

Ein Respirationsapparat.

Von

Dr. E. Grafe, Assistenten der Klinik.

(Aus der medizinischen Klinik in Heidelberg, Direktor: Prof. Dr. Krehl.)

(Der Redaktion zugegangen am 24. Januar 1910.)

Die Versuche von Zuntz und seinen sehr zahlreichen Schülern (vgl. 6) haben bewiesen, wie wichtige Schlüsse besonders beim Gesunden aus kurz dauernden Respirationsversuchen für den Stoffwechsel sich gewinnen lassen. Für eine Reihe von Fragestellungen, vor allem solche, in denen es gilt, vorübergehende Veränderungen des Stoffwechsels z. B. nach Arbeitsleistung zu studieren, ist die Methodik mit kurzen Perioden wohl die allein zulässige.

Will man jedoch exakte Bilanzen des Stoff- und Kraftwechsels aufstellen oder abnorme Umsetzungen im Organismus verfolgen, so sind Versuche mit Apparaten, die den ganzen Menschen für viele Stunden aufnehmen können, weit vorzuziehen. Es gibt derartige große Respirationsapparate in Deutschland nur sehr wenige. Meist ist wie in München, Berlin und Düsseldorf das Pettenkofersche Prinzip zugrunde gelegt. Der Nachteil dieser Apparate besteht in dem zu großen Volumen, das sie für kürzer dauernde, nur 2—3 Stunden umfassende Versuche ungeeignet macht,¹⁾ und vor allem in der Unmöglichkeit der Sauerstoffbestimmung, die für die Bearbeitung aller Fragen des qualitativen Stoffwechsels von entscheidender Bedeutung ist. Diesen Mängeln steht als Vorteil gegenüber, daß die Kohlensäurebestimmung außerordentlich genau ist.

Eine Reihe anderer Apparate lehnt sich mehr oder weniger eng an das Regnault-Reisetsche Prinzip an. Von Atwater und Benedict ist dann in außerordentlich exakter Weise die

¹⁾ v. Bergmann (*) hat diesem Nachteil durch Einschaltung von Zuntz-Geppert-Versuchen abzuhelpen gesucht.

Bestimmung von Sauerstoff, Kohlensäure und Wasserdampf mit der direkten Messung der Kalorienabgabe verbunden worden.⁽¹⁾ Ein ähnlicher Apparat befindet sich im Physiologischen Institut der Landwirtschaftlichen Hochschule zu Bonn-Poppelsdorf. Wegen der außerordentlich hohen Anschaffungs- und Betriebskosten sowie der großen Kompliziertheit der Apparatur kommen diese wohl am exaktesten arbeitenden Apparate für Kliniken leider kaum in Betracht. Auch sie haben den Nachteil, daß der zeitliche Ablauf der Umsetzungen im Organismus wenigstens bei großer Kammer sich nicht genau verfolgen läßt.

Die größte Vielseitigkeit der Anwendbarkeit würde ein Apparat besitzen, der es gestattet, sowohl langdauernde wie nur wenige Stunden währende Versuche zu gestatten.

Zu diesem Zwecke schien mir das von Jaquet⁽⁵⁾ ausgearbeitete Prinzip der Teilstromabsaugung am zweckmäßigsten, um so mehr als es uns schon bei dem früher beschriebenen und benützten Kopffrespirationsapparate gute Dienste geleistet hatte. Für die Konstruktion des Respirationsapparates unserer Klinik wurde mir von Herrn Professor Krehl eine von der Kgl. preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin verliehene Summe zur Verfügung gestellt. Der Kasten selbst wurde nach unseren Angaben in den Fabriken von Heinrich Lanz-Mannheim angefertigt und der Klinik in hochherziger Weise von Herrn Kommerzienrat Dr. Carl Lanz geschenkt.

Bei der Konstruktion des Kastens leiteten uns drei Hauptgesichtspunkte. Erstens mußten Form und Volumen so gewählt werden, daß bei möglichst kleinem Inhalt der Kammer der Aufenthalt für die Versuchsperson doch bequem und angenehm wurde und eine gewisse Bewegungsfreiheit gestattete. Es mußte vor allem der etwas sargartige Charakter des Baseler Apparates vermieden werden.

Zweitens mußte für vollkommene Luftdichtigkeit gesorgt werden.

Drittens war es vor allem im Interesse der Kranken, an deren Untersuchung von uns ja in erster Linie gedacht war, dringend wünschenswert, daß der Kasten leicht und augenblicklich zu öffnen und zu schließen war.

Diesen beiden letzteren Forderungen glaubte ich am einfachsten und zweckmäßigsten dadurch zu genügen, daß ich auf die Anbringung einer Türe, wie sie alle bisherigen Apparate haben, verzichtete und den Kasten mit der Unterfläche seiner 4 Seitenwände in eine mit Paraffinöl gefüllte Blechrinne stellte. Das Öffnen des Kastens geschieht durch Anheben des Fußendes und Kanten auf der Vorderwand des Kopfteils. Durch ein starkes Gegengewicht, das durch ein dickes, durch die Decke des Zimmers hindurchgehendes Seil mit dem Fußteil verbunden wurde, ist der Kasten in jeder Lage ungefähr ausbalanciert, sodaß es nur eines geringen Überdrucks zum Heben und Senken bedarf.

So ist das Öffnen und Schließen des Kastens im Bruchteil einer Sekunde ermöglicht, und man hat nicht nötig, viele Verschraubungen, die doch nur ganz selten vollkommen luftdicht schließen, zu lösen oder anzuziehen.

Der Inhalt des Kastens beträgt 2634,8 l. Die Grundfläche ist ein Rechteck, Kopf- und Fußseiten sind 90 cm lang, die Längsseiten 200 cm.

