

(Aus der Abteilung für Arbeitsphysiologie [Vorsteher: Dr. E. Simonson] des Sozialhygienischen Untersuchungsamtes Frankfurt a.M. [Leiter: Med.-Rat Dr. L. Ascher].)

Zur Berechnung von Respirationsversuchen.

Von

Ernst Simonson und Hermann Hebestreit.

(Eingegangen am 14. Dezember 1928.)

Obwohl die offenen Systeme von Respirationsapparaten (*Zuntz-Geppert, Douglas-Haldane, Simonson*) den geschlossenen (*Benedikt, Krogh* und Modifikationen) gegenüber hinsichtlich der Exaktheit der Versuchsbedingungen und der Anwendungsmöglichkeiten prinzipiell überlegen sind, waren die geschlossenen in der Anwendung bisher bevorzugt, einmal wegen des Fortfalls der Gasanalyse, die ja eine gewisse Technik voraussetzt und deren Ausführung einen gewissen Zeitverlust bedeutet, und dann wegen der umständlicheren Berechnung der Versuchsergebnisse (CO_2 -Ausscheidung und O_2 -Verbrauch) bei den offenen Systemen.

Wir haben uns bemüht, diese praktische Überlegenheit der geschlossenen Systeme durch Vervollkommnung der Analysetechnik (s. S. 564) und durch Vereinfachung der Berechnungsmethode auszugleichen.

*Kommerell*¹ hat zu dem gleichen Zweck sowohl für geschlossene wie für offene Systeme Nomogramme ausgearbeitet, die gleichfalls eine beträchtliche Vereinfachung und Beschleunigung der Berechnung ermöglichen. Die Verwendbarkeit seines Nomogramms für offene Systeme ist jedoch dadurch eingeschränkt, daß die Inspirationsluft (Zimmerluft) nicht immer einen O_2 -Gehalt von 20,88% hat, auf den sich seine Berechnungen beziehen, sondern daß Abweichungen vorkommen, die weit über die Fehlergrenzen von Gasanalysen hinausgehen. Auch wird bei dem Kommerellschen Nomogramm die Reduktion nicht bei der geatmeten Luftmenge, sondern an späterer Stelle angebracht; rechnerisch ist das natürlich hinsichtlich des Endresultates auch gleichgültig, jedoch ist für manche Fragestellungen auch die reduzierte Ventilationsmenge von Interesse, die bei dem Kommerellschen Nomogramm nicht erhalten wird. Schließlich werden bei der Kommerellschen Tafel die Werte auf 10 Minuten bezogen, so daß meist noch eine Umrechnung, wenn auch an sich ganz einfacher Natur, notwendig wird. Diese Einschränkungen beziehen sich jedoch lediglich auf das von *Kommerell* für offene Systeme ausgearbeitete Nomogramm. Bei der Überlegung, für welche vereinfachte Methodik (Nomogramme oder die von uns vorgeschlagenen Tabellen) man sich entscheiden soll, spielt auch die persönliche Einstellung insofern eine Rolle, als manchen die Nomogrammentechnik, manchen die Tabellenablesung leichter fällt.

Die Berechnung eines Respirationsversuchs bei Verwendung offener Systeme besteht darin, daß die auf 0° , 760 mm Hg und Trockenheit reduzierte Ventilationsmenge mit der prozentischen Änderung des CO_2 - und O_2 -Gehalts der Expirations- gegenüber der Inspirationsluft multipliziert wird. Man erhält dann die CO_2 -Ausscheidung und den O_2 -Verbrauch in Kubikzentimetern. Aus dem R. Q. wird dann in den *Zuntz*schen Tabellen der kalorische Wert des O_2 abgelesen, durch dessen Multiplikation mit dem verbrauchten O_2 die Calorien erhalten werden.

Die Modifikationen, die wir vorschlagen, bestehen in einer vereinfachten Berechnung der Reduktion und des prozentischen O_2 -Verbrauchs.

