheinung der Akapnie.

Dies akapnielle Position des Thorax kann beträchtliche Teile der Lunge unbeatmet lassen. Die Luftwege zu diesen Bereichen können sich verschließen, und die abgeschlossene Luft wird dann in das Blut aufgenommen.

Als Ergebnis kann sich Atelektase eines Lungenlappens oder der massive Kollaps eines ganzen Lungenflügels entwickeln. Aus diesem Zustand heraus kann sich, wie Coryllos und Birnbaum experimentell festgestellt haben, Lungenentzündung entwickeln, denn sobald zufällig pathogene Organismen anwesend sind, finden sie in einer atelektatischen Lunge günstige Wachstumsbedingungen.

Die grundsätzliche Richtigkeit dieser Ansicht über den Ursprung der postoperativen Atelektase und Lungenentzündung wird durch die vorbeugenden und therapeutischen Mittel bestätigt, die als wirksam zu ihrer Bekämpfung oder Vorbeugung eingestuft wurden. In vielen chirurgischen Kliniken in Amerika und Deutschland ergab sich, daß, falls die Inhalation von Kohlendioxid in allen Fällen nach Anästhesie und Operation angewandt wurde, die Lungen sich wieder ausdehnten, der Tonus der Atemmuskeln wiederhergestellt wurde, Atelektase verhindert wurde und das Risiko der postoperativen Lungenentzündung praktisch ausgeschaltet wurde.

Lungenentzündung

Der mögliche Nutzen einer ähnlichen auf Inhalation gestützten Behandlungsmethode für Lungenentzündung, zum Beispiel nach Influenza, wird zur Zeit erforscht. Henderson, Haggard, Coryllos und Birnbaum haben anhand von Hunden, bei denen Lungenentzündung experimentell herbeigeführt wurde, gezeigt, daß die Lungen befreit und die Lungenentzündung geheilt werden konnte, indem die Tiere über eine Zeit von 12 bis 24 einer Atmosphäre von etwa 8% Kohlendioxid Stunden ausgesetzt wurden. Die Behauptung, daß dieses richtiggehend Behandlungsmethoden sind, wird von der Tatsache unterstützt, daß Pneumokokken durch eine Absenkung des pH-Werts, wie sie bereits durch Kohlendioxid herbeigeführt wird, in ihrem Wachstum gehemmt oder sogar abgetötet werden. Eine Absenkung des pH-Werts durch Kohlendioxid trägt auch zu der Autolyse und Verflüssigung der Absonderungen bei, die für die Konsolidierung der Lungen bei Lungenentzündung verantwortlich sind. Viele Fälle von Lungenentzündung wurden mittlerweile durch Inhalation von Kohlendioxid in Sauerstoff behandelt; und ein spezielles Zelt für diese Behandlung wird zur Zeit von Henderson und Haggard eingeführt. Diejenigen, die diese Behandlungsmethode verwendet haben, sind der Ansicht, daß sie derjenigen nur mit Sauerstoff entschieden überlegen ist.

Erstickung

Sehr ähnlich der Anwendung der Inhalation von Kohlendioxid nach der Anästhesie ist die zeitgemäße Behandlung der Kohlenmonoxidvergiftung. Diese Form der Erstickung ist Ursache für viele tausend Todesfälle in jedem Jahr. Die am meisten verbreiteten Ursachen sind Stadtgas (city manufactured gas???), das 20-30% Kohlenmonoxid enthält, sowie Autoabgase. Kohlenmonoxid geht eine Verbindung mit Hämoglobin ein, die Sauerstoff verdrängt. Diese Bindung ist jedoch nicht so fest, wie einst geglaubt wurde, denn das Kohlenmonoxid kann wiederum ersetzt werden. Die sauerstofftransportierende Fähigkeit des Blutes wird dadurch wiederhergestellt. Das kritische an der Kohlenmonoxidvergiftung ist die Erstickung insbesondere des Nervensystems aufgrund der verminderten Sauerstoff-Transportkapazität des Blutes. Es schien demnach zuerst, als ob die Inhalation von Sauerstoff die logische Behandlungsmethode wäre. In der Praxis wurde jedoch festgestellt, daß Sauerstoff alleine weit weniger hilfreich war als erwartet.