Der Kopfteil des Kastens ist 170 cm hoch. Diese Höhe behält der Kasten aber nur auf eine Strecke von 100 cm bei, von da an ist er, um Platz zu sparen, nach dem Fußende zu abgeschrägt, sodaß dieses nur 75 cm hoch ist. Das Gerüst des Kastens, in dessen Vorder- und Seitenwände sowie Decke große Fensterscheiben aus dickem Glase luftdicht eingesetzt sind, besteht aus dicken, festaneinandergefügten Holzplanken, die besonders an den Kanten und Fenstern durch starke Quer- und Längsbalken eine feste Stütze erhalten.

Innen ist der Kasten ebenso wie seine Bodenfläche mit Blech vollkommen dicht ausgeschlagen. Der Ölfarbanstrich ist außen hellgraugrün, innen weiß. Der sehr massivgebaute Boden des Kastens ruht auf kurzen Rollen und trägt eine Schiene, auf die über eine kurze abnehmbare Schienenanfahrt das Untersuchungsbett in den Kasten eingefahren wird. Dieses besteht aus einer 175 cm langen und 70 cm hohen und 72 cm breiten, graugestrichenen, eisernen Bettstelle. In Rücksicht auf eventuell nötige Desinfektion und Wasserdampfbestimmung wurde

nicht eine mit Tuch überspannte Sprungfedermatratze, welche schwer genau zu wiegen ist, genommen, sondern eine der sehr bequemen und gut zu reinigenden Matratzen, wie sie kürzlich von Dr. Lambotte-Brüssel in den Handel gebracht worden sind. Die ganze Matratze besteht aus einer großen Zahl quer verlaufender parallel nebeneinander geschalteter dünner Bänder von Eisenblech, die nur an den Längsseiten der Bettstatt befestigt sind und an einzelnen Stellen mit den Nachbargliedern Verbindung haben. Durch die weitgehende Beweglichkeit des einzelnen Bandes wird so eine große Elastizität und Anschmiegungsfähigkeit ermöglicht.

Da der Kasten nicht nur für Versuche in Ruhelage verwandt werden soll, sondern auch für stehende und sitzende, eventuell am Bremsergometer arbeitende Versuchspersonen berechnet ist, wurde vorne am Kopfteil ein Klapp Tisch angebracht, ein ebensolcher an der Seite zum Essen. An dieser Längswand ist vollkommen luftdicht verbunden in ähnlicher Weise wie an dem Baseler Apparate ein Kasten von 40 cm Höhe, 40 cm Breite und 40 cm Länge angebracht.

Der Kasten, der der Passage der Nahrungsstoffe und der Exkremente dient, wird mit einem Deckel, dessen Ränder umgebogen sind und in einer mit Wasser oder Paraffinöl zu füllenden Rinne liegen, luftdicht abgeschlossen. Zwischen dem kleinen Kasten und der großen Kammer befindet sich eine mit Gummi überzogene, kleine Schiebetür, die durch eine Hebelvorrichtung, die Gummi an Gummi preßt, einen luftdichten Abschluß der beiden Räume gegeneinander gestattet.

Zur Verständigung mit der Außenwelt dient ein Telephon mit Klingelanlage. Außerdem besitzt der Kasten einen Deckenventilator, der zur Erzielung einer gleichmäßigen Mischung der Kammerluft zu Ende der Versuche mir unerlässlich scheint. Aus einer an einer der beiden Längswände angebrachten luftdicht verschließbaren Öffnung kann jederzeit eine Probe der Kammerluft entnommen werden.

Zur Ventilation des Kastens benutzte ich in gleicher Weise wie bei dem Kopfrespirationsapparat die Luft des gut ventilierten Zimmers. Sie wird sehr nahe dem Fenster durch ein

ca. 45 cm langes und $2\frac{1}{2}$ cm weites Rohrstück angesogen. Durch eine Hebelvorrichtung kann das Rohr vom Kasten abgesperrt werden. Um bei Versuchen im heißen Sommer eine Sättigung der Kastenluft mit Wasserdampf zu verhindern, empfiehlt es sich, vor das Zustromrohr noch ein U-förmig gebogenes Glasrohr vorzuschalten, das mit groben, mit CO_2 gesättigten Chlorcalciumstücken locker gefüllt wird. Statt des Chlorcalciums kann man auch konzentrierte Schwefelsäure nehmen, die das Rohr natürlich nur soweit anfüllen darf, daß zum Hindurchstreichen der Luft noch eine schmale Passage bleibt. Auf beide Arten gelingt es bei langsamer Ventilation (ca. 20—25 l pro 1 Minute) meist, die relative Feuchtigkeit um 10—20% herabzudrücken.

Die Öffnung für den Einstrom befindet sich kurz unter der Decke an der Vorderwand des Kopfteils des Kastens, für den Ausstrom seitlich am Boden des Fußendes. Die Ventilation geschieht in genau der gleichen Weise wie bei dem Kopfrespirationsapparat, der ja nach Bedarf auch an die Gasuhr angeschlossen werden kann, durch eine mittelgroße Elstersche Gasuhr, die durch einen kleinen Elektromotor¹⁾ getrieben wird. Als Ventilationsgröße wählte ich gewöhnlich ca. 25 l pro Minute. Durch Ein- oder Ausschaltung von Widerständen läßt sich der Gang der Gasuhr innerhalb sehr weiter Grenzen regulieren.

Die Teilstromabsaugung ist die gleiche wie bei dem Kopfrespirationsapparat und stellt nur eine unwesentliche Modifikation des Jaquetschen Originals dar. Durch Aufsetzen verschieden großer Spulen und Anbringung von Rollen nach Art eines Flaschenzuges ist die Schnelligkeit des Absaugens in jeder nur wünschenswerten Art abstufbar. Bezüglich der Methodik der Gasanalyse verweise ich auf die Arbeit von Jaquet⁽²⁾ und meine Beschreibung des Kopfredspirationsapparates.⁽³⁾

Die Luftdichtigkeit des Kastens wurde auf den Lanzschen Werken geprüft und ist eine ausgezeichnete. Der Kasten vermag einen positiven und negativen Druck von 60 mm H_2O mehrere Stunden zu halten.