Bei einer Änderung des Druckes oder der Temperatur verändert sich das Gasvolumen um einen bestimmten Bruchteil, der in Prozenten des Ausgangsvolumens angegeben werden kann; die Volumänderung bei Veränderung des Barometerdruckes oder der Wasserdampfspannung um 1 mm Hg beträgt 0,1316% und pro 1° Temperaturänderung 0,367%. Da die Dampfspannung von der Temperatur abhängt, können Reduktion auf 0° und Trockenheit in einer Tabelle (s. Tab. 1, rechte Spalte) zusammengefaßt werden. (Die Wasserdampfspannung ist hierbei als maximale in Rechnung gesetzt, da die Expirationsluft als maximal wasserdampfgesättigt angenommen werden muß.) Addition der prozentischen Volumänderungen bei Druck- bzw. Temperatur- und Dampfspannungsänderungen ergibt dann die prozentische Gesamtabweichung. Hierbei ist zu beobachten, daß die Abweichung bei Drucken über 760 mm positives, unter 760 mm negatives und die Abweichungen bei Temperaturen über 0° natürlich stets negatives Vorzeichen haben. Die Operationen der Reduktion auf 760 mm Hg und der Reduktion auf 0° und Trockenheit müssen streng genommen nacheinander vorgenommen werden, d. h. die Reduktion auf 0° muß an dem schon auf 760 mm Hg reduzierten, also veränderten Volumen erfolgen. Aus diesem Grunde entsteht durch die einfache Addition der prozentualen Veränderungen ein Fehler, der um so größer wird, je weiter die Werte von den Normalwerten abweichen. Bei 10° und 750 mm Hg würde der Fehler zwar nur 0,05 der Prozentzahl ausmachen, aber bei extremen Bedingungen von z. B. 25° und 730 mm Hg würde der Fehler etwa 0,5 der Prozentzahl betragen, ein Fehler, der freilich in Anbetracht der natürlichen Schwankungsbreite der Ventilation vernachlässigt werden könnte. Um diesen Fehler völlig auszuschalten, wurden die prozentischen Volumabweichungen zur Reduktion auf 760 mm Hg um soviel Prozent verkleinert, als die mittlere Prozentzahl der Spalte 2 (Tab. 1) 1. für $10-25^\circ$, 2. für $15-20^\circ$, 3. für $20-25^\circ$ angibt. So entstehen die 3 Kolonnen für die Druckkorrektur. Dadurch ist es erreicht, daß der größte vorkommende Fehler in der Berechnung der reduzierten Volumina 0,05% beträgt, also praktisch völlig vernachlässigt werden kann. Tab. 1

Tabelle I. *Prozentuale Abweichung des Gasvolumens.*
Reduktion auf 760 mm Hg

1 mm Hg = 0,1316%
 (mit eingerechneter Korrektur zur
 Ausschaltung des Fehlers, der durch
 die Addition entsteht.)

mm Hg	10-15° %	15-20° %	20-25° %
730	-3,71	-3,61	-3,52
731	-3,58	-3,49	-3,40
732	-3,46	-3,37	-3,28
733	-3,34	-3,25	-3,17
734	-3,22	-3,13	-3,05
735	-3,09	-3,01	-2,93
736	-2,96	-2,89	-2,81
737	-2,84	-2,77	-2,69
738	-2,72	-2,65	-2,58
739	-2,60	-2,53	-2,46
740	-2,47	-2,41	-2,35
741	-2,35	-2,29	-2,23
742	-2,23	-2,17	-2,11
743	-2,11	-2,05	-2,00
744	-1,98	-1,93	-1,88
745	-1,86	-1,81	-1,77
746	-1,73	-1,69	-1,65
747	-1,61	-1,57	-1,53
748	-1,49	-1,45	-1,41
749	-1,36	-1,33	-1,29
750	-1,24	-1,21	-1,18
751	-1,11	-1,08	-1,06
752	-0,99	-0,96	-0,94
753	-0,87	-0,84	-0,82
754	-0,74	-0,72	-0,70
755	-0,62	-0,60	-0,58
756	-0,49	-0,48	-0,46
757	-0,37	-0,36	-0,35
758	-0,24	-0,24	-0,23
759	-0,12	-0,12	-0,12
760	-0,00	-0,00	-0,00
761	+0,12	+0,12	+0,12
762	+0,24	+0,24	+0,23
763	+0,37	+0,36	+0,35
764	+0,49	+0,48	+0,46
765	+0,62	+0,60	+0,58
766	+0,74	+0,72	+0,74
767	+0,87	+0,84	+0,82
768	+0,99	+0,96	+0,94
769	+1,11	+1,08	+1,06

Reduktion auf 0° und Trockenheit
 1° Celsius = 0,367%
 1 mm Hg Wasserdampfdruck
 = 0,1316%