Bei der Untersuchung dieses Problems fanden Henderson und Haggard, daß bei der Entstehung der Kohlenmonoxidvergiftung das Opfer zuviel atmet und übermäßig viel Kohlendioxid abgibt. Es entwickelt dadurch Akapnie und auch Anoxämie. Bei Entfernung aus der schädlichen Atmosphäre kann das Opfer eine ausgeprägte Absenkung der Atmung zeigen. Die Anwendung von Sauerstoff ist daher nur wenig wirksam, da der Sauerstoff nicht genügend eingeatmet wird.

Bei Experimenten mit von drohender Erstickung betroffenen Tieren zeigten die Forscher, daß durch Anwendung einer Mischung von Sauerstoff und Kohlendioxid die Atmung so angeregt und die Entfernung des Kohlenmonoxids so beschleunigt werden konnte, daß eine schnelle Erholung herbeigeführt werden konnte. Bei den guten Ergebnissen ist die Aufhebung der Akapnie beinahe so wichtig wie die Entfernung des Kohlenmonoxids und die Wiederherstellung einer reichlichen Sauerstoffversorgung.

Der H-H-Inhalator, ein besonderes Gerät zur Anwendung einer Mischung von Sauerstoff und Kohlendioxid bei erstickenden Patienten wurde daher entwickelt und in großem Umfang eingeführt. Diese Behandlung war so erfolgreich, daß mittlerweile viele tausend dieser Inhalatoren im Gebrauch sind: einige Hundert beispielsweise in New York, und eine der Bevölkerungszahl entsprechende Anzahl in Chicago und anderen Städten. Die Rettungsmannschaften der Feuerwehr und der Polizei, die Gas- und Stromgesellschaften und neuerdings auch die Krankenhaus-Ambulanzen verfügen im allgemeinen darüber. Zuerst wurde eine Mischung von 5% Kohlendioxid in Sauerstoff benützt, aber 7% haben sich als noch hilfreicher herausgestellt.

Der Wert dieser Behandlung liegt nicht nur in der Rettung von Leben, sondern auch in der Vorbeugung luftmangelbedingter Folgeerscheinungen wie Lungenentzündung, Herzschäden und permanente Nervenschäden. In vielen Fällen kurzer, aber intensiver Kohlenmonoxidvergiftung wird der Patient innerhalb einer Stunde vollständig wiederhergestellt; er kann dann unmittelbar und sicher zur Arbeit zurückkehren.

Die gleiche Behandlung wird wirkungsvoll zur Wiederherstellung bei Vergiftung mit einer ganzen Reihe weiterer schädlicher Gase eingesetzt, die in der Industrie auftreten.

Erstickung des Neugeborenen

Aus dieser Behandlung der Kohlenmonoxidvergiftung hat sich der Gebrauch der Inhalation zur Behandlung einer weitaus geläufigeren Form der Erstickung entwickelt: die des Neugeborenen. Die Geschichte dieser Entwicklung ist interessant. Darin haben die Männer der Rettungsmannschaften der Chicagoer Feuerwehr in etwa die gleiche Rolle gespielt, die die Mägde, die immun gegen Windpocken waren, bei der Entdeckung der Pockenschutzimpfung.

Oftmals geschah es, daß ein Arzt in Chicago, der eine erfolgreiche Behandlung eines Falles von Kohlenmonoxidvergiftung mitgemacht hatte, danach ein Kind zur Welt bringen sollte, das nicht atmete. Nachdem er das Kind geschüttelt hatte, ihm einen Klaps verpaßt hatte und es abwechselnd in kaltes und warmes Wasser getaucht hatte, dachte der Geburtshelfer, der nicht in der Lage war, aktive, normale Atmung herbeizuführen, daran, eine der Rettungsmannschaften mit ihrem Inhalator anzurufen. Die Behandlungen dieser Männer war oftmals so erfolgreich, daß nach Ablauf einiger Jahre die Feuerwehr beträchtliche Erfahrung auf diesem Gebiet entwickelt hatte. Mit berechtigtem Stolz nahm sie für sich in Anspruch, das Leben einiger hundert Neugeborener gerettet zu haben.