¹⁾ Am meisten empfiehlt sich wegen des gleichmäßigen Ganges ein Nebenschlußmotor.

Die Luftdichtigkeit des ganzen Apparates nebst Zuleitungsröhren läßt sich jeder Zeit in sehr einfacher und rascher Weise dadurch prüfen, daß während langsamer Ventilation durch die Gasuhr der Zustrom zum Kasten gesperrt wird. Zeigt dann sofort das an der Gasuhr angebrachte Wassermanometer einen negativen Druck an, der bei offenem Rohre nie zustande kommt und der nach Anhalten der Gasuhr sich nicht gleich wieder ausgleicht, so ist der Apparat genügend luftdicht.

Gleichzeitig hört man in der Gasuhr, die beginnt, etwas langsamer zu gehen, gurgelnde Geräusche. Da durch den Einstrom keine Luft in die Gasuhr eintritt, sucht diese durch den Ausstrom Luft anzusaugen, was jedoch nur durch Beiseitdrängen größerer Wassermassen möglich ist. Es ist jedoch nicht empfehlenswert, bei der Prüfung auf Luftdichtigkeit den Moment des Durchschlagens von Luft in die Gasuhr von außen abzuwarten, da auf diese Weise leicht eine Beschädigung der Gasuhr eintreten kann. Außerdem muß dann die Gasuhr wieder vollkommen entleert und neu gefüllt werden.

Wir füllen die Gasuhr mit Wasser, da uns von technischer Seite erhebliche Bedenken gegen die Füllung mit Paraffinöl, wie sie Stähelin(?) seiner Zeit empfahl, geäußert wurden. Ganz abgesehen von dem hohen Preis von mehr als hundert Litern reinen Paraffinöls läßt sich auf die Dauer eine Entstehung von Fettsäuren nicht mit Sicherheit verhindern. Diese greifen schließlich das verzinnte Kupferblech der Meßtrommel leicht an.

Das Hauptbedenken besteht aber in der Gefahr, daß im Laufe der Zeit durch Eindickung des Paraffins leicht unliebsame Meßfehler entstehen können, indem die Kammerwände der Meßtrommel Paraffinöl bei der Umdrehung mitnehmen, welches, wenn es dickflüssig ist, während des Drehens nur langsam von der Wand der Meßkammern herabfließt. Hierdurch entsteht dann eine Verkleinerung des Meßraums und eine Ungenauigkeit der Zählangaben. Von Stähelin wurde gegen die Verwendung von Wasser geltend gemacht, daß bei der Reduktion des abgelesenen Gasvolumens auf die Normalverhältnisse von 0°, 760 mm Hg und Trockenheit stets die Luft

in den Meßtrommeln als mit Wasserdampf gesättigt angenommen wird, ohne daß diese Annahme in allen Fällen zu Recht bestände. Für kleine Gasuhren und sehr rasche Umdrehungszahl der Trommel, Verhältnisse, wie sie tatsächlich bei der von Stähelin in Basel damals gebrauchten Gasuhr vorlagen, ist dieser Einwand sicher berechtigt. Für große Gasuhren mit sehr geringer Ventilation gilt dieser Einwurf jedoch nicht. Für die vollständige Sättigung der Luft mit Wasserdampf in den Meßtrommeln der Gasuhr liegen die Verhältnisse bei unserem Apparate noch dadurch günstig, daß die aus dem Respirationskasten kommende Luft im allgemeinen $2-3^{\circ}$ wärmer ist wie das Wasser der Gasuhr und daß ferner die Heidelberger Luft fast immer einen außerordentlich hohen Gehalt an relativer Feuchtigkeit hat.

Außer der Bestimmung von Kohlensäure und Sauerstoff gestattet der Apparat noch die Untersuchung der Wasserdampfabgabe.

Hierbei wurde das nur wenig modifizierte Prinzip der Bestimmung von Pettenkofer zugrunde gelegt.

Durch vier kleine, nur ca. 8 l fassende Gasuhren, die durch Zahnräder untereinander und mit der Achse der großen Gasuhr verbunden sind, werden von dem Einstrom und dem Ausstrom kurz vor und kurz hinter dem Kasten je 2 Teilströme abgesaugt. Die Ventilation ist sehr langsam und verhält sich zu der der großen Gasuhr etwa wie 1 : 188. Kurz hinter die Abzweigung der Teilströme ist jedesmal ein Paar kleine Glaskölbchen, die gut ausgeglüht, und mit konzentrierter Schwefelsäure getränkte und benetzte Bimssteinstücke enthalten, in den Gang des Luftstroms eingeschaltet in analoger Weise wie bei dem Voit-Pettenkoferschen Apparate.⁽⁸⁾ Damit die Absorption von Wasserdampf eine möglichst vollständige ist, darf die Luft nur sehr langsam hindurchstreichen. Durch Blechrohrleitungen ist die Verbindung mit den Gasuhren hergestellt. Nur bei den Teilströmen, die eine Luftprobe vor dem Eintritt in den Kasten entnehmen, mußte, um das Öffnen und Schließen der Kammer nicht zu behindern, an einer Stelle ein Stück dicken Gummischlauchs eingeschaltet werden. Bei der großen Wandstärke

sind Fehlerquellen durch Anwendung des Gummis wohl ausgeschlossen. Die Berechnung der Wasserdampfentwicklung ist sehr einfach und genau die gleiche wie bei dem Apparate von Voit und Pettenkofer.

Durch Wägen der Glaskölbchen zu Anfang und zu Ende des Versuchs wird die Wassermenge, die das durch die kleinen Gasuhren hindurchgegangene und dort ablesbare Luftvolumen enthält, bestimmt.