Grad	Prozent	Grad	Prozent
10,0	-4,84	18,0	-8,51
10,2	-4,93	18,2	-8,61
10,4	-5,02	18,4	-8,71
10,6	-5,10	18,6	-8,80
10,8	-5,18	18,8	-8,89
11,0	-5,27	19,0	-8,99
11,2	-5,36	19,2	-9,09
11,4	-5,45	19,4	-9,19
11,6	-5,54	19,6	-9,28
11,8	-5,63	19,8	-9,37
12,0	-5,72	20,0	-9,47
12,2	-5,81	20,2	-9,57
12,4	-5,90	20,4	-9,68
12,6	-5,99	20,6	-9,78
12,8	-6,08	20,8	-9,88
13,0	-6,18	21,0	-9,98
13,2	-6,27	21,2	-10,08
13,4	-6,36	21,4	-10,18
13,6	-6,45	21,6	-10,28
13,8	-6,54	21,8	-10,38
14,0	-6,64	22,0	-10,48
14,2	-6,73	22,2	-10,58
14,4	-6,82	22,4	-10,68
14,6	-6,91	22,6	-10,78
14,8	-7,00	22,8	-10,88
15,0	-7,09	23,0	-10,98
15,2	-7,18	23,2	-11,08
15,4	-7,28	23,4	-11,18
15,6	-7,37	23,6	-11,28
15,8	-7,46	23,8	-11,39
16,0	-7,56	24,0	-11,50
16,2	-7,65	24,2	-11,60
16,4	-7,75	24,4	-11,71
16,6	-7,84	24,6	-11,82
16,8	-7,93	24,8	-11,92
17,0	-8,03	25,0	-12,02
17,2	-8,12	25,2	-12,12
17,4	-8,22	25,4	-12,23
17,6	-8,32	25,6	-12,34
17,8	-8,41	25,8	-12,44

Tabelle 1 (Fortsetzung).

Reduktion auf 760 mm Hg. 1 mm Hg = 0,1316% (mit eingerechneter Korrektur zur Ausschaltung des Fehlers, der durch die Addition entsteht).

mm Hg	10—15° %	15—20° %	20—25° %	mm Hg	10—15° %	15—20° %	20—25° %
770	+ 1,24	+ 1,21	+ 1,18	775	+ 1,86	+ 1,81	+ 1,77
771	+ 1,36	+ 1,33	+ 1,29	776	+ 1,98	+ 1,93	+ 1,88
772	+ 1,49	+ 1,45	+ 1,41	777	+ 2,11	+ 2,05	+ 2,00
773	+ 1,61	+ 1,57	+ 1,53	778	+ 2,23	+ 2,17	+ 2,11
774	+ 1,73	+ 1,69	+ 1,65	779	+ 2,35	+ 2,29	+ 2,23

ermöglicht also die Feststellung der prozentischen Gesamtabweichung, indem man in der linken Tabellenspalte für den herrschenden Barometerdruck und Temperatur den Korrekturwert abliest und dazu die in der rechten Spalte abgelesenen Temperatur- und Wasserdampfkorrektur hinzuaddiert. Beträgt z. B. die Temperatur 18,6° und der Barometerdruck 748 mm Hg, so beträgt die Gesamtabweichung (1,45 + 8,80) = 10,25%, d. h. das abgelesene Ventilationsvolumen ist um 10,25% zu hoch. Beträgt das abgelesene Volumen z. B. 18,7 l, so hat es sich um $\frac{10,25 \times 18,7}{100} = 1,91$ über sein Volumen bei 0°, 760 mm Druck und

Trockenheit ausgedehnt; 18,7—1,9 = 16,8 l entsprechen daher dem reduzierten Volumen.

Die Berechnung geschieht am besten mit Hilfe des Rechenschiebers; da bei Respirationsversuchen nur die erste Dezimale berücksichtigt zu werden braucht (die zweite liegt innerhalb der Schwankungsbreite eines Atemzuges), wird die Genauigkeit des Rechenschiebers nicht im entferntesten ausgenutzt, was der Schnelligkeit der Berechnung zugute kommt. Besonders bei Berechnung einer größeren Reihe von Respirationsversuchen macht sich der Vorteil unserer Methode geltend, da die Barometer- und Temperaturänderungen am gleichen Tage im gleichen Raum in engeren Grenzen bleiben, so daß die Einstellung des Rechenschiebers sich wenig oder gar nicht ändert. Bei einer Grundeinstellung können dann durch Verschiebung des Läufers mehrere Ablesungen (Volumänderung in Litern) erfolgen. *Natürlich ist die Anwendung unserer Reduktionsmethode nicht auf Respirationsversuche beschränkt.*

Die andere Tabelle, die wir mitteilen (2), bezieht sich auf eine vereinfachte Berechnung des „prozentischen O₂-Verbrauchs“. Es handelt sich hier um eine fiktive Größe, die lediglich zum Zwecke vereinfachter Berechnung eingeführt und von dem einen von uns (S.) bereits a. a. O.² mitgeteilt wurde.