Als dieses Wissen die Aufmerksamkeit des Autors erreichte, leuchtete ihm ein, daß die Inhalation von Sauerstoff und Kohlendioxid aus theoretischen Gründen genau die Methode mit größter Wirksamkeit bei der Bekämpfung der Erstickung von Neugeborenen ist. Als Ergebnis dieser Entdeckung ersetzt die chemische Stimulation des unterdrückten Atmungszentrums des Neugeborenen schnell die älteren, oftmals unwirksamen Methoden der Wiederbelebung, die auf Stimulation der Haut beruhen.

Lungenentzündung des Neugeborenen

Vorbeugung

Die Lungen sind bei der Geburt atelektatisch, das heißt, nicht belüftet. Der erste Schrei bewirkt eine teilweise Erweiterung. Spätere Atemzüge weiten die Lungen in der Regel weiter aus; aber die Erweiterung ist oftmals für mehrere Tage oder sogar Wochen unvollständig. Wenn während dieser Zeit schädliche Organismen anwesend sind, finden sie günstige Wachstumsbedingungen in allen noch atelektatischen Teilen der Lunge. Die Anzahl der Todesfälle im Leben des Neugeborenen aus diesem Grund liegt oft bei vier von hundert Lebendgeburten. Um dieser Todesgefahr vorzubeugen, war es lange Zeit gebräuchlich, das Kind mindestens einmal täglich zum Schreien zu bringen. Zu diesem Zweck wird ein schmerzhafter Reiz wie beispielsweise das Zwicken seiner Fußsohlen mit einem elastischen Gummiband angewandt. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß ein zu früh geborenes oder schwaches Kind oftmals nicht ausreichend gereizt werden kann und sich infolgedessen eine Lungenentzündung entwickelt. Eine humanere, wissenschaftlich besser begründete und wirksamere Methode, die Lungenerweiterung herbeizuführen, ist die routinemäßige Behandlung aller Neugeborenen mit fünf- bis zehnminütiger Inhalation eines Gemisches aus Sauerstoff und 7-8% Kohlendioxid. Die Mischung ist vollständig sicher für den allgemeinen Gebrauch durch Hebammen und Krankenpfleger. Höhere Kohlendioxidkonzentrationen können wirksam für schwierigere Fälle eingesetzt werden, aber bevorzugt nur durch Personen, die Erfahrung in der Anwendung solcher Konzentrationen in Verbindung mit der Anästhesie haben.

Angina Pectoris und vorübergehender Verschuß (Claudikation)

In den meisten Anwendungen der Inhalationsbehandlung, die auf den vorigen Seiten besprochen wurden, ist der Einfluß des Kohlendioxids auf die Atmung vorwiegend von Bedeutung. Die ebenso bedeutsamen Auswirkungen auf das Herz und die peripheren Blutgefäße sind noch nicht im gleichen Ausmaß untersucht worden. Henderson und seine Mitarbeiter zeigten vor vielen Jahren, daß das Herz unter bestimmten experimentell herbeigeführten Bedingungen dazu neigt, einen partiellen Tetanus oder Krampf zu entwickeln, und daß dieser Zustand durch Anwendung von Kohlendioxid überwunden werden kann. Sie zeigten auch, daß aufgrund des Abfalls des Muskeltonus bei verlängerter Anästhesie und Operation, das Blut in den peripheren Blutgefäßen stagniert, die venöse Rückkehr zur rechten Herzhälfte progressiv abnimmt und der Kreislauf schließlich zum Stillstand kommt.