Die Differenz der Gewichtszunahme der Kölbchen vor und hinter dem Kasten ergibt dann nach Umrechnung auf die Gesamtluftmenge, welche die Gasuhren passiert haben, die Wasserdampfproduktion während des Versuchs.

Prüfung der Leistungsfähigkeit des Apparates.

Der theoretische Einwand, der gegen alle Methoden, die mit kleinen Teilströmen arbeiten, erhoben werden kann, ist hauptsächlich der, daß die Mischung der Luft an der Stelle, wo der Teilstrom abgesogen wird, nicht eine völlig gleichmäßige ist. Die praktische Gültigkeit kann nur durch Verbrennung bekannter Substanzen und Vergleich der berechneten und gefundenen Werte festgestellt werden. Um den mittleren Fehler des Apparates zu bestimmen, verbrannte ich genau bekannte Mengen absoluten Alkohols. Ich verfuhr dabei in ähnlicher Weise wie Atwater und Benedict [(¹) S. 96] bei ihrem Respirationskalorimeter in Middletown, nur benutzte ich nicht einen Argandbrenner, sondern nahm eine Spiritusglühlichtlampe, bei der wohl die Garantie, daß der Alkohol wirklich restlos zu Wasser und Kohlensäure verbrennt, die größte ist.

Da die Alkoholverbrennungsversuche über viele Stunden ausgedehnt werden mußten, und das Arbeiten mit sehr großen Lampen viele Nachteile hat, wurde die kleine Lampe von außen durch eine Gummischlauchleitung aus einem Reservoir mit Alkohol, der durch Chlorcalcium gegen die Außenwelt abgeschlossen wurde, gespeist. Am Anfangsteil dieser Schlauchleitung befand sich eine Bürette, an der der Stand des Alkoholniveaus zu Ende und zu Anfang des Versuchs genau abzulesen war.

Da die Verwendung von absolutem Alkohol wegen der großen Avidität zum Wasserdampf nicht ratsam war, verdünnte ich mir von Merck bezogenen, garantiert reinen und wasserfreien Alkohol mit Wasser, das bis auf 0.1 mg genau abgewogen wurde, so weit, daß er 92^o/ig war. Verbrennt man davon pro Stunde ca. 10—15 g, so bekommt man ungefähr die Zusammensetzung der Kammerluft wie bei einem Versuch am Menschen.

Im einzelnen gestaltet sich ein solcher Alkoholverbrennungsversuch folgendermaßen:

Nach Abklemmen der Schlauchzuleitung wird die Lampe mit 92^o/igem Alkohol, der durch Zusatz einer minimalen Spur Methylenblau gefärbt ist, gefüllt, sodaß der Alkohol oberhalb einer Marke steht, die an einem feinen, mit dem Boden der Lampe kommunizierend verbundenen Steigrohr angebracht ist. In dem vorher 1 Stunde gut ventilierten Kasten wird dann bei zunächst weit geöffneter Kammer der Alkohol in der bei Spiritusglühlichtlampen üblichen Weise entzündet. In den ersten Minuten ist oft die Verbrennung des Alkohols keine vollkommene, was sich in dem Entstehen brenzlig riechender, gasförmiger Produkte zu erkennen gibt. Da der Kasten, dessen Deckenventilator dauernd in Tätigkeit ist, weit offen steht und der eigentliche Versuch frühestens eine Stunde später beginnt, entsteht durch diese geringe Menge nicht vollkommen oxydierter Stoffe keinerlei Fehlerquelle.

Nachdem der Glühstrumpf vollkommen weißglühend geworden ist, wird durch Beschränkung der Alkoholzufuhr aus dem Glasbassin der Lampe die Verbrennung der Lampe so reguliert, daß pro Stunde etwa 10—15 g Alkohol oxydiert werden.

Dann wird der Kasten geschlossen und durch die große Gasuhr ventiliert, sämtliche Teilstromleitungen sind natürlich dabei gesperrt. Der Deckenventilator bleibt zur Mischung der Luft während des ganzen Versuchs in Gang.

Nach 1—1¹/₂ Stunden beginnt dann der eigentliche Versuch, indem durch Öffnung des Alkoholzuleitungsschlauchs die Lampe genau bis zur Marke mit Alkohol gefüllt wird. Der Punkt läßt sich, da der Alkohol etwas gefärbt ist und das Steig-

rohr durch einen Spiegel deutlich sichtbar gemacht werden kann, sehr scharf bestimmen. Sofort wird eine Probe der Kammerluft entnommen und das Absaugen eines Teilstroms an der Gasuhr beginnt. Der Stand der Gasuhr, Temperaturen von Ein- und Ausstrom, Barometerstand und Zeit werden genau notiert. Wenn während der einzelnen Perioden des Versuchs Schwankungen der Temperatur oder des Barometers in irgend wie nennenswertem Grade stattfinden, muß natürlich häufiger abgelesen werden. Die Temperaturen an der Gasuhr innerhalb eines halben Grades konstant zu halten, gelingt fast immer durch Regulierung des großen Zimmerventilators, der Heizung und Öffnen oder Schließen des Fensters ohne jede Mühe, oft betragen die Schwankungen während eines ganzen Versuchs nur $0,1^\circ$.

Ist das Quecksilber aus dem großen Teilstromgefäß ausgelaufen, so ist die erste Periode des Versuchs zu Ende. Durch Modifizierung der Stärke des Teilstroms läßt sich die Periode in beliebiger Zeit ausdehnen zwischen 1 und 8 Stunden. Für gewöhnlich dauerte sie 3—5 Stunden.

Am Ende wird die Gasuhr abgestellt und das Zuleitungsrohr der Luft zum Kasten gesperrt.

Nachdem die Luft aus dem großen Teilstromgefäß in kleinere Glasrohre zur Analyse übergeführt und der Teilstromapparat wieder mit Quecksilber gefüllt ist, beginnt nach Vornahme der nötigen Ablesungen die 2. Periode des Versuchs, indem die Zufuhr zum Kasten wieder geöffnet und die Gasuhr in Gang gebracht wird.