Da das Inspirationsvolumen sich je nach der Höhe des R. Q. vom Expirationsvolumen unterscheidet, muß das Inspirationsvolumen aus dem Verhältnis von N₂-% der Expirationsluft: N₂-% der Inspirationsluft berechnet werden. Aus der Inspirationsluft wird die eingeatmete O₂-Menge und aus der Differenz gegenüber der ausgeatmeten der O₂-Verbrauch berechnet.

Tabelle 2. *Tabelle zur Ermittlung des fiktiven Sauerstoffgehaltes der Inspirationsluft.*

A % N₂ der Expirationsluft entsprechen B%₀ fiktiven O₂ der Inspirationsluft bei einem Sauerstoffgehalt der Luft von 20,91%

A% N ₂	B% O ₂						
		79,00	20,92	80,00	21,18	81,00	21,45
		79,02	20,93	80,01	21,19	81,02	21,46
		79,06	20,94	80,04	21,20	81,06	21,47
				80,08	21,21	81,09	21,48
		79,10	20,95	80,10	21,21	81,10	21,48
		79,14	20,96	80,12	21,22	81,13	21,49
		79,18	20,97	80,16	21,23	81,17	21,50
78,20	20,71	79,20	20,97	80,20	21,24	81,20	21,51
78,23	20,72	79,21	20,98	80,23	21,25	81,24	21,52
78,28	20,73	79,25	20,99	80,27	21,26	81,28	21,53
		79,29	21,00				
78,30	20,73	79,30	21,00	80,30	21,26	81,30	21,53
78,31	20,74	79,33	21,01	80,31	21,27	81,32	21,54
78,34	20,75	79,36	21,02	80,35	21,28	81,36	21,55
78,38	20,76			80,38	21,29	81,39	21,56
78,40	20,76	79,40	21,03	80,40	21,29		
78,42	20,77	79,44	21,04	80,42	21,30		
78,46	20,78	79,48	21,05	80,46	21,31		
78,50	20,79	79,50	21,05	80,50	21,32		
78,54	20,80	79,51	21,06	80,54	21,33		
78,57	20,81	79,55	21,07	80,57	21,34		
		79,59	21,08				
78,60	20,81	79,60	21,08	80,60	21,34		
78,61	20,82	79,63	21,09	80,61	21,35		
78,65	20,83	79,67	21,10	80,65	21,36		
78,68	20,84			80,69	21,37		
78,70	20,84	79,70	21,11	80,70	21,37		
78,72	20,85	79,74	21,12	80,72	21,38		
78,76	20,86	79,78	21,13	80,76	21,39		
78,80	20,87	79,80	21,13	80,80	21,40		
78,84	20,88	79,82	21,14	80,84	21,41		
78,87	20,89	79,86	21,15	80,88	21,42		
		79,89	21,16				
78,90	27,89	79,90	21,16	80,90	21,42		
78,91	20,90	79,93	21,17	80,91	21,43		
78,95	20,91	79,97	21,18	80,94	21,44		
78,99	20,92			80,98	21,45		

Bei unserer Tabelle entfallen die Zwischenglieder der Berechnung des Inspirationsvolumens, der eingeatmeten und ausgeatmeten O₂-Menge. Es wird auf Grund des N₂-Gehalts der Expirationsluft ein fiktiver O₂-Wert abgelesen, von dem dann der in der Analyse gefundene O₂-Wert der Expirationsluft abgezogen wird. Multiplikation dieses Differenzwertes mit dem reduzierten Ventilationsvolumen ergibt dann

den O_2 -Verbrauch in Kubikzentimetern. Wir haben die in der genannten Publikation bereits veröffentlichte Tabelle nach oben und unten ergänzt und teilen sie hier in dieser erweiterten Form und in etwas übersichtlicherer Darstellung mit.

Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen O_2 -Gehalt der Inspirationsluft von 20,91%. Bei Abweichung der Zimmerluft von diesem Wert ist die ermittelte Differenz von dem fiktiven O_2 -Wert der Tab. 2 abzuziehen. Beträgt z. B. der O_2 -Gehalt der Inspirationsluft nur 20,71%, so ist die Differenz von 0,2 in Anrechnung zu bringen, so daß z. B. der fiktive O_2 -Wert bei einem N_2 -Gehalt der Expirationsluft von 79,80% nicht 21,13, sondern 20,93% beträgt.