Mit diesen Betrachtungen als physiologischem Hintergrund wurde der Einfluß der Kohlendioxid-Inhalation vor kurzem in verschiedenen Fällen von Angina Pectoris untersucht. Es handelt sich dabei nicht um eine Notfallbehandlung, sondern um eine Therapie für fortdauernde Anwendung. Sie wird zwei- bis dreimal am Tag für jeweils 10-15 Minuten angewendet. Die Inhalationsmethode entspricht im wesentlichen der, die von Henderson, Haggard, Coburn und von White nach Anästhesie und Operation verwendet wird. Da die Inhalation aus Kohlendioxid in Luft besteht, sind ihre Kosten abgesehen von denen des Kontrollapparats klein.

Die Auswirkungen dieser Behandlung sind eine deutliche Verbesserung der Farbe der Lippen und der Haut, was auf einen Einfluß auf die periphere Durchblutung ähnlich dem von Amylnitrat hindeutet. Der arterielle Druck und die Pulsfrequenz werden nicht erhöht, obwohl sich eine deutlich kräftigere Zirkulation einstellt. Das Druckgefühl im Brustkorb und der Schmerz in Schulter und Arm nimmt beträchtlich ab; beide können für einige Stunden nach der Inhalation verschwinden. Nach einigen Wochen täglicher Inhalation steigt die Fähigkeit zu moderater körperlicher Anstrengung entschieden an.

Die Inhalation wurde auch in ein paar Fällen vorübergehenden Verschlusses von Blutgefäßen angewendet. Eine deutliche Verbesserung der lokalen Zirkulation ergab sich sowohl während der Inhalation als auch in Folge der Gesamtauswirkung der Behandlung im Laufe einiger Wochen. Wenn die Behandlung unterbrochen wurde, fielen die Patienten schnell in ihren vorigen Zustand zurück.

Ertrinken und elektrischer Schock

Die anerkannte Behandlung der Opfer von Ertrinkung und elektrischem Schock ist die künstliche Beatmungsmethode von Shafer (prone pressure). Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Rückkehr der normalen Atmung durch die Anwendung von Sauerstoff und Kohlendioxid aus einem Inhalator beträchtlich unterstützt und beschleunigt wird, während künstliche Beatmung durchgeführt wird. Die Lungen werden nicht nur mit einer höheren Sauerstoffkonzentration versorgt, sondern das unterdrückte Atmungszentrum wird auch eher zu einer Rückkehr zu normaler Nervenaktivität stimuliert, als dies sonst der Fall wäre.

Katatonie

Schließlich können noch die außergewöhnlichen Beobachtungen des späten A.S. Lovenhart erwähnt werden, worin er herausfand, daß die Inhalation von Kohlendioxid bei Fällen von Katatonie eine zeitweilige Wiederherstellung von Intelligenz und mentaler Antwortbereitschaft herbeiführte. Die einfachste Erklärung der Ergebnisse in diesem Fall beruht auf der Postulation einer habituellen Kontraktion der Blutgefäße im Gehirn des katatonischen Patienten ähnlich der in Herz und Gliedmaßen bei den im vorigen Abschnitt diskutierten Fällen. Falls diese Ansicht korrekt ist, beruhen die positiven Auswirkungen der Inhalation auf der Verbesserung der Hirndurchblutung unter dem Einfluß von Kohlendioxid auf die feineren Blutgefäße.

Yandell Henderson, New Haven, Connecticut

1.1.3 Referenzen z.B.

Haldane, J.S.: Respiration, Yale University Press, 1922

Henderson, Y.: Physiological Regulation of the Acid-Base Balance of the blood and Some Related Functions, Physical. Rev. 5:131 (April) 1925;

The Dangers of Carbon Monoxide Poisoning and Measures to Lessen These Dangers,
J.A.M.A> 94: 179 (Jan.18) 1930;

Acapnia as a Factor in Post-operative Shock, Atelecasis and Pneumonia, Ibid. 95: 572 (Aug.23) 1930;

Incomplete Dilation of the Lungs as a factor in Neonatal Mortality, Ibid. 96: 495 (Feb.14) 1931.