In genau derselben Weise verläuft und endigt die 2. Periode, an die sich je nach Belieben noch weitere anschließen können. Am Schlusse des ganzen Versuchs wird dann noch einmal eine Probe der Kammerluft entnommen, und durch Zufluß von außen der Alkohol in der Lampe wieder genau auf die Marke wie zu Beginn des eigentlichen Versuchs eingestellt. Im Verlaufe des Versuchs selbst muß man ab und zu etwas Alkohol in die Lampe nachfließen lassen, damit sie nicht ausgeht.

Die während der Versuchsdauer verbrannte Alkoholmenge ist sehr einfach zu bestimmen. Man braucht nur das kleine mit Alkohol gefüllte Kölbchen außerhalb des Apparats zweimal

zu wiegen, jedesmal nach der Einstellung des Alkohols in der Lampe zu Beginn des Versuchs und dann am Ende. Die Gewichts-differenz ergibt die Menge verbrannten Alkohols, jedoch noch nicht genau, denn der Stand der Bürette muß mit in Rechnung gezogen werden. Steht der Alkohol bei der 2. Ablesung tiefer, so muß die Differenz gegenüber der 1. Ablesung umgerechnet in Gramm Alkohol zu der Gewichts-differenz der Kölbchen addiert, im entgegengesetzten Falle davon subtrahiert werden.

Die Zahl der Versuche, in denen auch der Wasserdampf bestimmt wurde, ist noch zu gering, um ein abschließendes Urteil zu gestatten. Als Beispiel sei im Anhang ein Versuch mitgeteilt, der einen Fehler von $+ 3,76\%$ ergab.

Die Resultate der Alkoholverbrennungsversuche sind in Tabelle I zusammengestellt. Die Berechnungsart sowie die Versuchsprotokolle sind im Anhang mitgeteilt.

Ein Teil der Verbrennungsversuche mußte verworfen werden, da ein Defekt der Gasuhr eintrat, die dann neu umgearbeitet wurde. Diese Versuche habe ich in der Tabelle fortgelassen.

Wie aus der Zusammenstellung und der Berechnung des prozentualen Fehlers hervorgeht, ist dieser für CO_2 und O_2 der gleiche, $0,93\%$; jedoch ist er bei der Kohlensäure negativ, beim Sauerstoff positiv. Während der Fehler der absoluten Zahlen sehr gering ist, kommt das entgegengesetzte Vorzeichen im respiratorischen Quotienten stärker zum Ausdruck, er liegt etwa $0,012$ niedriger, wie der Berechnung entspricht. Sind die absoluten Fehler an sich schon gering, so fällt als günstiges Moment auf, daß die größten Differenzen der Versuche außerordentlich gering sind, die Zahlen für die Kohlensäure schwanken nur in der Breite von $0,88\%$, die für den Sauerstoff innerhalb $0,64\%$, sodaß in den Fällen, in denen es auf besondere Genauigkeit der Werte ankommt — im allgemeinen sind Schwankungen von 1% bei Stoffwechselversuchen bedeutungslos — die mittlere Korrektur von $+ 0,93\%$ angebracht werden kann.

Woher es kommt, daß die Fehler sich im entgegengesetzten Sinne bewegen, ist schwer zu sagen, am ehesten könnte man

Tabelle I.

Nr.	Ver- suchs- Datum	Menge des ver- brannten absoluten Alkohols g	Ver- suchs- dauer Stund.	Redu- zierte Gas- volu- mina l	CO ₂ in l ge- funden	CO ₂ in l be- rech- net	% Fehler der einzel- nen Ver- suche	% Fehler ins- ges- amt für CO ₂	O ₂ - Ver- brauch in l ge- funden	O ₂ - Ver- brauch in l be- rech- net	% Fehler des einzel- nen Ver- suchs	% Fehler ins- ges- amt für O ₂	Respi- ratio- rischer Quo- tient ge- funden	Respi- ratio- rischer Quo- tient be- rech- net	Diffe- renz zwischen berech- netem und gefun- denem Quo- tienten
1	10.5.09	102.01	11	10952,6	98,10	98,96	-0,87		150,2	148,6	+1,05		0,653	0,666	-0,013
2	21.5.09	56,761	6 1/4	7940,0	54,63	55,14	-0,92		83,5	82,77	+0,88		0,654	0,666	-0,012
3	2.6.09	81,701	8 1/4	8359,0	78,90	79,32	-0,53	-0,93	120,55	119,1	+1,22	+0,93	0,655	0,666	-0,011
4	31.8.09	106,73	10	10596,0	102,11	103,6	-1,41		156,5	155,6	+0,58		0,654	0,666	-0,012

noch unvollkommene Absorption in Kalilauge und Pyrogallol als Erklärung annehmen, dagegen sprechen aber die guten Übereinstimmungen der Analysen atmosphärischer Luft (vgl. 3, S. 535), die ich stets erhalte.

Versuche am Menschen.

Bei diesen Versuchen wurde in prinzipiell der gleichen Weise bezüglich der Ventilation und Teilstromabsaugung verfahren wie bei den Alkoholverbrennungen.

Der Kasten wurde erst offen, dann geschlossen 1—2 Stunden vor Beginn des Versuchs durch die beiden Ventilatoren des Zimmers und des Kastens, sowie die auf raschen Gang gestellte Gasuhr stark ventiliert. Durch Entnahme von Stichproben überzeugte ich mich in einzelnen Fällen, daß dann tatsächlich die Kastenluft dieselbe Zusammensetzung hatte wie die atmosphärische Luft.