Eine Umrechnung der CO_2 auf Grund des N_2 -Gehaltes erübrigt sich wegen des geringen CO_2 -Gehaltes der Inspirationsluft. Zur Berechnung der CO_2 -Ausscheidung genügt Subtraktion des CO_2 -Gehaltes der Inspirationsluft von dem der Expirationsluft (und Multiplikation der erhaltenen CO_2 -Differenz mit dem reduzierten Ventilationsvolumen).

Die Calorien werden durch Multiplikation des auf Grund des R. Q. in den Zuntz'schen Tabellen abgelesenen kalorischen Sauerstoffwertes mit den verbrauchten Kubikzentimetern O_2 erhalten. Die Zuntz'schen Tabellen sind in die meisten entsprechenden Lehr- und Handbücher aufgenommen, so daß sich eine Wiedergabe erübrigt (siehe z. B. *Klein* und *Steuber*³). Eine Berücksichtigung der Eiweißcalorien und des nach Abzug des N-Umsatzes erhaltenen „Rest-R. Q.“ zur Berechnung des kalorischen O_2 -Wertes erübrigt sich, weil die hierbei maximal möglichen Veränderungen (Erhöhung des kalorischen O_2 -Wertes bei einem R. Q. über 0,82, Erniedrigung bei einem R. Q. unter 0,82) noch völlig in die Fehlergrenze von Respirationsversuchen fallen.

Bei Berechnung des Arbeitsverbrauches in kurzfristigen Versuchen genügt es, den Mehrverbrauch an O_2 gegenüber dem Ruhewert mit 5,06 (dem kalorischen O_2 -Wert für den R. Q. von 1,0) zu multiplizieren, da durch den einen von uns (S.) nachgewiesen wurde (l. c.), daß bei kurzfristigen Arbeitsversuchen zur Bestreitung des Energieaufwandes für äußere Arbeit in der weitaus überwiegenden Zahl der Fälle lediglich Kohlehydrate verbrennen.

An einem praktischen Beispiel sei die Benutzung unserer Tabellen erläutert: Es sei die Versuchsdauer 3 Minuten, die abgelesene Ventilationsmenge 15,6 l, Barometerstand 752 mm, Temperatur 17,8°.

Es ist dann die Gesamtkorrektur der Volumänderung nach Tab. 1:

$$-(0,96 + 8,41) = -9,37\%, \text{ d. h. auf } 15,6 \text{ l bezogen } \frac{9,37 \times 15,6}{100}$$

$$= 1,5 \text{ l, also das reduzierte Ventilationsvolumen: } 15,6 - 1,5 = 14,1 \text{ l.}$$

Die Inspirationsluft enthalte 0,1% CO_2 , 20,71% O_2 , 79,19% N_2 . Die Expirationsluft enthalte 4,02% CO_2 , 16,04% O_2 , 79,94% N_2 .

Es ist dann nach Tab. 2 für 79,94 der fiktive O_2 -%-Wert 21,17, nach Korrektur auf den O_2 -Wert der Inspirationsluft von 20,71 (Differenz $-0,2$) = 20,97, also fiktiver O_2 -Verbrauchswert $20,97 - 16,04 = 4,93\%$.

Es ergibt dann $14,1 \text{ l} \times 4,93 = 695 \text{ ccm O}_2$ -Verbrauch, $14,1 \times (4,02 \text{ minus } 0,1 = 3,92) = 553 \text{ ccm CO}_2$ -Ausscheidung in 3 Minuten, also pro Minute $695/3 = 232 \text{ ccm O}_2$. Auf Grund des R. Q. von $3,92/4,93 = 0,795$ ergibt sich ein kalorischer O_2 -Wert von $4,795$, d. h. $232 \times 4,795 = 1112 \text{ Cal./Min.}$

Zusammenfassung.

Zur Berechnung von Respirationsversuchen bei Verwendung offener Systeme werden Tabellen mitgeteilt, die zur vereinfachten Berechnung der Reduktion des Ventilationsvolumens und des prozentigen Sauerstoffverbrauchs dienen.

Literatur.

¹ Kommerell, Z. exper. Med. **56**, 740 (1927). — ² Simonson, Pflügers Arch. **214**, 380 (1926). — ³ Klein und Steuber, Methodik des dynamischen Stoffwechsels. Berlin 1925.