Der Kranke wird währenddessen auf das oben beschriebene Versuchsbett gelegt, auf dem er erst $\frac{1}{4}$ — $1\frac{1}{2}$ Stunde vor Beginn des Versuchs ruhig liegt. Bei Nüchternversuchen sah ich darauf, daß die Versuchspersonen mindestens 12—14 Stunden vorher die letzte eiweißarme, meist aus Brei bestehende Mahlzeit eingenommen hatten; in einzelnen Fällen wurde 1— $1\frac{1}{2}$ Stunde vor dem Versuch eine Tasse dünnen, schwarzen Kaffees (ohne Zucker und Milch) gegeben. Bei Versuchen nach Nahrungsaufnahme fand diese auf dem Versuchsbette statt.

Der eigentliche Versuch beginnt, wenn nach Abstellung der Gasuhr und Öffnen des Kastens das Bett mit dem Patienten über die Schienenanfahrt in den Kasten hereingeschoben und dieser gleich wieder geschlossen wird.

Der Einwand, daß in den paar Sekunden, während der Kasten teilweise offensteht, die Zusammensetzung der Kammerluft eine merkwürdige Änderung erfährt, ist unberechtigt, da einmal in so kurzer Zeit ein Gasaustausch, der auch nur irgend wie in Betracht käme, nicht stattfindet, und weil zweitens infolge der starken Ventilation des ganzen Zimmers die Luft um den Kasten herum keine außerhalb der Fehlergrenzen fallende

Verschiedenheit der Zusammensetzung von atmosphärischer Luft besitzt; Voraussetzung ist natürlich, daß nicht Menschen sich längere Zeit vorher im Zimmer aufgehalten haben.

Da selbst bei sehr geringer Ventilation durch die Gasuhr der Kohlensäuregehalt der Kammer nur langsam ansteigt, habe ich in manchen Fällen die Versuchsperson im luftdicht abgeschlossenen Kasten einige Zeit liegen lassen, die Mischung der Kastenluft durch den Deckenventilator besorgt und dann am Schluß eine Luftprobe aus dem Kasten entnommen. Für die Bestimmung des respiratorischen Quotienten ist das Verfahren auch für kurze Versuchsdauer durchaus zweckmäßig, für die absoluten Zahlen bekommt man nach meinen Erfahrungen jedoch leicht zu hohe Werte, da die Luft unter dem Bette am Boden des Kastens trotz des Deckenventilators etwas stagniert und nicht vollkommen mit der übrigen Luft des Kastens gemischt wird. Da bei Feststellung der absoluten Zahlen für CO_2 - und O_2 -Defizit der Gesamthalt des Kastens in Rechnung gestellt wird, können die Werte dann nicht immer ganz richtig ausfallen.

Sehr bald habe ich dann bei Versuchen nach Nahrungsaufnahme das Verfahren aufgegeben und habe, um die Oxydationen während der ersten 2 Stunden nach der Mahlzeit kennen zu lernen, den Kasten ca. 1 Stunde geschlossen gelassen und dann eine Stunde mit der Gasuhr ventiliert und einen Teilstrom wie gewöhnlich abgesaugt. Auf diese Weise erhält man dann unter Umgehung der vorigen Fehlerquelle einen Kohlensäuregehalt von über 0,5%, was zur Herabsetzung der unvermeidlichen Fehler der Gasanalyse, die umgekehrt proportional dem Gehalt an Kohlensäure kleiner werden, dringend wünschenswert ist.

Wenn es galt, den Nüchternumsatz der Versuchspersonen kennen zu lernen, wechselte ich die Gefäße alle 5 Stunden und bestimmte nur einmal am Schlusse des ganzen Versuchs die Zusammensetzung der Kammerluft.

In Versuchen nach Nahrungsaufnahme wurde der Teilstrom kleiner genommen, sodaß nach 2—3 Stunden ein Abschnitt gemacht wurde.

In solchen Fällen muß natürlich am Ende jeder Einzel-

periode eine Luftprobe aus der vorher mindestens 3 4 Stunde gut ventilierten Kammer genommen werden.

Bei der Berechnung ist ein gewisser Fehler unvermeidlich. Während das Volumen der Kammer genau bekannt ist, wechselt das Volumen der Versuchsperson sowie der toten Räume, die sich zwischen Körper und Hemd der Versuchsperson, sowie zwischen Hemd und Decken befindet. Um für diese Größen eine ungefähre Korrektur anzubringen, stelle ich das Volumen der Versuchsperson in der Weise in Rechnung, daß ich den größten Körperumfang (Brust, Bauch oder Hüften) bestimme, unter der Annahme, daß er kreisförmig ist, den Radius berechne und die so gefundene Zahl quadriere und mit $\pi \times$ Länge der Versuchsperson multipliziere (nach der Inhaltsformel für den Zylinder $J = r^2 \pi h$).

Natürlich ist diese Korrektur nicht genau.

Je größer aber das Luftvolumen ist, das in der Versuchsperiode die Gasuhr passiert hat, desto kleiner wird für das Gesamtergebn der Fehler.

Nahezu ganz eliminieren kann man ihn dadurch, daß man den Versuch erst beginnt, nachdem bei gleichbleibender Ventilation Kohlensäureproduktion und Sauerstoffverbrauch im Kasten ungefähr konstant geblieben sind (meist nach 2—3 Stunden), dann kommen für die Berechnung nur die geringen Differenzen zwischen Zusammensetzung der Kastenluft zu Anfang und derjenigen zu Ende des Versuchsabschnittes in Betracht. Auf 2—3 l kommt ein Fehler von 0,5% dann nicht in Betracht.

Bezüglich der praktischen Anwendung der Methode verweise ich auf die Arbeit über den Hungerstoffwechsel.

Hervorgehoben sei nur noch, daß selbst ganz Schwerkranke oder sehr empfindliche Versuchspersonen niemals eine unangenehme Beeinflussung des Befindens durch langen Aufenthalt im Apparat angegeben haben; nur über Langeweile wurde ab und zu geklagt, diesem Übelstande kann jedoch bei sehr langen Versuchen durch die Erlaubnis zu lesen abgeholfen werden. Daß geistige Arbeit keinen meßbaren Einfluß auf den Stoffwechsel ausübt, ist durch alte und neue Versuche sichergestellt.

Literaturangaben.

1. Atwater und Benedict, A respiration Calorimeter, Public. by the Carnegie Institution of Washington, Nr. 42. 1905.
2. von Bergmann, Zeitschrift f. experim. Pathologie u. Therapie, Bd. V. 1909.
3. Grafe, Deutsches Archiv f. klin. Medizin, Bd. XCV, S. 529. 1909.
4. Hempel, Gasanalytische Methoden, III. Aufl. 1900.
5. Jaquet, Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft Basel, Bd. XV, S. 252 ff., 1903.
6. Magnus-Levy, C. von Noordens Handbuch der Pathol. des Stoffwechsels, Bd. I, S. 208 ff.
7. Stähelin, Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft in Basel, Bd. XIX, S. 107, 1904.
8. C. u. E. Voit und J. Forster: Zeitschr. f. Biol., Bd. XI, S. 126.

Anhang:

Die bei Oxydation von absolutem Alkohol entstehende Menge Kohlensäure und die zur Verbrennung nötige Menge Sauerstoff lassen sich in einfacher Weise aus folgender Formel berechnen:



Da bei der Oxydation von Alkohol 2 Moleküle CO_2 entstehen und das Molekulargewicht von $C_2H_6O = 46,05$, das von $CO_2 = 44$ ist, ergibt sich

$$\begin{array}{r} 46,05 \quad 1 \\ 88,00 \quad x \end{array}$$

d. h. 1 g Alkohol ergibt bei der Oxydation 1,911 g $CO_2 = 0,972$ l CO_2 . Die analoge Rechnung, für den Sauerstoffverbrauch angestellt, führt zu der Gleichung

$$\begin{array}{r} 46,05 \quad 1 \\ 6 \times 16 \quad x \end{array}$$

d. h. 1 g Alkohol absolut. hat zur vollkommenen Oxydation 2,085 g $O_2 = 1,458$ l O_2 nötig. Sämtliche in der Gasuhr gemessenen Luftvolumina wurden nach der bekannten Gasformel:

$$V_0 = v \frac{B - tv}{760 (1 + \alpha t)}$$

reduziert auf 760 mm Hg, 0° und absolute Trockenheit. Wie schon oben erwähnt, konnte die Luft in der Gasuhr als mit Wasserdampf gesättigt angesehen werden, so daß von dem Barometerstand nur der Sättigungsdruck des Wassers bei der betreffenden Temperatur abgezogen zu werden brauchte. Der Feuchtigkeitsgehalt der Kammer wurde mit dem Psychrometer von August bestimmt. Die Luft ergab sich in allen Fällen als nahezu mit Wasserdampf gesättigt.

Außer der Dampftension muß bei der Korrektur des abgelesenen Barometerstandes auch die Erwärmung des Quecksilbers, sowie die Korrektur für den Breitengrad (für Heidelberg $+ 0.38$) in Anrechnung gebracht werden.

Bei dem gleichmäßigen, langsamen Gang der Gasuhr finden, wie die Menisken des an ihr angebrachten kleinen Wassermanometers zeigen, keine Veränderungen des Druckes statt, nur ein leichtes Zittern der Wasserspiegel ist zu sehen.

Zu dem an der Gasuhr abgelesenen Luftvolumen ist das Volumen des für die Entnahme des Teilstroms verwandten Glasgefäßes mit 1.2 l hinzuzuzählen.

Für die Berechnung des CO_2 - und O_2 -Gehaltes der Kammer zu Anfang und zu Ende jedes Versuches wurde das Volumen der Kammer $+$ dem Inhalt des Verbindungsrohres zur Meßstrommel der Gasuhr zugrunde gelegt.

Die Kammer war nach genau angegebenen Maßen konstruiert und genaue Messungen ergaben, daß der Inhalt tatsächlich die berechnete Größe von 2634,8 l hatte. Bei dieser Zahl ist der minimale Raum, den der Ventilatorflügel aus Blech, sowie Telephon und Klingelknopf hatte, nicht mit eingerechnet. Der Inhalt der Blechrohrleitung zur Gasuhr beträgt 8,47 l. Diese Zahl muß für Reduktionen zu 2634,8, dem Inhalt der Kammer, hinzuaddiert werden.

Bezüglich der Methode der Gasanalyse verweise ich auf Jaquets⁵⁾ Angaben, sowie das bekannte Hempelsche Buch⁽⁴⁾.

Es wurden stets Doppelanalysen gemacht und, wenn die Differenz größer wie 0,01% war, noch eine oder zwei weitere.

Bezüglich der Berechnung des Sauerstoffdefizits, das nicht wie die CO_2 direkt aus dem Prozentgehalt der Luft sich ableiten läßt, sondern indirekt über den Stickstoff, verweise ich auf das Jaquetsche Beispiel [(5), S. 271].

Die Tabellen II und III enthalten die ausführlichen Protokolle der vier Alkoholverbrennungsversuche.

Da aus dem Gesagten wohl deutlich Art und Gang der Berechnung hervorgeht, glaube ich auf Mitteilung eines ganz ausführlichen, hier durchzurechnenden Beispiels verzichten zu können.

Beispiel einer Wasserdampfbestimmung.

Versuch vom 12. 6. 09.

In der Kammer wurde in der oben geschilderten Weise 58,1918 g 92%igen Alkohols verbrannt. Das entspricht einer Menge von 53,55 g absoluten Alkohols.

Nach der oben angegebenen Formel (S. 16) kommen auf 1 Molekül absoluten Alkohols 3 Moleküle H_2O :

$$\frac{46.05}{54.045} = \frac{1}{x} : x = 1.1737 \text{ g H}_2\text{O}.$$

Tabelle II (Anhang).

Datum	Menge Alkohol	Ver- suchs- zeiten	Tem- perat- ur der Gas- uhr ° C.	Baro- meter un- redu- ziert inmm Hg	Auf ° ^o . 760 mm Hg und Trockenheit redivertetes Luft- volumen in l	CO ₂ in %	CO ₂ abso- lut in l	CO ₂ in l in fun- den	CO ₂ in l in be- rech- nel	O ₂ - Defizit in %	O ₂ - Defi- zit abso- lut in l	O ₂ - Defi- zit in l in fun- den	O ₂ - Defi- zit in l in be- rech- nel	CO ₂ O ₂	Bemerkungen
10. 5. 09	110,827 g 92% iger Alkohol = 102,01 g absolutem Alkohol	10 ⁴⁴ a. m.	15,0	749,5	2418,0	0,5125	11,52			20,255	18,6			8 ³⁵ Vorversuch begonnen. 10 ⁴⁵ Beginn des Hauptversuchs. kurz vorher Ent- nahme einer Luft- probe aus der Kammer. Das gleiche ge- schah um 9 ⁴⁵ , so- fort nach Beendi- gung des Versuchs.	
		10 ⁴⁵ a. m.	15,0	749,5	2787,6	0,695	18,33			20,000	29,0				
		1 ³⁰ p. m.	15,5	750,0	2852,0	0,8125	22,18	98,10	98,96	19,862	34,7	150,2	148,6		0,653
		4 ⁰⁰ p. m.	16,0	749,5	2675,0	0,8775	22,51			19,7175	36,1				
		6 ⁴⁰ p. m.	16,4	751,5	2644,0	0,92	23,36			19,69	36,5				
		9 ⁴⁵ p. m.	16,5	751,0	2412,0	1,00	23,24			19,70	32,5				
		1 ¹⁵ p. m.	20,0	758,0	2845,0	0,475	13,41			20,345	18,9				
		5 ⁰⁰ p. m.	21,5	757,5	2724,0	0,85	22,17	54,63	55,14	19,785	34,6	83,50	82,77		0,654
		8 ⁰⁰ p. m.	21,5	758,0	2371,0	0,84	19,05			19,795	29,8				

In diesem Falle wurde die Lampe anderhalb des Kastens angefü-
hrt und eingestell-
t. Der Versuch begann
im Augenblicke, wo
die Lampe im Kasten
stand. — Sofort nach
Beendigung des Ver-
suchs wird eine Probe
der Kastenluft ent-
nommen.

Tabelle III (Anhang).

Datum	Menge Alkohol in g	Ver suchszeiten	Temperatur der Gasuhr ° C.	Barometer un reduziert in mm Hg	Auf 0°, 760 mm Hg und Trockenheit reduziertes Luftvolumen in l	CO ₂ in % in l	CO ₂ absolut in l	CO ₂ in l gefun den	CO ₂ in l be rech net	O ₂ -Defizit abso lut in l	O ₂ -Defizit in l gefun den	O ₂ -Defizit in l be rech nel	CO ₂ O ₂ Bemerkungen	
2. 6. 09	88,8015 g 92% iger Alkohol = 81,701 g absolutem Alkohol	1 ¹⁵ p. m.	23,5	750,0	2320	0,61	13,31			21,0			Der Versuch wurde genau in derselben Weise ange stellt, wie der vom 10. 5. 09.	
		1 ³⁰ p. m.	23,5	750,0	2865	0,775	21,70			33,7				
		4 ¹⁵ p. m.	24,0	749,1	2723	0,900	24,75	78,90	79,32	38,01	120,55	119,1		0,655
		7 ³⁰ p. m.	24,4	749,0	2779	0,92	25,85				39,34			
		10 ⁰⁵ p. m.	24,0	750,0	2312	0,8975	19,91				30,50			
31. 8. 09	116,03 g 92% iger Alkohol = 106,73 g absolutem Alkohol	1 ¹⁵ p. m.	19,0	748,0	2370	0,86	19,98			30,1			Der Versuch wurde genau in derselben Weise ausge führt wie der vorige.	
		1 ¹⁵ p. m.	19,0	748,0	5776	0,938	52,05			79,01	156,5	155,6		0,654
		5 ⁵⁰ p. m.	19,2	748,0	4818	1,020	47,42	102,11	103,6	72,99				
		10 ¹⁵ p. m.	19,0	749,0	2372	0,99	22,62				34,2			

Bei Verbrennung von 53,55 g absoluten Alkohols entstehen mithin 62,85 g H_2O , dazu kommen 4,642 g H_2O , da der Alkohol 92%ig war, so daß im Versuch 67,492 g H_2O -Dampf entstanden sind.

Die Gewichtszunahme der Kölbchen des Einstroms betrug 0,453 g im Durchschnitt, die des Ausstroms 0,8277 g, so daß im Versuch eine Gewichtszunahme von 0,3747 g eintrat, und zwar nachdem 78,55 l Luft die Kölbchen passiert hatten.

In derselben Zeit wären 14512,4 l durch die große Gasuhr hindurchgegangen, so daß während des ganzen Versuchs $(14512,4 : 78,55 \times 0,3747 \text{ g}) + 2 \times 0,3747 \text{ g} = 70,0294 \text{ g}$ Wasser gebildet waren.

Die Differenz gegenüber dem berechneten Wert ist

$$\begin{array}{r} 70,029 \\ - 67,492 \\ \hline + 2,537 \text{ g} \end{array} \text{ Wasserdampf,}$$

der Fehler beträgt demnach + 3,758%.

Die Beendigung der Alkoholverbrennung wurde in diesem Falle so bewerkstelligt, daß der Ventilator des Kastens ganz kurze Zeit maximal angedreht wurde. Es verlischt dann binnen wenig Sekunden die nun ganz klein brennende Lampe. Um sämtlichen während des Versuches gebildeten Wasserdampf zu erhalten, wurde der Kasten noch 5 Stunden mit der Gasuhr ventiliert und dann erst die Kölbchen gewogen.